

UFRRJ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA QUÍMICA
PROCESSOS QUÍMICOS

DISSERTAÇÃO

**Estudo da Sedimentação de Barita em Fluidos de
Perfuração**

Felipe Moreira Eler

2012



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**ESTUDO DA SEDIMENTAÇÃO DE BARITA EM FLUIDOS DE
PERFURAÇÃO**

FELIPE MOREIRA ELER

Sob a Orientação do Professor:
Luís Américo Calçada

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Área de Concentração em Processos Químicos

Seropédica, RJ
Agosto de 2012

622.3381

E39e

T

Eler, Felipe Moreira, 1987-

Estudo da sedimentação de barita em
fluídos de perfuração / Felipe Moreira Eler
- 2012.

67 f.: il.

Orientador: Luís Américo Calçada.

Dissertação (mestrado) - Universidade
Federal Rural do Rio de Janeiro, Curso de
Pós-Graduação em Engenharia Química.

Bibliografia: f. 45-47.

1. Lamas de perfuração - Teses. 2.
Barita - Teses. 3. Sedimentação e
depósitos - Teses. 4. Escoamento bifásico
- Teses. 5. Engenharia química - Teses. I.
Calçada, Luís Américo, 1966-. II.
Universidade Federal Rural do Rio de
Janeiro. Curso de Pós-Graduação em
Engenharia Química. III. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

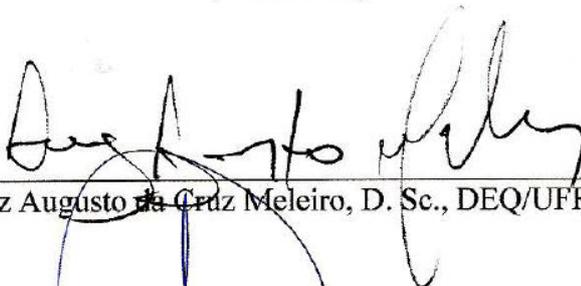
FELIPE MOREIRA ELER

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, área de Concentração em Tecnologia Química.

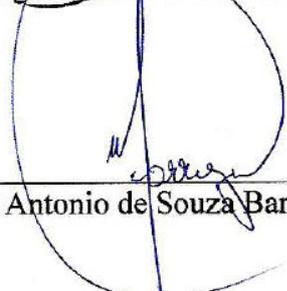
DISSERTAÇÃO APROVADA EM 30/08/2012



Luis Américo Calçada, D. Sc., DEQ/UFRRJ
(Orientador)



Luiz Augusto da Cruz Meleiro, D. Sc., DEQ/UFRRJ



Marcos Antonio de Souza Barrozo, D. Sc., FEQ/UFU

Dedico esta dissertação aos meus pais, Irene e Josias, que não pouparam esforços para que eu concluísse mais essa etapa em minha vida profissional. Vocês são meu porto seguro. Agradeço a Deus todos os dias por ter me dado pais como vocês. Deus os abençoe!

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus por todas as bênçãos recebidas até aqui e por mais essa etapa concluída em minha vida. Sei que tudo de bom que tenho veio de Ti, Senhor.

Agradeço aos meus pais, Josias e Irene, por toda a dedicação dispensada a mim, por seus esforços para que eu pudesse continuar meus estudos e pelo grande exemplo que eles são para mim. Amo vocês!

Agradeço a minha namorada, Maria Eduarda, por estar sempre ao meu lado, carinhosamente me apoiando e aconselhando sempre que necessário. Amo você!

Agradeço aos meus orientadores, Luís Américo Calçada e Cláudia Míriam Scheid, por todo seu apoio e empenho para que este trabalho pudesse ser realizado. Muito obrigado pela paciência que tiveram comigo, sei que foi preciso muita! Obrigado pelas contribuições técnicas e pelos conselhos valiosos.

Agradeço aos meus amigos de laboratório, Frederico, Marcos, Eduardo, Sérgio, Elias, Cristiano, Wanderson, Daniele, Tayani, Lorrane, Marcela, Renata... Por terem feito do LSP e do LEF mais do que um simples ambiente de trabalho. Alguns de vocês são irmãos, que quero ter sempre por perto.

Não poderia deixar de agradecer ao maravilhoso time que trabalhou diretamente comigo na realização deste trabalho. Carla Soares, Filipe Silva, Thaisy Gago, João Meneses e Irena Ramos, muito obrigado por tudo! Vocês estão no time dos amigos que quero ter sempre por perto.

Agradeço aos meus amigos de longa data, Marlon, Filipe Furtado e Natália Fernanda, vocês são meus irmãos!

Agradeço aos amigos pelos bons momentos e por sempre estarem por perto para dar uma palavra de incentivo. Muito obrigado Nathália Assis, Livia Lima, Wagner Leandro, Katia, Loane, Camila...

Agradeço a professora Márcia e ao professor Luiz Meleiro por suas contribuições ao trabalho.

Agradeço aos professores do DEQ que compartilharam seus conhecimentos e ajudaram em minha formação. Em especial, agradeço ao professor Maurício Mancini por ter sido meu primeiro orientador. Obrigado não só pela sua grande contribuição técnica, mas também pelos conselhos de paião!

Agradeço a todos do corpo técnico de DEQ e do IT, em especial a Fabiane, a Eliana e ao Luizão.

Agradeço a Petrobras e a Capes pelo suporte técnico e financeiro a essa pesquisa. A todo pessoal do CENPES/Petrobras, meu muito obrigado.

Agradeço aos professores da banca pela atenção ao ler e estudar este trabalho. Muito obrigado por trazer suas valiosas contribuições.

Agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a execução deste trabalho.

RESUMO

ELER, Felipe Moreira. **Estudo da sedimentação de barita em fluidos de perfuração**. 2012. 56p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química, Tecnologia Química). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2012.

A sedimentação de barita, ou qualquer outro material adensante, causa flutuações indesejáveis na densidade de fluidos de perfuração. Emperramento da broca, dificuldade de controle da pressão e perda de fluido são possíveis problemas causados pela sedimentação de barita. Neste trabalho, estudou-se a sedimentação de materiais adensantes durante o escoamento de fluidos de perfuração. O trabalho divide-se em duas partes, uma experimental e a outra de simulação computacional. Na etapa experimental, o teste API de viscosímetro e sapata (VSST) foi usado para avaliar dois fluidos de perfuração reais, cedidos pela Petrobras S/A. Também foram realizados testes de sedimentação em proveta para estimar parâmetros usados na modelagem. Todos os testes foram realizados em triplicata e analisados estatisticamente pelo teste-t e análise de variância (ANOVA). O teste VSST indica que o fluido à base de óleo tem maior tendência de sofrer sedimentação e que o fluido à base de água apresenta maior capacidade de ressuspensão de leito. Estes resultados estão de acordo com as observações de campo e os relatos da literatura. Duas alternativas de modelagem foram abordadas: o uso de pacotes comerciais de CFD e o estudo de modelos baseados nas equações de conservação. Na primeira abordagem, utilizou-se o pacote FLUENT[®] 12 para realizar simulações bidimensionais transientes, usando a metodologia Euleriana. Na segunda abordagem, um código desenvolvido em MATLAB[®] foi usado para resolver as equações de conservação de massa e de quantidade de movimento. As simulações em CFD apresentaram uma resposta que não condiz com o fenômeno observado na literatura. Por outro lado, o modelo baseado nas equações de conservação foi capaz de simular o escoamento de fluido em duas dimensões, transporte hidráulico de partículas e o processo de decantação em batelada. O modelo apresentou resultados de acordo com as soluções analíticas clássicas e com dados experimentais. O modelo também foi capaz de prever o efeito de parâmetros físicos como a viscosidade, o diâmetro de partícula e a concentração volumétrica na sedimentação de partículas.

Palavras-chave: Sedimentação. Fluidos de perfuração. Modelo bifásico.

ABSTRACT

ELER Felipe Moreira. **Study of the barite sag in drilling fluids**. 2012. 56p. Dissertation (Master in Chemical Engineering, Chemical Technology). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2012.

The sedimentation of barite, or any other weighting material, causes undesirable fluctuations in the density of drilling fluids. Stuck pipe, pressure control difficulties and loss circulation are problems possibly caused by barite sag. In this work the weighting material sag during the flow of oil-based drilling fluids were studied. The work is divided into two parts: the first is an experimental work and the other focuses the modeling of the phenomenon. In the experimental stage the API procedure VSST (viscometer sag shoe test) was used to evaluate some field drilling fluids from Petrobras S/A. Batch sedimentation tests using the graduated cylinder methodology were also performed in order to estimate parameters used in modeling. The tests were performed in triplicate and statistically analyzed by t-test and analysis of variance (ANOVA). The VSST procedure indicates that the oil-based fluid is more prone to suffer sedimentation and the water-based fluid has greater capacity of bed resuspension. These results are in agreement with field observations and reports in the literature. Two modeling alternatives were discussed: the use of commercial CFD packages and the study of models based on conservation equations. The first approach used package FLUENT[®] 12 to perform two-dimensional, transient simulations using the Eulerian methodology. In the second approach a code developed in MATLAB[®] was used to solve the equations of conservation of mass and momentum. On the other hand, the CFD simulations showed a response that is not consistent with the phenomenon observed in the literature. Finally, the model based on conservation equations was capable of simulating two dimensional fluid flow, hydraulic transport of particles and batch sedimentation process. The model is in agreement with the classical analytical solutions and experimental data. The model also predicts the effect of physical parameters such as viscosity, particle diameter and volume concentration in the sedimentation.

Keywords: Sedimentation. Drilling fluids. Biphasic model.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Esquema do escoamento de fluidos de perfuração. | 2 |
| Figura 2. Representação de uma janela operacional de pressão. Adaptada de Omland (2009). | 3 |
| Figura 3. Dois corpos de igual massa e volume, mas com diferentes áreas projetadas. | 5 |
| Figura 4. Ocorrência de três estágios dinâmicos durante o escoamento em uma mesma vazão. Adaptado de Nguyen (2009)..... | 7 |
| Figura 5. Representação do efeito Boycott. Adaptado de Zamora & Jefferson (1994). | 7 |
| Figura 6. <i>Loop</i> utilizado para se determinar efeitos de excentricidade do anular e rotação da coluna. Adaptada de Nguyen (2009). | 8 |
| Figura 7. Visão esquemática do copo do viscosímetro preenchido com o fluido de perfuração: (a) Teste tradicional (VST); (b) Teste com adição da sapata (VSST)..... | 9 |
| Figura 8. DHAST. Fonte: Halliburton..... | 11 |
| Figura 9. Esquema dos equipamentos usados no teste VSST. | 15 |
| Figura 10. Instrumental usado no teste VSST. (a) Fann Thermocup; (b) Fann 35A; (c) MI Sag Shoe; (d) Seringa Norm Ject e agulha de pipetagem..... | 15 |
| Figura 11. Queda da interface superior durante a sedimentação em batelada de uma suspensão. | 16 |
| Figura 12. Distribuição granulométrica da barita utilizada. | 17 |
| Figura 13. Visão global de simulações em CFD. Adaptado de Ansys (2009). | 18 |
| Figura 14. Esquema do sistema modelado. | 19 |
| Figura 15. Trecho da malha média, localizado próximo ao final da geometria. | 20 |
| Figura 16. Reologia do fluido A. | 27 |
| Figura 17. Reologia do Fluido B. | 28 |
| Figura 18. Resultados do teste VSST para o Fluido A..... | 29 |
| Figura 19. Resultados do teste VSST para o Fluido B. | 29 |
| Figura 20. Dados experimentais de altura da interface em função do tempo para $c = 6,7\%$ | 30 |
| Figura 21. Dados experimentais de altura da interface em função do tempo para $c = 12\%$ | 30 |
| Figura 22. Acúmulo de partículas na região inferior do sistema. Foto experimental adaptada de Nguyen (2009). | 31 |
| Figura 23. Perfil de concentração de sólidos para a simulação de 30 minutos de escoamento em $z = 5m$ | 32 |
| Figura 24. Vetores de velocidade numa região próxima a saída do tubo..... | 32 |
| Figura 25. Ampliação da região de saída do sistema. O retorno de fluido pode ser observado no canto superior direito. | 33 |
| Figura 26. Vetores de velocidade numa região próxima a saída do tubo para $Re=30000$ | 34 |
| Figura 27. Perfil de concentração de sólidos homogêneo para $Re=30000$ | 34 |
| Figura 28. Perfil de velocidade como uma função da altura (y) em diferentes posições (z).... | 36 |
| Figura 29. Perfil de velocidade como uma função de y . — solução analítica, ■ resultados numéricos. | 36 |
| Figura 30. Perfil de velocidade no escoamento líquido-sólido para os tempos de: (a) 0 s; (b) $1 \cdot 10^{-8}$ s; (c) $1 \cdot 10^{-7}$ s. | 38 |
| Figura 31. Esquema do sistema avaliado no terceiro estudo de caso. | 38 |
| Figura 32. Perfis de concentração em função da altura para $c_0 = 6,7\%$.(a) 0 s;(b) 190 s; (c) 2000 s..... | 40 |
| Figura 33. Altura da interface em função do tempo para $c_0 = 6,7\%$ | 40 |
| Figura 34. Altura da interface em função do tempo. Efeito do diâmetro de partícula. | 41 |
| Figura 35. Altura da interface em função do tempo. Efeito da viscosidade..... | 42 |
| Figura 36. Altura da interface em função do tempo. Efeito da concentração inicial. | 42 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1. Dez casos de campo com ocorrência de sedimentação de barita, suas consequências e tempo necessário para se remediar o problema. Adaptado de Omland <i>et al.</i> (2007). | 4 |
| Tabela 2. Propriedades físico-químicas dos fluidos usados no teste VSST. | 14 |
| Tabela 3. Condições operacionais usadas no teste VSST. | 16 |
| Tabela 4. Propriedades físicas e frações volumétricas das fases da mistura. | 19 |
| Tabela 5. Dados das malhas usadas nas simulações em CFD. | 20 |
| Tabela 6. Propriedades da fase granular. | 20 |
| Tabela 7. Resultados do teste VSST para o fluido A. | 28 |
| Tabela 8. Resultados do teste VSST para o fluido B. | 28 |
| Tabela 9. Dados usados nas simulações com pacotes de CFD. | 31 |
| Tabela 10. Parâmetros usados no primeiro estudo de caso. | 35 |
| Tabela 11. Parâmetros usados no segundo estudo de caso. | 37 |
| Tabela 12. Parâmetros usados no terceiro estudo de caso. | 39 |

LISTA DE ABREVIACOES E SÍMBOLOS

| | |
|----------------|--|
| A | rea ou Parâmetro da Equação 4; |
| A_I | Parâmetro da Equação 42; |
| API | <i>American Petroleum Institute</i> ; |
| B | Parâmetro da Equação 4; |
| <i>blowout</i> |  um tipo de acidente em que ocorre uma explosão no poço; |
| <i>bottom</i> | ndice usado para se referir ao fundo de um recipiente; |
| c | Concentrao volumétrica de sólidos; |
| C_D | Coefficiente de arraste; |
| CFD | Fluidodinâmica computacional, do inglês <i>computational fluid dynamics</i> ; |
| D | Altura; |
| DHAST | Teste dinâmico de alto ângulo, do inglês <i>dynamic high angle sag test</i> ; |
| d_s | Diâmetro das partículas sólidas; |
| f | Força por unidade de volume; |
| F_D | Força de arraste; |
| k | Parâmetro do S_R ; |
| L | Comprimento; |
| l | ndice usado para se referir à fase líquida; |
| MW | Peso da lama (densidade), do inglês <i>mud weight</i> ; |
| P | Pressão; |
| Re | Número de Reynolds |
| s | ndice usado para se referir à fase sólida; |
| SF | <i>Sag fator</i> , usado para medir a tendência a sedimentar no teste esttico; |
| S_R | <i>Sag register</i> , usado para medir a tendência a sedimentar nos testes VST e VSST; |
| t | Tempo; |
| <i>top</i> | ndice usado para se referir ao topo de um recipiente; |
| v | Velocidade; |
| VSST | Teste de viscosímetro e sapata, do inglês <i>viscometer sag shoe test</i> ; |
| VST | Teste de viscosímetro convencional, do inglês <i>viscometer sag test</i> ; |
| w | ndice usado para se referir às paredes; |
| X_{cm} | Mudança do centro de massa no teste DHAST; |
| y | Coordenada espacial; |
| z | Coordenada espacial; |

Letras gregas

| | |
|-------------|----------------------------------|
| ΔMW | Varição de densidade; |
| ΔP | Gradiente de pressão; |
| θ | ngulo de inclinação do sistema; |
| μ | Viscosidade; |
| ρ | Densidade; |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA | 2 |
| 2.1. Fluidos de Perfuração | 2 |
| 2.2. Sedimentação de Adensantes | 3 |
| 2.3. Fatores que Influenciam a Sedimentação de Adensantes..... | 4 |
| 2.3.1. Reologia dos fluidos de perfuração | 4 |
| 2.3.2. Morfologia das partículas | 5 |
| 2.3.3. Velocidade de rotação da coluna | 6 |
| 2.3.4. Velocidade de escoamento | 6 |
| 2.3.5. Inclinação do poço..... | 7 |
| 2.4. Técnicas de Determinação da Sedimentação de Adensantes | 8 |
| 2.4.1. <i>Loop</i> de escoamento | 8 |
| 2.4.2. Teste estático | 9 |
| 2.4.3. VST e VSST | 9 |
| 2.4.4. DHAAT | 10 |
| 2.4.5. Outras técnicas..... | 11 |
| 2.5. Modelagem Matemática da Sedimentação | 11 |
| 2.5.1. Teoria cinemática | 12 |
| 2.5.2. Mecânica do contínuo..... | 12 |
| 2.5.3. Uso dos Pacotes comerciais de CFD em Problemas Multifásicos | 12 |
| 2.5.4. Uso de técnicas de elementos discretos..... | 13 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS..... | 14 |
| 3.1. Testes Experimentais..... | 14 |
| 3.1.1. Teste VSST..... | 14 |
| 3.1.2. Testes de proveta | 16 |
| 4. MODELAGEM MATEMÁTICA | 18 |
| 4.1. Uso de Pacotes CFD | 18 |
| 4.1.1. Criação de malhas..... | 19 |
| 4.1.2. Definições do solver | 20 |
| 4.1.3. Solução e análise de resultados | 21 |
| 4.2. Modelo Baseado nas Equações de Conservação | 21 |
| 4.2.1. Equacionamento | 21 |
| 4.2. Metodologia de solução..... | 26 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 27 |
| 5.1. Teste VSST..... | 27 |
| 5.2. Testes de Proveta..... | 29 |
| 5.3. Pacotes CFD | 31 |
| 5.4. Modelos Baseados nas Equações de Conservação..... | 34 |

| | |
|--|----|
| 5.4.1. Primeiro estudo de caso: escoamento de fluido..... | 35 |
| 5.4.2. Segundo estudo de caso: transporte hidráulico..... | 37 |
| 5.4.3. Terceiro estudo de caso: sedimentação em batelada | 38 |
| 5.4.4. Quarto estudo de caso: sensibilidade paramétrica..... | 41 |
| 6. CONCLUSÕES | 43 |
| 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 44 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 45 |
| ANEXOS | 48 |

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

A barita (BaSO_4) é o material mais usado na indústria do petróleo para aumentar a densidade dos fluidos de perfuração. Dependendo das propriedades desses fluidos e das condições operacionais usadas, pode ocorrer a sedimentação do material adensante. A sedimentação de partículas de barita, ou de qualquer outro adensante, causa flutuações indesejáveis na densidade dos fluidos de perfuração.

A sedimentação de barita é reconhecida como um dos maiores desafios na indústria do petróleo (ZAMORA & BELL, 2004; OMLAND, 2009), pois problemas como emperramento da broca, dificuldade de controle da pressão e perda de fluido são relacionados à sua ocorrência (NGUYEN *et al.*, 2009).

Embora existam testes para avaliar a tendência de um fluido a sofrer sedimentação de barita, não existem soluções satisfatórias e ainda é difícil prever o fenômeno (ZAMORA & BELL, 2004; NGUYEN *et al.*, 2009; OMLAND, 2009).

Neste contexto, no presente trabalho, objetivou-se avaliar técnicas capazes de prever e quantificar a sedimentação de materiais adensantes durante o escoamento de fluidos de perfuração. O trabalho divide-se em duas partes, uma experimental e a outra de modelagem/simulação.

Na parte experimental o teste API de viscosímetro e sapata (VSST) foi usado para avaliar dois fluidos de perfuração reais, cedidos pela Petrobras S/A. Também foram conduzidos testes de sedimentação em proveta para estimar alguns parâmetros da sedimentação e avaliar os modelos estudados.

Na modelagem matemática do fenômeno foram abordadas duas alternativas: o uso de pacotes comerciais de CFD e o estudo de modelos baseados nas equações de conservação de massa e momento. O pacote FLUENT[®] 12.0.1 foi usado para realizar simulações bidimensionais transientes do escoamento de fluidos de perfuração.

O modelo baseado nas equações de conservação é composto por um sistema de equações diferenciais parciais, que descrevem o escoamento bidimensional de uma mistura bifásica. Este modelo foi resolvido por um código computacional desenvolvido em MATLAB[®]. O modelo foi avaliado em quatro estudos de casos, cujos resultados foram comparados a soluções analíticas, observações relatadas na literatura e dados experimentais.

Nesta dissertação de mestrado, uma revisão de literatura sobre o assunto estudado é apresentada no Capítulo II. Os materiais e métodos utilizados na realização deste trabalho são apresentados no Capítulo III. No Capítulo IV, o modelo matemático estudado é apresentado. No Capítulo V há uma discussão dos resultados obtidos. No Capítulo VI são apresentadas as conclusões deste trabalho. Por fim, no Capítulo VII, são apresentadas sugestões para a continuidade deste trabalho. Ao final do texto são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas. No Anexo A são apresentados as rotinas usadas para simular um estudo de caso; no Anexo B, parte da ISO 10414-2 (2009) é disponibilizada.

CAPÍTULO II

2. REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo serão apresentados os principais trabalhos sobre a sedimentação de materiais adensantes. Além disso, será apresentada uma breve introdução sobre fluidos de perfuração.

2.1. Fluidos de Perfuração

Na perfuração de poços de petróleo, fluidos são circulados para limpar o poço, exercer pressão hidrostática, estabilizar as paredes da formação e para resfriar e lubrificar a broca e a coluna de perfuração (BOURGOYNE *et al.*, 1991). Estes fluidos são injetados no poço pelo interior da coluna de perfuração e retornam à superfície pela região anular, formada pelas paredes do poço e a coluna de perfuração (Figura 1).

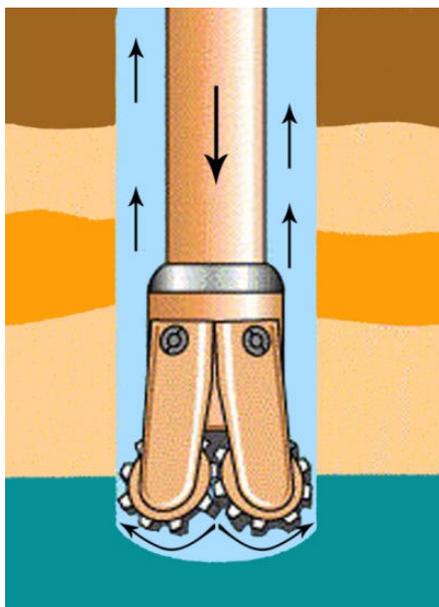


Figura 1. Esquema do escoamento de fluidos de perfuração.

Os fluidos de perfuração devem ser projetados de forma a garantir uma perfuração rápida e segura (THOMAS, 2001). Para tanto, os fluidos de perfuração precisam de propriedades físico-químicas adequadas à operação em que estão sendo usados.

Uma das preocupações na operação de perfuração é o controle da pressão de fundo, que é diretamente afetada pela densidade do fluido de perfuração. Pressões elevadas podem danificar a formação rochosa e fraturá-la, enquanto pressões baixas podem permitir o influxo de fluidos da formação para dentro do poço e causar acidentes como o *blowout* (OMLAND, 2009).

A densidade do fluido de perfuração deve ser projetada de maneira que a pressão de fundo seja superior à pressão nos poros da formação (limite mínimo) e inferior à pressão de fratura (limite máximo), conforme ilustrado na Figura 2.

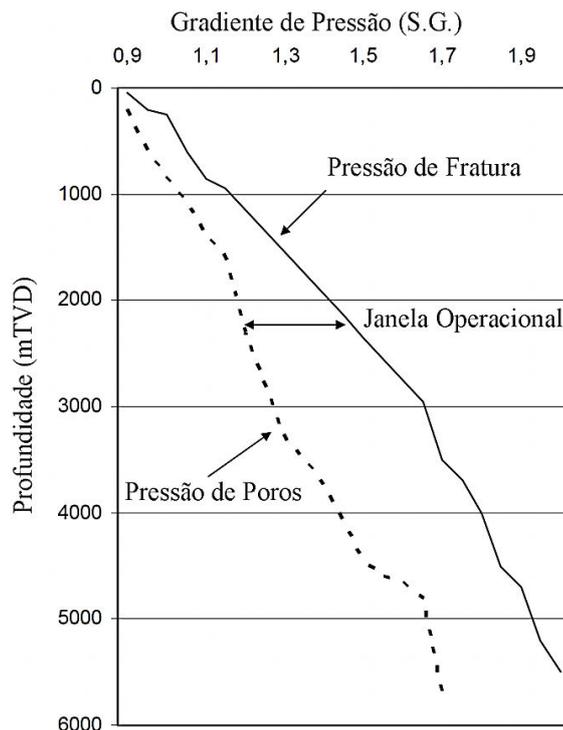


Figura 2. Representação de uma janela operacional de pressão. Adaptada de Omland (2009).

Para aumentar a densidade de um fluido de perfuração, adiciona-se barita (BaSO_4) ou outro sólido insolúvel de alta densidade. Para reduzir a densidade, o fluido-base é utilizado para diluir o fluido de perfuração (THOMAS, 2001).

Se o fluido de perfuração não desempenhar adequadamente suas funções, dificuldades operacionais e acidentes ocorrerão e, em casos extremos, pode ser necessário abandonar o poço (BOURGOYNE *et al.*, 1991).

2.2. Sedimentação de Adensantes

A sedimentação é o processo de separação sólido-líquido no qual uma suspensão é deixada em repouso (sedimentação em batelada) ou alimentada continuamente num recipiente (sedimentação contínua). Partículas mais pesadas que o fluido tendem a se depositar no fundo do recipiente devido à ação da gravidade (MCCABE *et al.*, 1993; PERRY & GREEN, 1999).

De acordo com Perry & Green (1999), as operações envolvendo a sedimentação são usadas para remover sólidos de um líquido (clarificação) ou para aumentar a concentração de sólidos em uma corrente (espessamento). Segundo Goula *et al.* (2008), a sedimentação é o processo de separação mais antigo utilizado no tratamento de água.

Apesar de suas aplicações, quando indesejada, a sedimentação traz desafios em diversos ramos da indústria, desde a produção de alimentos até a geração de energia nuclear (OMLAND, 2009). Na indústria do petróleo a sedimentação do material adensante não é desejável, pois a variação de densidade ao longo de um poço acarreta diversas complicações no controle da operação de perfuração (ZAMORA & JEFFERSON, 1994).

A sedimentação de barita é reconhecida como um dos maiores desafios na indústria do petróleo (ZAMORA & BELL, 2004; OMLAND, 2009), onde o fenômeno está relacionado a uma série de problemas nas operações de perfuração e completção. Na Tabela 1, é apresentada uma seleção de dez operações no Mar do Norte (Noruega), onde ocorreram incidentes relacionados à sedimentação de barita.

Tabela 1. Dez casos de campo com ocorrência de sedimentação de barita, suas consequências e tempo necessário para se remediar o problema. Adaptado de Omland *et al.* (2007).

| Tipo de Operação | Fluido | ρ (kg/m³) | $\Delta\rho$ (kg/m³) | Consequências | Horas não produtivas |
|--------------------------|---------------|---|---|--------------------------------------|-----------------------------|
| Perfuração de reentrada | base óleo | 1640 | -330 | Nenhuma | 5,0 |
| Perfuração | base óleo | 1610 | -200 | Colapso do poço | 240,0 |
| Perfuração | base óleo | 1580 | -080 | Instabilidades (<i>Cavings</i>) | 20,0 |
| Perfuração | base óleo | 1580 | -100 | Tempo excessivo de circulação | 29,0 |
| Colocação do Liner de 7" | base óleo | 1580 | -110 | Instabilidades | 377,5 |
| Colocação do Liner de 7" | base óleo | 1600 | -080 | Perdas durante a cimentação | 7,5 |
| Colocação do Liner de 7" | base óleo | 1670 | -070 | Instabilidades (re-perfuração) | 4,5 |
| Colocação do Liner de 9" | base óleo | 1700 | 320 | Instabilidades (re-perfuração) | 7,0 |
| Colocação do Liner de 9" | base óleo | 1700 | -060 | Tempo excessivo de circulação | 22,0 |
| Colocação do Liner de 9" | base óleo | 1700 | -090 | Perdas durante a cimentação | 18,0 |

Nas próximas seções serão apresentados os fatores que influenciam a sedimentação de barita, as principais técnicas de determinação do fenômeno e os principais trabalhos sobre a modelagem da sedimentação.

2.3. Fatores que Influenciam a Sedimentação de Adensantes

A sedimentação durante a operação de perfuração é afetada por diversos parâmetros, de condições operacionais a propriedades físico-químicas do fluido de perfuração.

Propriedades reológicas do fluido (TEHRANI *et al.*, 2004), a morfologia e a concentração das partículas sólidas (OMLAND *et al.*, 2005) são exemplos de propriedades do fluidos que afetam sua tendência sofrer sedimentação de adensantes.

Por sua vez, velocidade de rotação da coluna de perfuração (HEMPHIL & RAVI, 2006), velocidade de escoamento do fluido (NGUYEN, 2009) e inclinação do poço (SKALLE *et al.*, 1999) são condições operacionais influenciam na decantação.

2.3.1. Reologia dos fluidos de perfuração

Observações experimentais mostraram que a sedimentação ocorre com mais intensidade a baixas taxas de cisalhamento, ou seja, a baixas velocidades de escoamento e a baixas velocidades de rotação da broca (HEMPHIL & RAVI, 2006).

A maioria das medidas tomadas para se prevenir ou diminuir a sedimentação de barita são baseadas nos testes realizados em viscosímetros de campo, como, por exemplo, o

Fann 35A. Tais viscosímetros não têm a capacidade de definir com precisão as características reológicas a baixas taxas de cisalhamento e as regiões de viscoelasticidade linear dos fluidos de perfuração. Segundo Tehani *et al.* (2004), esse pode ser o motivo da maioria das medidas tomadas serem insuficientes no combate a sedimentação de barita.

Em seu trabalho, Tehani *et al.* (2004), estudaram a relação entre a reologia dos fluidos de perfuração e a sedimentação dinâmica. Os autores apresentaram dados de cisalhamento na região de viscoelasticidade linear para vários fluidos, formulados com diferentes de viscosificantes. Os dados de sedimentação apresentaram boas correlações com as propriedades viscoelásticas dos fluidos de perfuração.

Nguyen (2009) afirma que muito já foi feito, mas os parâmetros reológicos ideais para os fluidos de perfuração ainda não foram descobertos.

2.3.2. Morfologia das partículas

As equações desenvolvidas por Stokes descrevem a sedimentação de uma partícula esférica isolada em um fluido Newtoniano. Se a morfologia da partícula muda, ou se a partícula é influenciada por outras partículas em suspensão, a velocidade de sedimentação muda significativamente (OMLAND *et al.*, 2005).

Devido a altas concentrações de sólidos nos fluidos de perfuração, o equacionamento de Stokes não pode ser utilizado. Aproximações que levem em conta os efeitos de concentração e forma devem ser utilizadas (OMLAND *et al.*, 2005).

A força de arraste (Equação 1), que representa a força que o fluido exerce sobre a partícula, é influenciada pela área projetada da partícula, no caso de formas assimétricas a orientação também é levada em conta, como é mostrado na Figura 3. Apesar de não ser uma função só do formato, o coeficiente de arraste (C_D) é uma alternativa para descrever os efeitos de forma na equação da força de arraste (Omland, 2009).

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_f v_t^2 A, \quad (1)$$

onde: F_D é a força de arraste; C_D é o coeficiente de arraste; ρ_f é a densidade do fluido; v_t é a velocidade terminal de Stokes e A é uma área característica.

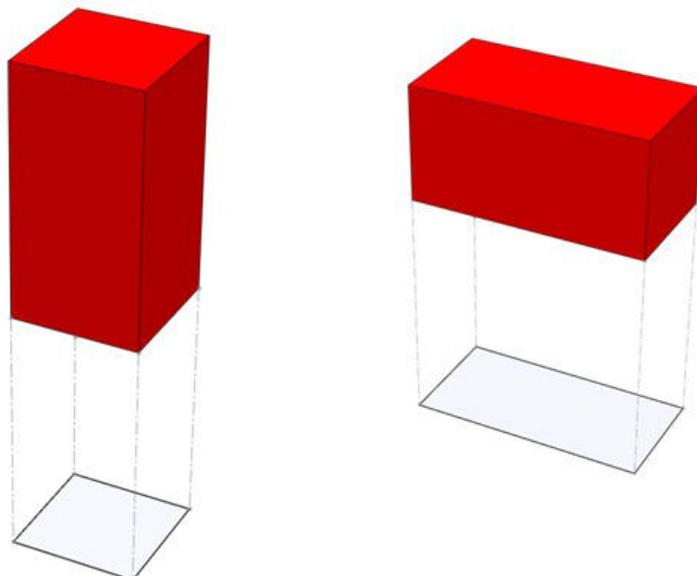


Figura 3. Dois corpos de igual massa e volume, mas com diferentes áreas projetadas.

Felice & Pagliai (2003 & 2007) apud Omland (2009), descreveram a sedimentação de esferas na presença de outras esferas, o trabalho desenvolvido por estes autores é baseado e confirma as observações de Batchelor (1972). Richardson & Zaki (1954) apud Omland (2009) desenvolveram um modelo para sedimentação de esferas em uma suspensão de outras esferas, o modelo descreve uma relação linear entre a velocidade de sedimentação e a fração volumétrica.

2.3.3. Velocidade de rotação da coluna

Um dos mecanismos que mais influenciam a sedimentação de barita é a rotação da coluna de perfuração. Frequentemente, no campo, durante o tempo em que a perfuração para, os operadores circulam lentamente o fluido de perfuração e continuam a rotação da coluna, para evitar que a broca seja pressionada contra a parede do poço (*Differential Sticking*). Segundo Hemphill & Ravi (2006), essa é uma das principais causas da sedimentação dinâmica.

Nguyen *et al.* (2011) estudaram a influência da velocidade de rotação em diversos ângulos de inclinação, Omland (2009) estudou o efeito da rotação da coluna na posição vertical.

Omland (2009) comparou a sedimentação com a coluna parada e com as velocidades de rotação de 9,5 e 13 RPM. O autor observou que a sedimentação aumentou com o aumento da velocidade. Nguyen *et al.* (2011) estudaram o efeito da velocidade de rotação da coluna, variando a velocidade de 0 a 100 RPM. Os autores concluíram que a velocidade de rotação diminui a força gel, mas se for suficientemente alta ajuda o fenômeno nomeado “*bed pickup*”. Tal fenômeno é a ressuspensão das partículas depositadas.

2.3.4. Velocidade de escoamento

Segundo Nguyen (2009), que testou velocidade anulares entre 0,042 e 0,664 m/s, o aumento de velocidade diminui a sedimentação de barita em poços horizontais ou inclinados. O aumento da velocidade aumentaria o efeito de ressuspensão das partículas depositadas, diminuindo-se assim a diferença de densidade.

Nguyen (2009) observou experimentalmente três estágios dinâmicos durante o escoamento em uma mesma vazão. De acordo com o autor, com a formação do leito de partículas a área efetiva de escoamento diminui e, conseqüentemente, a velocidade aumenta. Com o aumento da velocidade, o leito de partículas é ressuspensão, a área de escoamento aumenta e a velocidade diminui.

Na Figura 4 é apresentado um caso em que os três estágios ocorrem. O autor apresenta dados de acúmulo de massa em sua sessão de testes versus tempo. As regiões I, II e III representam os três estágios dinâmicos. Segundo Nguyen, na região I predomina o fenômeno de sedimentação, na região III predomina a ressuspensão de leito e na região II existe um equilíbrio entre os dois fenômenos.

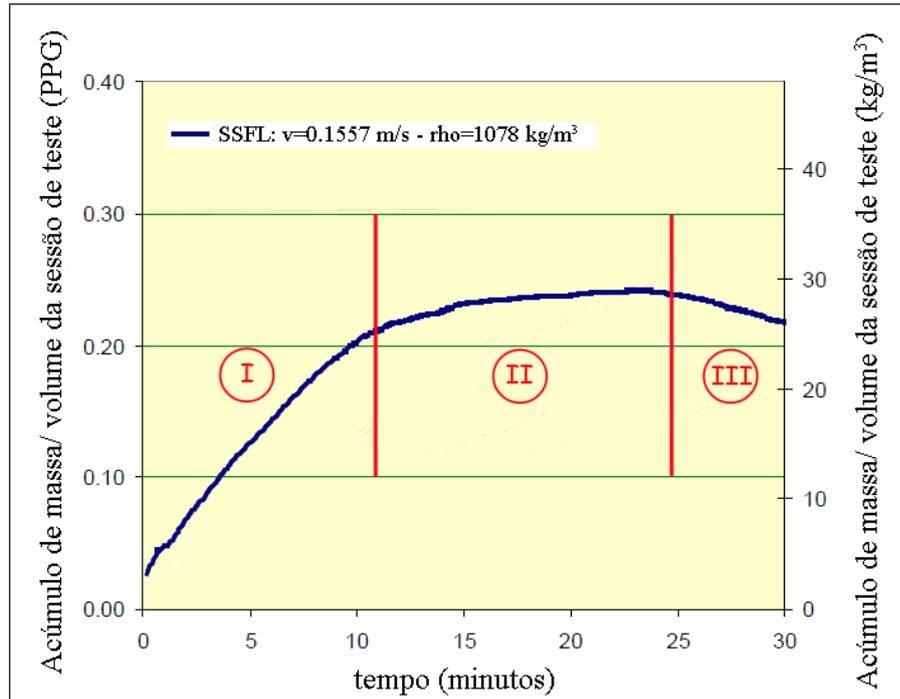


Figura 4. Ocorrência de três estágios dinâmicos durante o escoamento em uma mesma vazão. Adaptado de Nguyen (2009).

2.3.5. Inclinação do poço

O efeito Boycott (BOYCOTT, 1920) é citado pela maioria dos pesquisadores que investigaram o fenômeno de sedimentação de barita (ZAMORA & JEFFERSON, 1994; SKALLE *et al.*, 1999; PASLAY *et al.*, 2007).

Na Figura 5, é apresentada uma visão esquemática do fenômeno em um poço inclinado. Como se pode observar, há o surgimento de uma zona clarificada acima da suspensão e o surgimento de um leito de partículas no fundo do poço. Segundo Omland (2009), o surgimento de um perfil de densidade cria um diferencial de pressão hidrostática, que acelera a taxa de sedimentação.

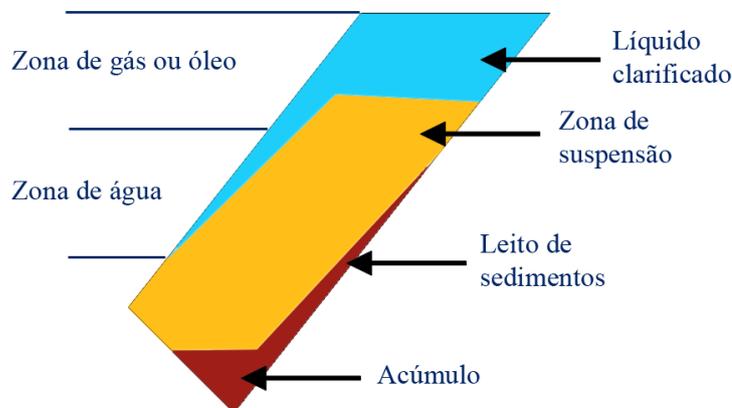


Figura 5. Representação do efeito Boycott. Adaptado de Zamora & Jefferson (1994).

Nguyen (2009) descreve o balanço de forças numa partícula sedimentando em um poço inclinado. Segundo o autor, o aumento do ângulo de inclinação com a vertical aumenta a sedimentação até certo ponto devido ao aumento do efeito Boycott. Porém a partir de determinado ângulo, as partículas começam a se mover na mesma direção do fluido e o efeito de “*bed pickup*” diminui a sedimentação de barita.

Segundo Skalle *et al.* (1999), existe um ângulo crítico para a sedimentação de barita. Este ângulo é função da natureza do fluido, do tamanho e da forma das partículas de material adensante.

2.4. Técnicas de Determinação da Sedimentação de Adensantes

Existem diversas técnicas para prever e quantificar a sedimentação de barita em fluidos de perfuração. A seguir as principais são listadas.

2.4.1. Loop de escoamento

O *loop* de escoamento é considerado o teste mais significativo para obtenção de dados sobre sedimentação de fluidos de perfuração (OMLAND, 2009). Os fluidos são circulados em um circuito (*loop*) que pode se aproximar das condições de escoamento em campo.

Os *loops* de escoamento são constituídos de uma linha de testes, densímetros, manômetros, bombas e um reservatório de fluidos. A linha de testes pode ser composta por tubos retos ou sessões anulares. Na Figura 6, uma visão esquemática de um *loop* é apresentada.

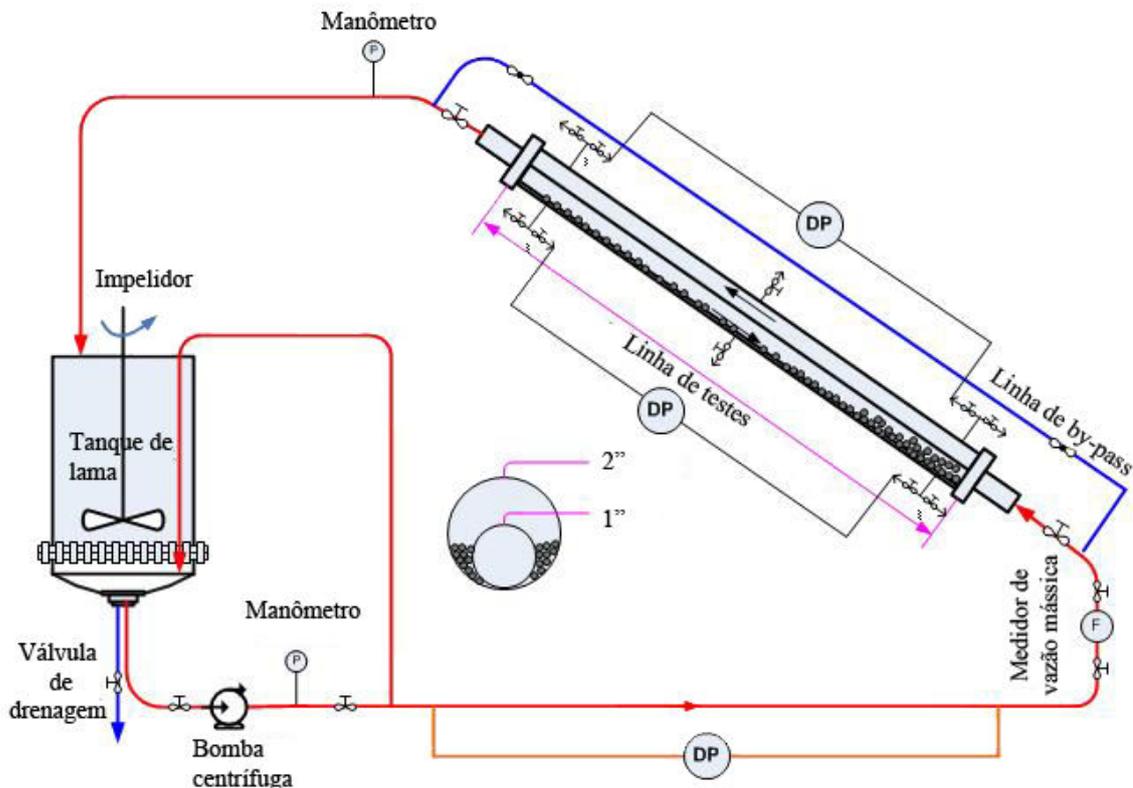


Figura 6. Loop utilizado para se determinar efeitos de excentricidade do anular e rotação da coluna. Adaptada de Nguyen (2009).

Apesar de ter os dados mais confiáveis, os *loops* necessitam de instrumentação sofisticada, uma quantidade grande de fluido de perfuração e espaço. Tais requerimentos por muitas vezes os tornam inadequados.

2.4.2. Teste estático

No teste estático, células de aço são usadas para medir a tendência de um fluido a sedimentar. Uma temperatura é designada e o fluido é deixado na célula por um período de tempo. A tendência a sedimentar é medida pelo *sag factor* (Equação 2). Valores de SF entre 0,5 e 0,52 são encontrados para fluidos sem tendências de sedimentação. Valores de SF acima de 0,52 equivalem a um fluido com tendências de causar problemas operacionais.

$$SF = \left(\frac{MW_{bottom}}{MW_{bottom} + MW_{top}} \right), \quad (2)$$

sendo: *SF* é o “*sag factor*”; MW_{bottom} é a densidade do fluido no fundo da célula e MW_{top} é a densidade do fluido no topo da célula.

O teste não é bem aceito pela indústria do petróleo, pois não apresenta resultados condizentes com os dados de campo (OMLAND, 2009).

2.4.3. VST e VSST

O teste usando viscosímetros rotacionais, tais como o FANN 35A, surgiu como uma proposta de baixo custo capaz de reproduzir as condições dinâmicas. Os viscosímetros são usados nos testes como uma fonte de cisalhamento. Assim como teste estático, o teste tradicional usando o viscosímetro não apresenta resultados satisfatórios (ZAMORA e BELL, 2004).

Com o objetivo de melhorar os resultados do VST, Zamora e Bell (2004) propuseram adição de uma sapata (*sag shoe*) no fundo do copo do viscosímetro (Figura 7). Esta é uma proposta de baixo custo capaz de melhorar significativamente os resultados do teste.

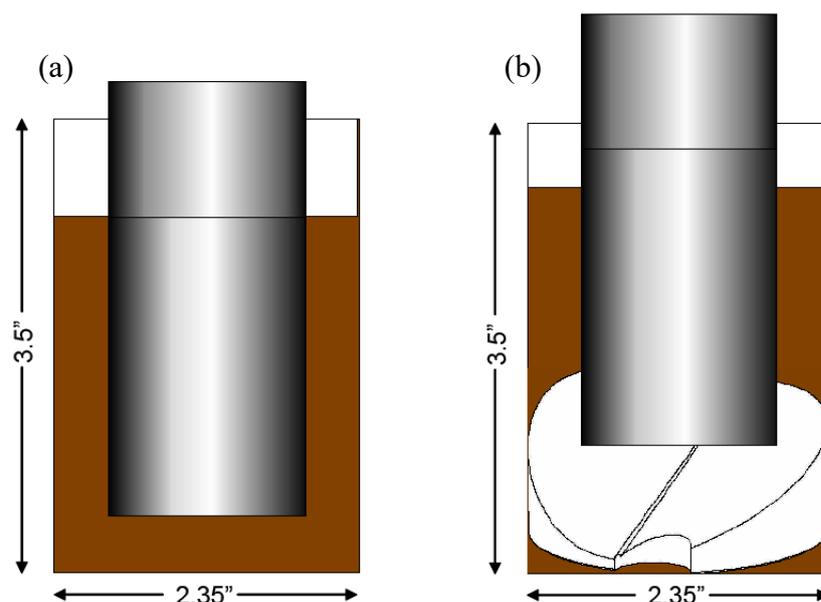


Figura 7. Visão esquemática do copo do viscosímetro preenchido com o fluido de perfuração: (a) Teste tradicional (VST); (b) Teste com adição da sapata (VSST).

A sapata é dotada de duas faces inclinadas separadas por um vão e um poço para coleta de amostras. A superfície complexa facilita a decantação e ajuda a concentrar o material adensante em uma única região de coleta (ZAMORA e BELL, 2004).

Os autores testaram diversos fluidos no VSST e em *loops* de escoamento. E propuseram uma equação para relacionar os dados do teste de bancada com o teste em larga escala. Para fazer uma projeção da variação de densidade em *loop*, utiliza-se a Equação 3.

$$S_R = \exp\left(-k \frac{\Delta MW}{MW}\right), \quad (3)$$

sendo S_R o *sag register* (variável criada para correlacionar o teste com um loop), k o parâmetro do equacionamento, MW a densidade inicial do fluido, ΔMW a variação de densidade.

Calcula-se o valor de S_R com a variação de densidade do teste VSST, usando o parâmetro $k=10$. Com o valor de S_R , obtido no teste de bancada, calcula-se a variação de densidade de campo usando o parâmetro $k=50$.

2.4.4. DHAST

O teste dinâmico de alto ângulo (DHAST) é o teste de pequena escala mais preciso (JAMISON & CLEMENTS, 1990 apud OMLAND, 2009). Bell & Murphy (2006) demonstraram que o DHAST é capaz de detectar a sedimentação em casos em que os testes tradicionais não detectam o fenômeno.

O princípio de detecção do equipamento é a mudança do centro de massa do sistema devido à sedimentação do material adensante. Com a mudança de ângulo calcula-se o *sag coefficient* (SC), Equações 4 e 5. Um valor igual a 0 significa ausência de sedimentação, valores maiores que 0 implicam em sedimentação. O equipamento é mostrado na Figura 8.

$$X_{cm}(t) = \left(\frac{A t}{B + t}\right), \quad (4)$$

$$SC = \int_{t=0}^{t=\tau} X_{cm}(t) dt, \quad (5)$$

onde: X_{cm} é mudança do centro de massa; A é a mudança máxima do centro de massas; B é o tempo necessário para se atingir um valor de $A/2$; t é o tempo; τ é o tempo de duração do experimento.



Figura 8. DHAST. Fonte: Halliburton

O DHAST não é comercializado como um equipamento, mas como um serviço pela Baroid/Halliburton. O cliente pode enviar amostras de fluidos para serem testados ou desenvolver seus fluidos em parceria com a empresa.

2.4.5. Outras técnicas

Outras técnicas como ressonância magnética nuclear (RISMANTO & VAN DER ZWAAG, 2007 apud OMLAND, 2009), ultra-som (FORT *et al.*, 1993 apud OMLAND, 2009), técnica de pesagem direta (OMLAND, 2009), são citadas como alternativas de quantificar e avaliar a sedimentação de barita em fluidos de perfuração.

2.5. Modelagem Matemática da Sedimentação

O fenômeno de sedimentação de material adensante ainda não é completamente entendido, pois ele é afetado por muitos parâmetros e a interação dos mesmos é difícil de ser quantificada (NGUYEN, 2009). Não existem modelos preditivos com custo computacional baixo e desvios aceitáveis.

Apesar do fenômeno não ser completamente entendido e sua modelagem ser difícil, os recentes avanços no campo da modelagem fluidodinâmica tem esclarecido os mecanismos da sedimentação de barita (HEMPHILL & RAVI, 2006).

A seguir são apresentados os trabalhos mais relevantes no estudo do escoamento de suspensões e sedimentação, divididos de acordo com a abordagem utilizada.

2.5.1. Teoria cinemática

Kynch (1951) propôs uma teoria cinemática para descrever a sedimentação de partículas sólidas em um meio líquido. Sua teoria assume que a velocidade de sedimentação das partículas é função apenas da concentração local de partículas. Em sua metodologia a relação entre a velocidade de sedimentação e a concentração local é determinada através da observação da queda da interface superior da suspensão estudada.

A teoria de Kynch descreve bem a sedimentação de partículas que formam sedimentos incompressíveis, tais como esferas de vidro e partículas de minerais não floculantes (AROUCA, 2007). De acordo com Arouca (2007), essa teoria não descreve bem a formação de sedimentos compressíveis, pois a acomodação das partículas envolve a presença de forças que não são levadas em consideração no modelo matemático.

2.5.2. Mecânica do contínuo

Nunziato (1983) apud Nguyen (2009) usou a aproximação da mecânica do contínuo (Euleriana) para modelar o problema multifásico. Tal aproximação considera que as fases se comportam como se estivessem sozinhas, exceto quando trocam energia e momento entre si.

Paslay *et al.* (2007) estudaram o efeito Boycott em um anular inclinado para um fluido do tipo Bingham. Os autores modelaram o anular como uma abertura retangular formado por placas fixas de extensão infinita inclinada em um ângulo α , em relação ao plano horizontal. As previsões do modelo proposto por Paslay *et al.* (2007) não estão de acordo com os dados de campo. Os autores sugerem que os desvios podem ter sido causados pelas simplificações feitas na geometria do modelo para que este tivesse solução analítica.

Nguyen (2009) propôs um modelo baseado na mecânica do contínuo para a sedimentação de barita em fluidos à base de óleo. Os balanços de massa e momento resultaram num sistema de equações diferenciais parciais, que foram discretizadas e resolvidas de forma explícita através da técnica de diferenças finitas.

O modelo proposto por Nguyen (2009) prediz bem os primeiros minutos de processo (crescimento do leito), porém, quando o leito começa a ser ressuspensionado, os desvios do modelo são superiores a 100%.

2.5.3. Uso dos Pacotes comerciais de CFD em Problemas Multifásicos

A fluidodinâmica computacional (CFD) tem sido usada nas últimas décadas no desenvolvimento de novos equipamentos, na otimização de equipamentos já existentes, na análise de problemas de difícil reprodução experimental, etc. A proposta de não se construir uma unidade em escala piloto é o maior apelo dos pacotes de CFD, pois dessa forma economiza-se tempo e dinheiro (GOULA *et al.*, 2008).

Zamora & Bell (2004) utilizaram o pacote FLUENT 6.3.16 no projeto de um teste dinâmico. Os autores realizaram simulações para com fluidos do tipo Herschel-Bulkley e os resultados preliminares indicam a possibilidade de aplicar técnicas de CFD na modelagem da sedimentação de barita.

Lin & Ebdian (2007) usaram o pacote FLUENT 5 na modelagem do escoamento turbulento de suspensões de areia em água. Os resultados numéricos para os gradientes de pressão apresentaram em boa concordância com os dados experimentais. Dados de concentração volumétrica não foram comparados a resultados experimentais.

Goula *et al.* (2008) usaram o pacote FLUENT 6.2.12 para avaliar a adição de uma chicana na entrada de um tanque de sedimentação. Os dados simulados foram confrontados com dados da planta de tratamento de água da cidade de Tessalônica, Grécia. Em seu trabalho

o autor utilizou a metodologia Euler-Lagrange. Nessa metodologia, as partículas são tratadas com a metodologia Lagrangiana (discreta) e fluido é tratado com a metodologia Euleriana (contínua). As simulações apresentaram boa concordância com os dados simulados.

No pacote FLUENT, a metodologia Lagrangiana é recomendada para concentrações volumétricas menores que 10% (de CLERCQ & VANROLLEGHEM, 2002 apud GOULA *et al.*, 2008). Para casos com concentrações maiores que 10% a metodologia Euleriana deve ser adotada (ANSYS, 2009).

Nguyen (2009) usou o pacote FLUENT 6.3.16 para prever os perfis de velocidade e tensão de cisalhamento em um “*flow loop*” utilizado em seus experimentos. Os dados das simulações tiveram boa concordância com os dados experimentais, explicando de forma qualitativa o porquê do aumento da sedimentação com o aumento da excentricidade do anular.

2.5.4. Uso de técnicas de elementos discretos

O método dos elementos discretos (DEM) usa as equações do movimento de Newton para descrever o movimento de partículas individuais em um sistema. A princípio esse método era aplicado a partículas na ausência de fluidos, mas esforços têm sido feitos para aplicar este método para as misturas de fluidos e partículas (DONG *et al.*, 2009).

Dong *et al.* (2003 e 2009) estudaram a formação e crescimento da torta de partículas nos processos de sedimentação e filtração com a técnica de elementos discretos. As simulações apresentaram boa concordância com os dados experimentais.

Perrin & Hu (2006) descrevem um esquema de acoplamento entre CFD e DEM para simular escoamentos com elevada concentração de sólidos. Os autores apresentaram estudos de caso, inclusive de sedimentação. Apesar de seus bons resultados, simulações envolvendo a técnica dos elementos discretos são mais custosas computacionalmente, o que dificulta sua aplicação a sistemas em larga escala.

CAPÍTULO III

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho é dividido em duas partes, uma de modelagem matemática e a outra experimental. Na parte experimental, o teste API de viscosímetro e sapata (VSST) foi usado para avaliar dois fluidos de perfuração cedidos pela Petrobras S/A. Também foram conduzidos testes de sedimentação em batelada para avaliar os modelos estudados. Neste capítulo, a metodologia usada na etapa experimental deste trabalho será detalhada.

3.1. Testes Experimentais

3.1.1. Teste VSST

O teste VSST (ZAMORA & BELL, 2004) foi usado para avaliar dois fluidos de perfuração cedidos pela Petrobras S/A. Este teste se tornou um padrão API para avaliar fluidos de perfuração à base de óleo (ISO 10414-2, 2009). Apesar da ISO 10414-2 usar o teste apenas para fluidos à base de óleo, Zamora e Bell (2004) também usaram o teste para fluidos à base de água e fluidos sintéticos.

As características dos fluidos usados neste trabalho são apresentadas na Tabela 2. Detalhes adicionais sobre os fluidos serão apresentados no Capítulo V.

Tabela 2. Propriedades físico-químicas dos fluidos usados no teste VSST.

| | Fluido A | Fluido B |
|-------------------------|----------|-----------|
| Fluido base | óleo | água |
| Concentração de sólidos | 15%v/v | 15%v/v |
| Reologia | Bingham | Power-Law |

Os fluidos foram agitados em um misturador Hamilton Beach de 1,5 hp por 15 minutos antes do procedimento experimental. O procedimento padrão e os equipamentos sugeridos na ISO 10414-2 (2009) foram utilizados. Um esquema do equipamento usado é apresentado na Figura 9. As páginas 15-19 da ISO 10414-2 (2009) são apresentadas no Anexo B.

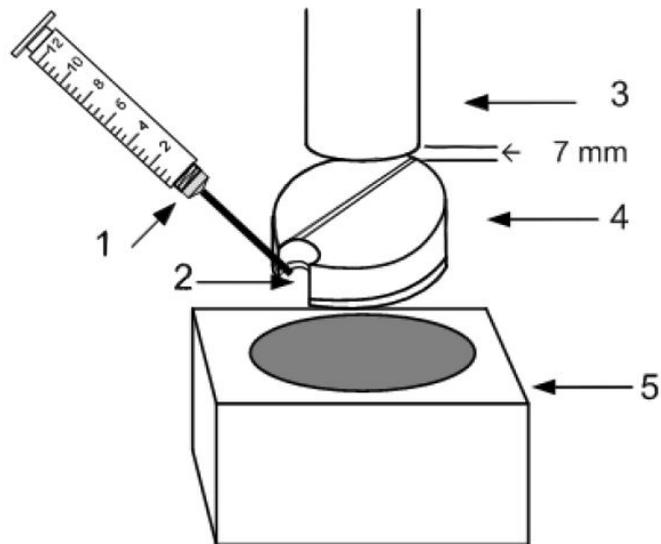


Figura 9. Esquema dos equipamentos usados no teste VSST.

Na Figura 9, os itens numerados são: 1. Seringa Norm Ject de bico Luer Lock; 2. Poço de coleta; 3. Rotor do Fann 35A; 4. Sapata, distando 7 mm do rotor; 5. Copo térmico Fann. O material utilizado é ilustrado na Figura 10.

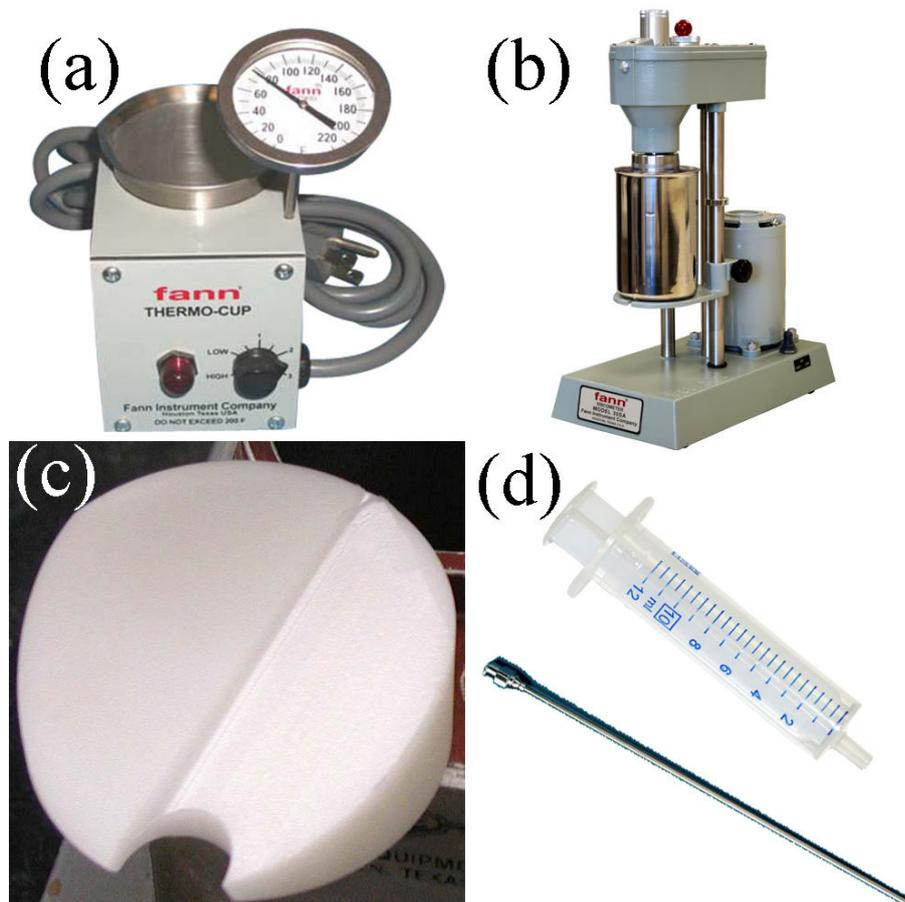


Figura 10. Instrumental usado no teste VSST. (a) Fann Thermocup; (b) Fann 35A; (c) MI Sag Shoe; (d) Seringa Norm Ject e agulha de pipetagem.

Os fluidos de perfuração foram cisalhados a baixas rotações para se induzir a sedimentação e depois foram cisalhados à alta rotação para se ressuspender o leito de partículas formado.

Amostras foram coletadas e a densidade foi medida por método gravimétrico. Na Tabela 3 são apresentadas as condições operacionais estipuladas na ISO 10414-2 (2009). Os testes foram realizados em triplicata e os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA).

Tabela 3. Condições operacionais usadas no teste VSST.

| Tempo de experimento (min) | Rotação (RPM) | Análise |
|-----------------------------------|----------------------|-----------------------|
| 0 | 0 | densidade inicial |
| 30 | 100 | sedimentação induzida |
| 60 | 600 | ressuspensão de leito |

3.1.2. Testes de proveta

O teste de proveta é um teste de sedimentação em batelada, no qual a queda da interface superior da suspensão é monitorada (Figura 11). Os testes de sedimentação em batelada foram usados para avaliar os resultados obtidos no terceiro estudo de caso, descrito na sessão 3.3.1.

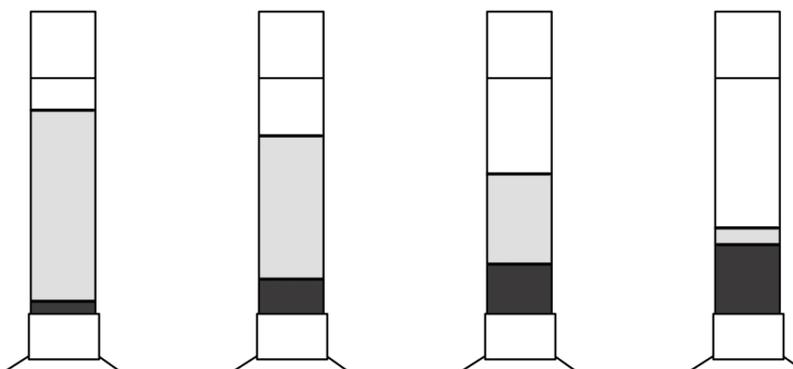


Figura 11. Queda da interface superior durante a sedimentação em batelada de uma suspensão.

A princípio, foram realizados testes com suspensões de barita em óleo, mas a cor da suspensão dificultou a visualização da interface. Para facilitar a visualização da interface, foram realizados testes de proveta com suspensões de barita em água. A granulometria da barita utilizada foi medida no analisador de partículas Malvern Mastersizer 2000. Uma curva típica de distribuição é apresentada na Figura 12.

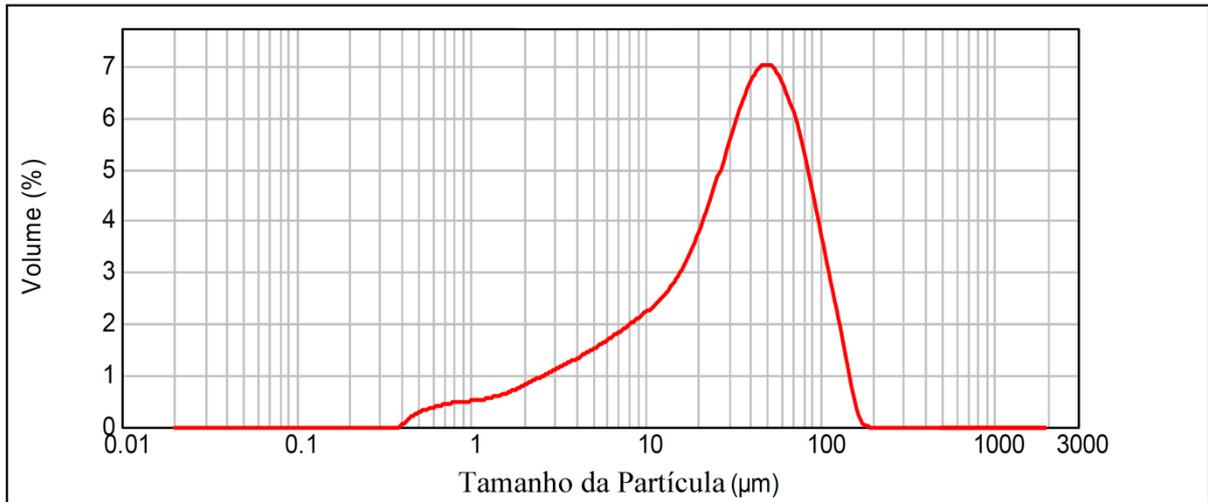


Figura 12. Distribuição granulométrica da barita utilizada.

Todos os testes foram realizados em triplicata e os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA).

CAPÍTULO IV

4. MODELAGEM MATEMÁTICA

Duas alternativas foram abordadas na modelagem matemática do problema: o uso de pacotes comerciais de CFD e o estudo de modelos baseados nas equações de conservação. O pacote FLUENT® 12 foi utilizado para nas simulações em CFD. Além do uso de pacotes CFD, um modelo baseado nas equações de conservação foi usado neste trabalho para simular o escoamento de fluidos de perfuração. Neste capítulo, a metodologia utilizada nas simulações será detalhada.

4.1. Uso de Pacotes CFD

Dinâmica de fluidos computacional (CFD) é a ciência de prever o escoamento de fluidos e partículas, a transferência de calor e massa, reações químicas e fenômenos correlatos. Para tanto, os pacotes computacionais de CFD resolvem numericamente o conjunto de equações matemáticas que regem tais fenômenos (ANSYS, 2009).

Usualmente, as simulações em CFD são divididas em etapas de pré-processamento, processamento e pós-processamento. As etapas de pré-processamento envolvem a construção de geometria e malhas, escolha de modelos físicos, etc. No processamento as equações de conservação são resolvidas numericamente pelo *solver* utilizado. Por fim, as etapas de pós-processamento envolvem a análise e avaliação dos resultados e, se necessário, revisões da geometria, malha e modelos usados. O detalhamento de cada etapa é apresentado na Figura 13.

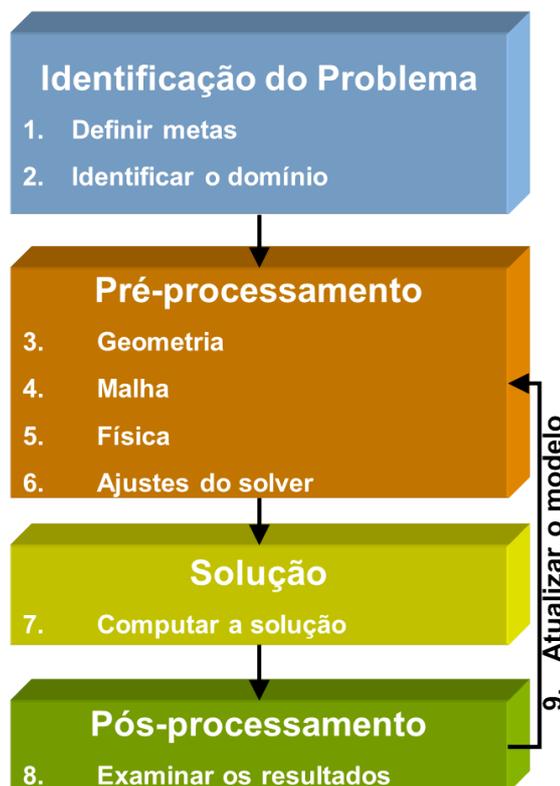


Figura 13. Visão global de simulações em CFD. Adaptado de Ansys (2009).

Neste trabalho os pacotes comerciais GAMBIT[®] 2.3.16, FLUENT[®] 12.0.1 e CFD-POST[®] 12.0.1 foram usados para simular o escoamento de fluidos de perfuração à base de óleo. O objetivo das simulações é detectar e quantificar a sedimentação de adensantes durante o escoamento.

Os fluidos de perfuração foram modelados como misturas bifásicas de óleo e barita. As propriedades físicas dos componentes da mistura são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Propriedades físicas e frações volumétricas das fases da mistura.

| Componente | Densidade (kg m^{-3}) | Viscosidade (cP) | Fração Volumétrica (% v/v) |
|------------|----------------------------------|------------------|----------------------------|
| Óleo | 850,60 | 62,00 | 93,30 |
| Barita | 4200,00 | — | 6,70 |

As simulações foram conduzidas em duas dimensões e a geometria usada nas simulações é ilustrada na Figura 14, onde L é o comprimento do sistema, D é a altura, θ é o ângulo de inclinação e g a aceleração da gravidade.

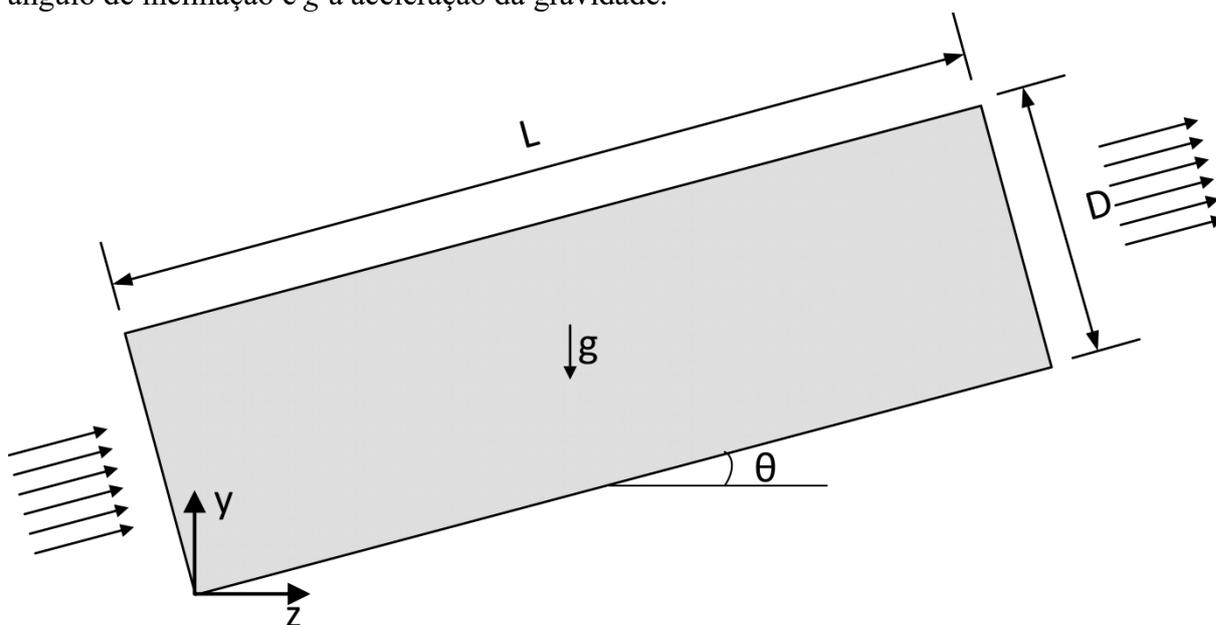


Figura 14. Esquema do sistema modelado.

4.1.1. Criação de malhas

A geometria e as malhas usadas neste trabalho foram construídas no software GAMBIT[®] 2.3.16, foram usadas malhas bidimensionais quadrilaterais. As malhas quadrilaterais foram escolhidas devido as seguintes vantagens sobre as malhas triangulares: 1. Uso de menos células para obter o mesmo resultado; 2. Melhor convergência; 3. Melhores predições (ANSYS, 2009).

Com o objetivo de melhorar os resultados das simulações, foram testados três níveis de refinamento de malha. O tamanho das malhas usadas neste trabalho é apresentado na Tabela 5. Um trecho da malha média é apresentado na Figura 15, a título de ilustração.

Tabela 5. Dados das malhas usadas nas simulações em CFD.

| Malha | Número de nós |
|--------|---------------|
| grossa | 24831 |
| média | 62310 |
| fina | 110004 |

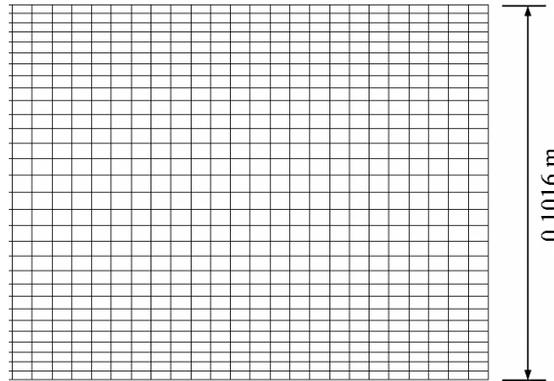


Figura 15. Trecho da malha média, localizado próximo ao final da geometria.

4.1.2. Definições do solver

O *solver* utilizado foi o FLUENT[®] 12.0.1, que é um pacote comercial baseado na técnica de volumes finitos. Foi usado o *solver* baseado na pressão (PBNS) e a formulação de velocidade absoluta. Para avaliar a dinâmica do escoamento, as simulações foram conduzidas no regime transiente.

A modelagem multifásica usada foi a Euleriana granular. As configurações utilizadas para a fase granular são apresentadas na Tabela 6:

Tabela 6. Propriedades da fase granular.

| Propriedade | Modelo usado |
|--------------------------------------|-------------------|
| diâmetro | constante |
| viscosidade granular | Syamlal & O'Brien |
| viscosidade granular (<i>bulk</i>) | Lun <i>et al.</i> |
| Viscosidade de atrito | — |
| temperatura granular | algébrico |
| pressão nos sólidos | Lun <i>et al.</i> |
| Distribuição radial | Lun <i>et al.</i> |
| Módulo de elasticidade | derivado |
| limite de empacotamento | constante |

Inicialmente as simulações foram realizadas sem o uso de modelos de turbulência. Entretanto, para melhorar os resultados obtidos nas primeiras simulações, o modelo de turbulência RNG k-ε foi usado com os valores padrão de seus parâmetros.

As seguintes condições de contorno foram usadas: as paredes foram modeladas com a opção *wall*, a entrada foi modelada como *velocity inlet* e a saída foi modelada como *pressure outlet*. Nas paredes foi considerada a condição de não deslizamento, na entrada foi fornecido o perfil de velocidade e de concentrações (ambos constantes) e a saída foi considerada uma abertura para a atmosfera.

O algoritmo de acoplamento pressão-velocidade usado foi o *phase coupled SIMPLE* e o esquema de discretização usado foi o QUICK. Os fatores de relaxação usados foram os padrões do software. As simulações foram realizadas com o critério de convergência absoluto de $1,00 \cdot 10^{-8}$ para todas as variáveis. Os passos de tempo utilizados nas simulações variaram de $1,00 \cdot 10^{-6}$ a 6,00 segundos.

4.2.3. Solução e análise de resultados

As simulações foram realizadas em um microcomputador do tipo *desktop*, em plataforma Microsoft Windows[®] 7. O computador era dotado de um processador Intel Core i7 920 e 12 gigabytes de memória RAM. Todas as simulações foram realizadas usando o solver de dupla precisão em paralelo, 4 partições foram usadas.

O pacote de pós-processamento CFD-POST[®] 12.0.1 foi usado na geração de gráficos e animações. Neste mesmo pacote, foram criados monitores de densidade usando os perfis de concentração, como demonstrado nas Equações 6 e 7.

$$\bar{\rho} = c\rho_s + (1-c)\rho_l, \quad (6)$$

$$\langle \bar{\rho} \rangle = \frac{1}{A} \iint_A \bar{\rho} dA. \quad (7)$$

4.2. Modelo Baseado nas Equações de Conservação

O modelo estudado usa a metodologia Euleriana, que consideram ambas as fases como contínuas e faz as seguintes considerações sobre o comportamento das fases:

1. Cada fase se comporta como um material simples escoando sozinho, exceto quando está interagindo com outras fases;
2. A equação de movimento para a mistura tem a mesma forma da equação para uma única fase e resulta da soma das equações de movimento de cada fase da mistura.

O equacionamento utilizado e a metodologia de solução são abordados nas próximas seções.

4.2.1. Equacionamento

A equação da continuidade para a fase sólida e para a fase líquida é dada pelas Equações 8 e 9, respectivamente:

$$\frac{\partial(c\rho_s)}{\partial t} + \nabla \cdot (c\rho_s \vec{v}_s) = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial[(1-c)\rho_l]}{\partial t} + \nabla \cdot [(1-c)\rho_l \vec{v}_l] = 0, \quad (9)$$

onde c é a concentração volumétrica da fase sólida, ρ é a densidade, \vec{v} é o vetor velocidade e os índices s e l se referem a fases sólida e líquida, respectivamente.

Com base na metodologia Euleriana, Shook & Rocco (1991) propuseram as seguintes equações do movimento para a fase sólida e líquida, respectivamente:

$$\frac{D(c\rho_s\vec{v}_s)}{Dt} = -\nabla(cP) + c\rho_s\vec{g} + c(\vec{f}_{sl} + \vec{f}_{ss} + \vec{f}_{sw}), \quad (10)$$

$$\frac{D[(1-c)\rho_l\vec{v}_l]}{Dt} = -\nabla[(1-c)P] + (1-c)\rho_l\vec{g} + (1-c)(\vec{f}_{ls} + \vec{f}_{ll} + \vec{f}_{lw}), \quad (11)$$

onde P é a pressão, \vec{g} é o vetor aceleração da gravidade, os termos \vec{f}_{ij} são a força de interação entre as fases i e j por unidade de volume e o índice w se refere à parede.

Assim como nas simulações em CFD, o sistema (Figura 14) foi modelado em duas dimensões e em condições transientes para se avaliar a dinâmica do fenômeno. As seguintes considerações foram feitas para simplificar o equacionamento:

1. Escoamento laminar e isotérmico;
2. O fluido base é newtoniano;
3. O perfil da pressão na direção axial é linear e constante (utilização da Equação de Bernoulli);
4. O perfil da pressão na direção y é a pressão hidrostática;
5. Os efeitos de parede são negligenciados (\vec{f}_{iw}).

Rescrevendo o sistema na forma escalar, expandindo as derivadas materiais e aplicando-se as considerações feitas, obtém-se:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(cv_{ly})}{\partial y} + \frac{\partial(cv_{lz})}{\partial z} = 0, \quad (12)$$

$$\frac{\partial(1-c)}{\partial t} + \frac{\partial[(1-c)v_{ly}]}{\partial y} + \frac{\partial[(1-c)v_{lz}]}{\partial z} = 0, \quad (13)$$

$$\rho_s \left(\frac{\partial(cv_{sy})}{\partial t} + v_{sy} \frac{\partial(cv_{sy})}{\partial y} + v_{sz} \frac{\partial(cv_{sy})}{\partial z} \right) = -\frac{\partial(cP)}{\partial y} - c\rho_s g \cos(\theta) + c(f_{sl}^y + f_{ss}^y), \quad (14)$$

$$\rho_s \left(\frac{\partial(cv_{sz})}{\partial t} + v_{sy} \frac{\partial(cv_{sz})}{\partial y} + v_{sz} \frac{\partial(cv_{sz})}{\partial z} \right) = -\frac{\partial(cP)}{\partial z} - c\rho_s g \sin(\theta) + c(f_{sl}^z + f_{ss}^z), \quad (15)$$

$$\rho_l \left(\frac{\partial[(1-c)v_{ly}]}{\partial t} + v_{ly} \frac{\partial[(1-c)v_{ly}]}{\partial y} + v_{lz} \frac{\partial[(1-c)v_{ly}]}{\partial z} \right) = -\frac{\partial[(1-c)P]}{\partial y} - (1-c)\rho_l g \cos(\theta) + c(f_{ls}^y + f_{ll}^y), \quad (16)$$

$$\rho_l \left(\frac{\partial[(1-c)v_{lz}]}{\partial t} + v_{ly} \frac{\partial[(1-c)v_{lz}]}{\partial y} + v_{lz} \frac{\partial[(1-c)v_{lz}]}{\partial z} \right) =$$

$$-\frac{\partial[(1-c)P]}{\partial z} - (1-c)\rho_l g \sin(\theta) + (1-c)(f_{ls}^z + f_{ll}^z). \quad (17)$$

Expandindo as derivadas parciais obtém-se:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + c \frac{\partial v_{sy}}{\partial y} + v_{sy} \frac{\partial c}{\partial y} + c \frac{\partial v_{sz}}{\partial z} + v_{sz} \frac{\partial c}{\partial z} = 0, \quad (18)$$

$$\frac{\partial(1-c)}{\partial t} + (1-c) \frac{\partial v_{ly}}{\partial y} - v_{ly} \frac{\partial c}{\partial y} + (1-c) \frac{\partial v_{lz}}{\partial z} - v_{lz} \frac{\partial c}{\partial z} = 0, \quad (19)$$

$$\rho_s \left(c \frac{\partial v_{sy}}{\partial t} + v_{sy} \frac{\partial c}{\partial t} + c v_{sy} \frac{\partial v_{sy}}{\partial y} + v_{sy}^2 \frac{\partial c}{\partial y} + c v_{sz} \frac{\partial v_{sy}}{\partial z} + v_{sy} v_{sz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) = -\frac{\partial(cP)}{\partial y} - c \rho_s g \cos(\theta) + c(f_{sl}^y + f_{ss}^y), \quad (20)$$

$$\rho_s \left(c \frac{\partial v_{sz}}{\partial t} + v_{sz} \frac{\partial c}{\partial t} + c v_{sy} \frac{\partial v_{sz}}{\partial y} + v_{sy} v_{sz} \frac{\partial c}{\partial y} + c v_{sz} \frac{\partial v_{sz}}{\partial z} + v_{sz}^2 \frac{\partial c}{\partial z} \right) = -\frac{\partial(cP)}{\partial z} - c \rho_s g \sin(\theta) + c(f_{sl}^z + f_{ss}^z), \quad (21)$$

$$\rho_l \left((1-c) \frac{\partial v_{ly}}{\partial t} - v_{ly} \frac{\partial c}{\partial t} + (1-c) v_{ly} \frac{\partial v_{ly}}{\partial y} + v_{ly}^2 \frac{\partial c}{\partial y} + (1-c) v_{lz} \frac{\partial v_{ly}}{\partial z} - v_{ly} v_{lz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) = -\frac{\partial[(1-c)P]}{\partial y} - (1-c)\rho_l g \cos(\theta) + c(f_{ls}^y + f_{ll}^y) \quad (22)$$

$$\rho_l \left((1-c) \frac{\partial v_{lz}}{\partial t} - v_{lz} \frac{\partial c}{\partial t} + (1-c) v_{ly} \frac{\partial v_{lz}}{\partial y} - v_{ly} v_{lz} \frac{\partial c}{\partial y} + (1-c) v_{sz} \frac{\partial v_{lz}}{\partial z} - v_{sz}^2 \frac{\partial c}{\partial z} \right) = -\frac{\partial[(1-c)P]}{\partial z} - (1-c)\rho_l g \sin(\theta) + c(f_{ls}^z + f_{ll}^z). \quad (23)$$

Reorganizando as Equações 18 e 19 chega-se a:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -c \frac{\partial v_{sy}}{\partial y} - v_{sy} \frac{\partial c}{\partial y} - c \frac{\partial v_{sz}}{\partial z} - v_{sz} \frac{\partial c}{\partial z}, \quad (24)$$

$$\frac{\partial(1-c)}{\partial t} = -(1-c) \frac{\partial v_{ly}}{\partial y} + v_{ly} \frac{\partial c}{\partial y} - (1-c) \frac{\partial v_{lz}}{\partial z} + v_{lz} \frac{\partial c}{\partial z}. \quad (25)$$

Substituindo a Equação 24 nas Equações 20 e 21, e a Equação 25 nas Equações 22 e 23, obtém-se:

$$\rho_s \left(c \frac{\partial v_{sy}}{\partial t} - v_{sy} c \frac{\partial v_{sz}}{\partial z} + c v_{sz} \frac{\partial v_{sy}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial(cP)}{\partial y} - c \rho_s g \cos(\theta) + c(f_{sl}^y + f_{ss}^y), \quad (26)$$

$$\rho_s \left(c \frac{\partial v_{sz}}{\partial t} - v_{sz} c \frac{\partial v_{sy}}{\partial y} + c v_{sy} \frac{\partial v_{sz}}{\partial y} \right) = -\frac{\partial(cP)}{\partial z} - c \rho_s g \sin(\theta) + c(f_{sl}^z + f_{ss}^z), \quad (27)$$

$$\rho_l \left((1-c) \frac{\partial v_{sy}}{\partial t} - v_{ly} (1-c) \frac{\partial v_{lz}}{\partial z} + (1-c) v_{lz} \frac{\partial v_{ly}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial [(1-c)P]}{\partial y} - (1-c) \rho_l g \cos(\theta) + (1-c) (f_{ls}^y + f_{ll}^y), \quad (28)$$

$$\rho_l \left((1-c) \frac{\partial v_{lz}}{\partial t} - v_{lz} (1-c) \frac{\partial v_{ly}}{\partial y} + (1-c) v_{ly} \frac{\partial v_{lz}}{\partial y} \right) = -\frac{\partial [(1-c)P]}{\partial z} - (1-c) \rho_l g \sin(\theta) + (1-c) (f_{ls}^z + f_{ll}^z). \quad (29)$$

O sistema de equações diferenciais parciais para o escoamento bifásico transiente é formado pelas Equações 24, 26, 27, 28 e 29, que reorganizadas resultam em:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -c \frac{\partial v_{sy}}{\partial y} - v_{sy} \frac{\partial c}{\partial y} - c \frac{\partial v_{sz}}{\partial z} - v_{sz} \frac{\partial c}{\partial z}, \quad (30)$$

$$\frac{\partial v_{sy}}{\partial t} = v_{sy} \frac{\partial v_{sz}}{\partial z} - v_{sz} \frac{\partial v_{sy}}{\partial z} - \frac{1}{\rho_s c} \left(c \frac{\partial P}{\partial y} + P \frac{\partial c}{\partial y} \right) - g \cos(\theta) + \frac{1}{\rho_s} (f_{sl}^y + f_{ss}^y), \quad (31)$$

$$\frac{\partial v_{sz}}{\partial t} = v_{sz} \frac{\partial v_{sy}}{\partial y} - v_{sy} \frac{\partial v_{sz}}{\partial y} - \frac{1}{\rho_s c} \left(c \frac{\partial P}{\partial z} + P \frac{\partial c}{\partial z} \right) - g \sin(\theta) + \frac{1}{\rho_s} (f_{sl}^z + f_{ss}^z), \quad (32)$$

$$\frac{\partial v_{ly}}{\partial t} = v_{ly} \frac{\partial v_{lz}}{\partial z} - v_{lz} \frac{\partial v_{ly}}{\partial z} - \frac{1}{\rho_l (1-c)} \left[(1-c) \frac{\partial P}{\partial y} - P \frac{\partial c}{\partial y} \right] - g \cos(\theta) + \frac{1}{\rho_l} (f_{ls}^y + f_{ll}^y), \quad (33)$$

$$\frac{\partial v_{lz}}{\partial t} = v_{lz} \frac{\partial v_{ly}}{\partial y} - v_{ly} \frac{\partial v_{lz}}{\partial y} - \frac{1}{\rho_l (1-c)} \left[(1-c) \frac{\partial P}{\partial z} - P \frac{\partial c}{\partial z} \right] - g \sin(\theta) + \frac{1}{\rho_l} (f_{ls}^z + f_{ll}^z). \quad (34)$$

Para modelar as interações entre as fases, representadas no modelo pelos termos f_{ij}^k , é necessário o uso de equações constitutivas. A seguir, são apresentadas as equações usadas na modelagem de forças de interação.

A força sólido-líquido em y é a força de arraste, definida como:

$$f_{sl}^y = \frac{3C_{Dy}\rho_l (v_{ly} - v_{sy})}{4d_s (1-c)^{1.7}} |v_{ly} - v_{sy}|, \quad (35)$$

sendo C_{Dy} o coeficiente de arraste, definido como:

$$C_{Dy} = \frac{24}{\text{Re}_{sy}}, \quad (36)$$

onde Re_{sy} é o número de Reynolds de partícula na direção y , definido como:

$$\text{Re}_{sy} = \frac{d_s (1-c) |v_{ly} - v_{sy}| \rho_l}{\mu_l}, \quad (37)$$

onde μ_l é a viscosidade do líquido.

A força sólido-líquido em z é definida de maneira semelhante à força sólido-líquido na direção y :

$$f_{sl}^z = \frac{3C_{Dz}\rho_l(v_{lz} - v_{sz})}{4d_s(1-c)^{1.7}}|v_{lz} - v_{sz}|, \quad (38)$$

$$C_{Dz} = \frac{24}{\text{Re}_{sz}}, \quad (39)$$

$$\text{Re}_{sz} = \frac{d_s(1-c)|v_{lz} - v_{sz}|\rho_l}{\mu_l}. \quad (40)$$

Duas alternativas foram testadas para se modelar a força de interação entre os sólidos na direção y . Foi usada a força de cisalhamento e uma relação quadrática, ambas descritas abaixo:

$$cf_{ss}^y = -\mu_s \nabla \cdot \left(c \frac{\partial v_{sy}}{\partial z} \right) = -\mu_s \frac{\partial}{\partial z} \left(c \frac{\partial v_{sy}}{\partial z} \right) = -\mu_s c \frac{\partial^2 v_{sy}}{\partial z^2} - \mu_s \frac{\partial v_{sy}}{\partial z} \frac{\partial c}{\partial z}, \quad (41)$$

$$f_{ss}^y = A_1 c^2, \quad (42)$$

sendo A_1 um parâmetro da relação quadrática e μ_s a viscosidade granular, modelada como:

$$\mu_s = 3,5\mu_l + 35c^6. \quad (43)$$

A força sólido-sólido na direção z , a força líquido-líquido na direção y , e a força líquido-líquido na direção z são definidas de forma similar a Equação 41:

$$cf_{ss}^z = -\mu_s \nabla \cdot \left(c \frac{\partial v_{sz}}{\partial y} \right) = -\mu_s \frac{\partial}{\partial y} \left(c \frac{\partial v_{sz}}{\partial y} \right) = -\mu_s c \frac{\partial^2 v_{sz}}{\partial y^2} - \mu_s \frac{\partial v_{sz}}{\partial y} \frac{\partial c}{\partial y}, \quad (44)$$

$$(1-c)f_{ll}^y = -\mu_l \nabla \cdot \left((1-c) \frac{\partial v_{ly}}{\partial z} \right) = -\mu_l (1-c) \frac{\partial^2 v_{ly}}{\partial z^2} + \mu_l \frac{\partial v_{ly}}{\partial z} \frac{\partial c}{\partial z}, \quad (45)$$

$$(1-c)f_{ll}^z = -\mu_l \nabla \cdot \left((1-c) \frac{\partial v_{lz}}{\partial y} \right) = -\mu_l (1-c) \frac{\partial^2 v_{lz}}{\partial y^2} + \mu_l \frac{\partial v_{lz}}{\partial y} \frac{\partial c}{\partial y}. \quad (46)$$

A força líquido-sólido nas direções y e z podem ser calculadas considerando-se que todo momento perdido por uma fase é ganho pela outra:

$$c\vec{f}_{sl} + (1-c)\vec{f}_{ls} = 0. \quad (47)$$

Este equacionamento foi avaliado em quatro estudos de caso em condições de escoamento mais simples. No primeiro estudo foi avaliado o escoamento bidimensional de fluido na ausência de partículas. O segundo estudo de caso envolve o transporte hidráulico de partículas. No terceiro estudo de caso a sedimentação unidimensional de partículas é tratada.

No quarto estudo de caso, foi avaliada a sensibilidade do modelo a parâmetros físicos. Detalhes adicionais serão dados no Capítulo V.

4.2. Metodologia de solução

Em todos os estudos de caso o modelo foi resolvido usando o método das linhas (MOL). A metodologia adotada neste trabalho é apresentada por Schiesser & Griffiths (2009) e usa a técnica de diferenças finitas para discretizar o modelo no espaço e um integrador numérico do tipo BDF (ode15s) para o avanço no tempo.

O código usado na solução do modelo foi escrito em MATLAB[®]. Usou-se a distribuição MATLAB[®] 2010b. O computador usado para realizar as simulações é o mesmo descrito na seção 4.2.3.

A fim de ilustrar o procedimento utilizado, o código para o primeiro estudo de caso é apresentado no Anexo A. Este código é dividido em três sub-rotinas: main.m (rotina principal), fluido.m (rotina de discretização) e filme.m (rotina de geração de animações).

CAPÍTULO V

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados experimentais do teste VSST e dos testes de sedimentação em proveta. Também serão apresentados os resultados de modelagem obtidos a partir das simulações realizadas com os pacotes CFD e do modelo baseado na mecânica do contínuo.

5.1. Teste VSST

A reologia dos fluidos de perfuração usados neste trabalho foi obtida no viscosímetro rotacional Fann 35A. As reologias para os fluidos A e B são apresentadas nas Figuras 16 e 17, respectivamente.

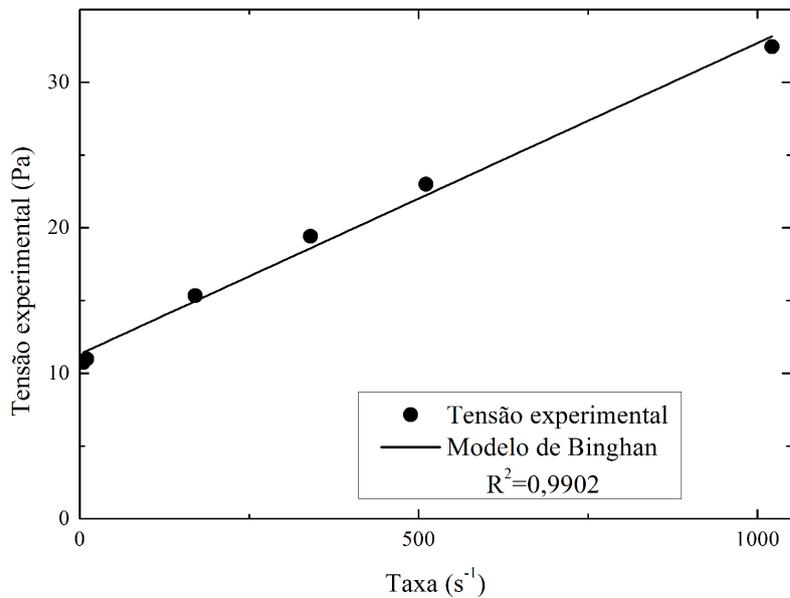


Figura 16. Reologia do fluido A.

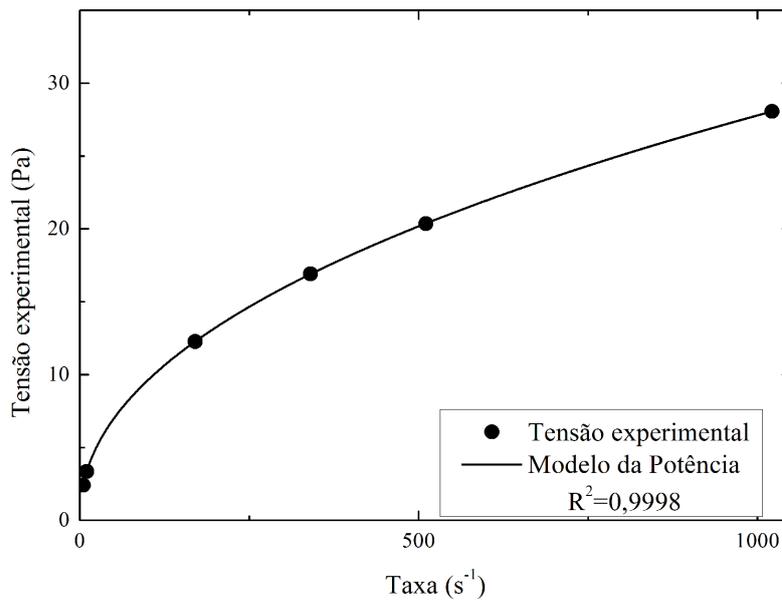


Figura 17. Reologia do Fluido B

Na Figura 18, são apresentados os dados de densidade do fluido A. Os resultados para o fluido B são apresentados na Figura 19. A densidade foi medida no fundo poço de coleta da sapata. Os resultados apresentados são a os valores médios dos testes em triplicata. O desvio padrão (σ) de cada medida também é apresentado nas Tabelas 7 e 8. Os resultados foram submetidos a testes estatísticos (ANOVA e teste-t) e apresentaram significativa reprodutibilidade.

Tabela 7. Resultados do teste VSST para o fluido A.

| Tempo (min) | Rotação (RPM) | ρ (g/ml) | σ |
|-------------|---------------|---------------|----------|
| 0 | 0 | 1,178 | 0,009 |
| 30 | 100 | 1,285 | 0,002 |
| 60 | 600 | 1,278 | 0,011 |

Tabela 8. Resultados do teste VSST para o fluido B.

| Tempo (min) | Rotação (RPM) | ρ (g/ml) | σ |
|-------------|---------------|---------------|----------|
| 0 | 0 | 1,219 | 0,021 |
| 30 | 100 | 1,313 | 0,015 |
| 60 | 600 | 1,276 | 0,012 |

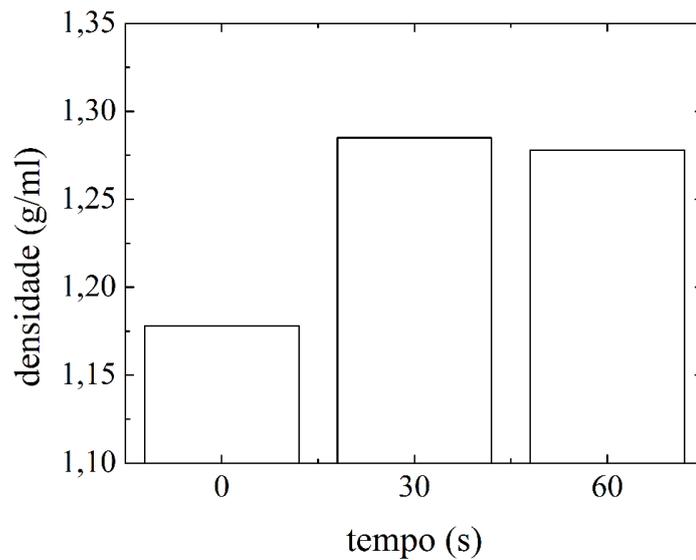


Figura 18. Resultados do teste VSST para o Fluido A.

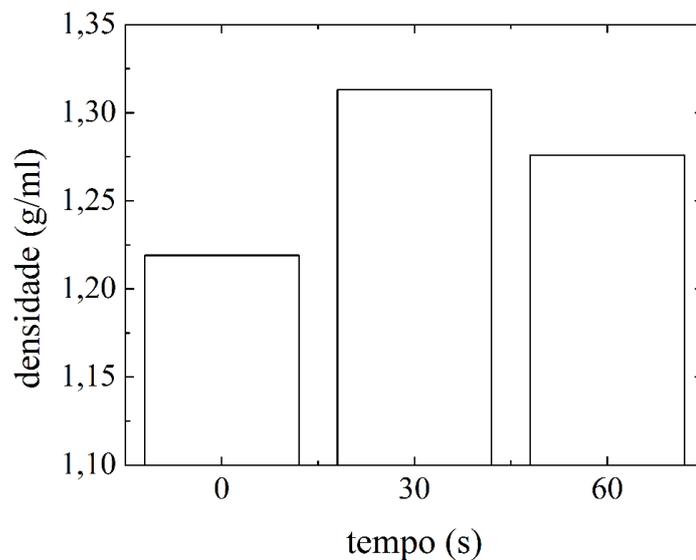


Figura 19. Resultados do teste VSST para o Fluido B.

Como se pode observar, o fluido à base de óleo (fluido A) apresenta maior tendência a sofrer sedimentação de adensante do que o fluido à base de água. O fluido à base de água apresenta melhores resultados para a ressuspensão do leito de partículas. Este resultado é coerente com as observações de campo, os fluidos à base de óleo tem maior tendência a sofrer sedimentação de adensante.

5.2. Testes de Proveta

Os testes de proveta foram realizados com suspensões de barita em água. Resultados típicos para este teste são apresentados na Figura 20 ($c=6,7\%$) e na Figura 21 ($c=12\%$). Os resultados destes testes foram usados para estimar o parâmetro A_I da Equação 42 (força de interação sólido-sólido). Os dados experimentais também foram comparados às simulações realizadas no terceiro estudo de caso, apresentado na seção 5.4.3.

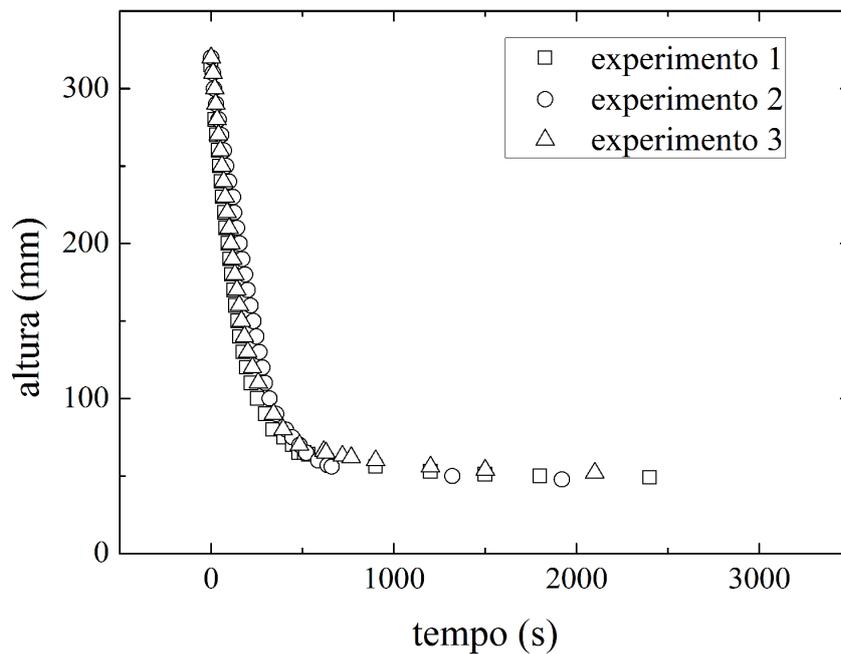


Figura 20. Dados experimentais de altura da interface em função do tempo para $c = 6,7\%$.

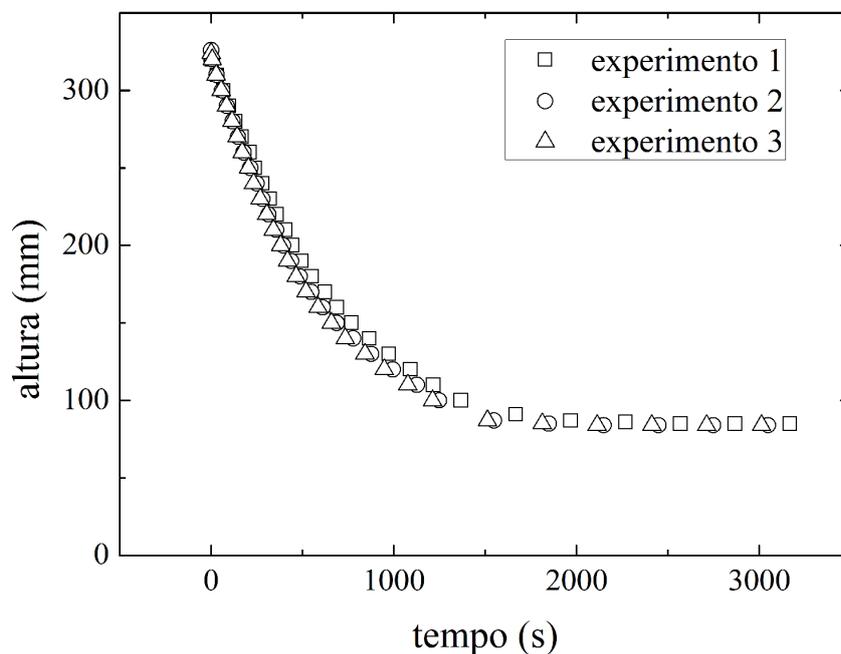


Figura 21. Dados experimentais de altura da interface em função do tempo para $c = 12\%$.

Esses dados foram analisados pelo teste ANOVA e foram considerados réplicas para um intervalo de confiança de 95%. Observa-se que o aumento da concentração inicial de sólidos resultou em uma diminuição da velocidade de sedimentação. Este fenômeno é causado pelo aumento das interações sólido-sólido e é conhecido como efeito de população (MASSARANI, 2002)

5.3. Pacotes CFD

A fim de comparar as simulações com dados experimentais de Nguyen (2009), as dimensões usadas neste trabalho são as mesmas da sessão de teste de um *loop* usado por este autor. As dimensões e condições operacionais usadas nas simulações são apresentadas na Tabela 9. Apesar de usar as mesmas condições usadas por Nguyen (2009), os resultados obtidos apresentaram uma resposta que não condiz com o fenômeno físico observado por este autor.

Tabela 9. Dados usados nas simulações com pacotes de CFD.

| Variável | Símbolo | Valor | Unidade |
|----------------------|-----------------------|----------|-------------------|
| Altura | D | 0,1016 | m |
| Comprimento | L | 10,67 | m |
| Diâmetro de sólidos | d_s | 0,000025 | m |
| Velocidade inicial | $\langle v_i \rangle$ | 0,1557 | m s^{-1} |
| Ângulo de inclinação | θ | 0,00 | graus |
| Concentração inicial | c_0 | 0,0670 | — |

Em $L=5,34\text{m}$ (região central do sistema) observa-se um comportamento qualitativamente de acordo com o observado experimentalmente (Figura 22). As partículas se depositaram na parte inferior do sistema e formaram um leito de partículas. Na Figura 23 é apresentado um perfil de concentração nessa região para a malha média (62000 nós): os tons de azul representam uma menor concentração de sólidos, enquanto os tons de vermelho representam as maiores concentrações.

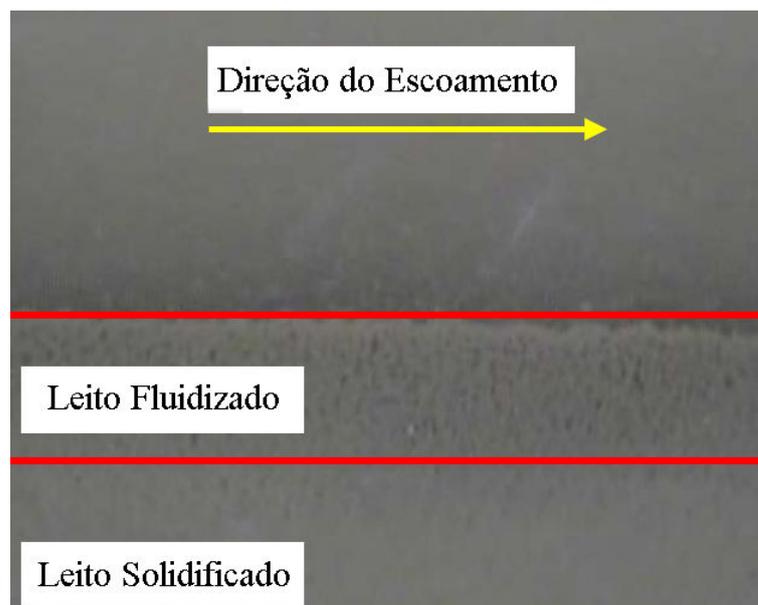


Figura 22. Acúmulo de partículas na região inferior do sistema. Foto experimental adaptada de Nguyen (2009).

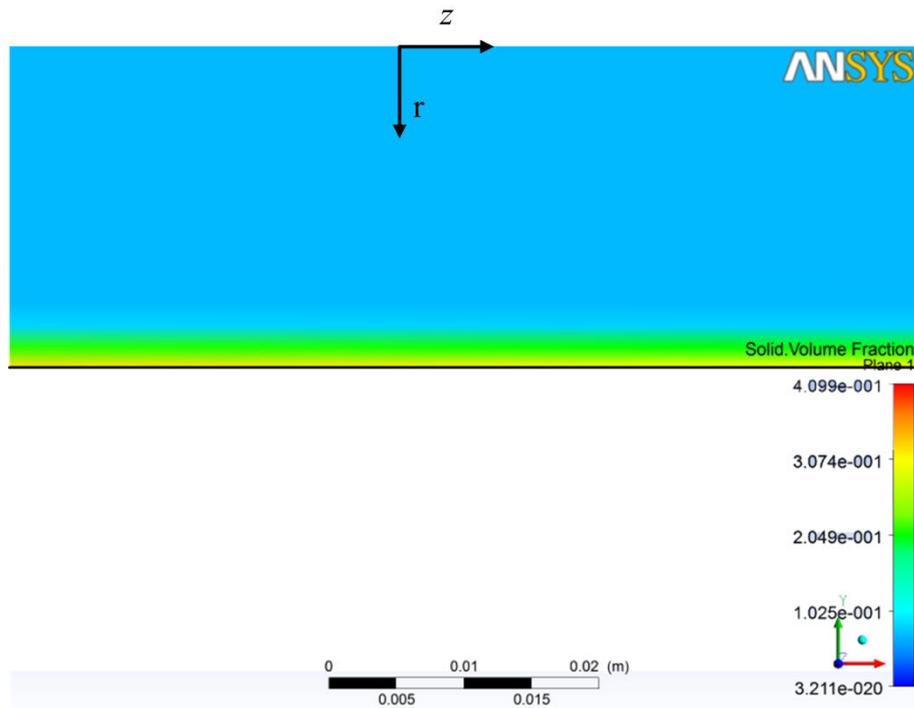
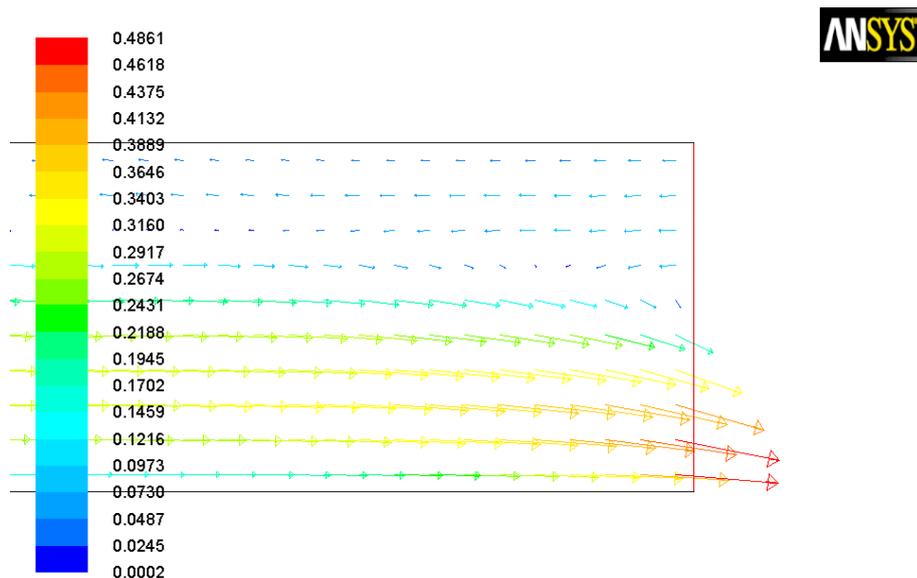


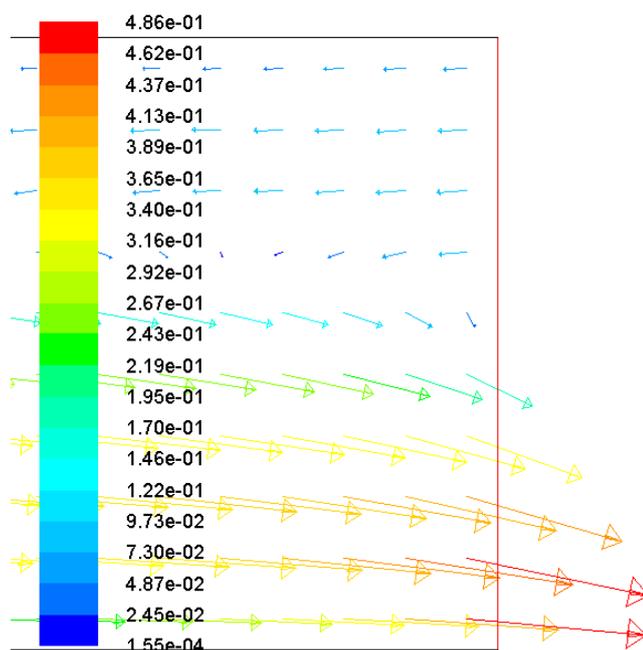
Figura 23. Perfil de concentração de sólidos para a simulação de 30 minutos de escoamento em $z = 5\text{m}$.

Apesar do comportamento próximo a entrada e as regiões centrais do sistema estar qualitativamente de acordo com os experimentos realizados por Nguyen (2009), na região da saída do sistema o pacote fornece uma resposta inconsistente. Na Figura 24 e na Figura 25 são apresentados os vetores de velocidade numa região próxima a saída do sistema para a malha média. As simulações apresentaram um retorno de fluido na saída do tubo. Tal retorno compromete os resultados e também causa instabilidade numérica.



liquid-velocity Colored By Velocity Magnitude (liquid) (m/s) (Time=2.9400e+02) Dec 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (2d, dp, pbns, eulerian, lam, transient)

Figura 24. Vetores de velocidade numa região próxima a saída do tubo.



liquid-velocity Colored By Velocity Magnitude (liquid) (m/s) (Time=2.9400e+02) Dec 20, 2010
ANSYS FLUENT 12.0 (2d, dp, pbns, eulerian, lam, transient)

Figura 25. Ampliação da região de saída do sistema. O retorno de fluido pode ser observado no canto superior direito.

Esquemas numéricos mais precisos, tais como o acoplamento *Full Multiphase Couple* (acoplamento pressão-velocidade) e o esquema de discretização MUSCL de 3ª ordem (esquema de discretização), foram utilizados para eliminar o retorno de fluido e melhorar as simulações. Também foi testada uma malha mais refinada (100000 nós) e passos de tempo menores ($1 \cdot 10^{-6}$ s).

Os esquemas mais precisos aumentaram o tempo computacional, porém não melhoraram significativamente os resultados. Apesar do baixo número de Reynolds ($Re < 300$), modelos de turbulência também foram testados, entretanto o retorno de fluido não foi eliminado.

Caso se aumente o número de Reynolds ($20000 \geq Re \leq 60000$) e se use o modelo de turbulência $k-\epsilon$, o retorno de fluido é eliminado (vide Figura 26). Entretanto nesse nível de turbulência a decantação de barita não ocorre ou é desprezível (vide Figura 27). Ainda seria possível melhorar o modelo fazendo o uso de geometrias tridimensionais, mas o custo computacional aumentaria e um *cluster* (aglomerado de computadores) seria necessário.

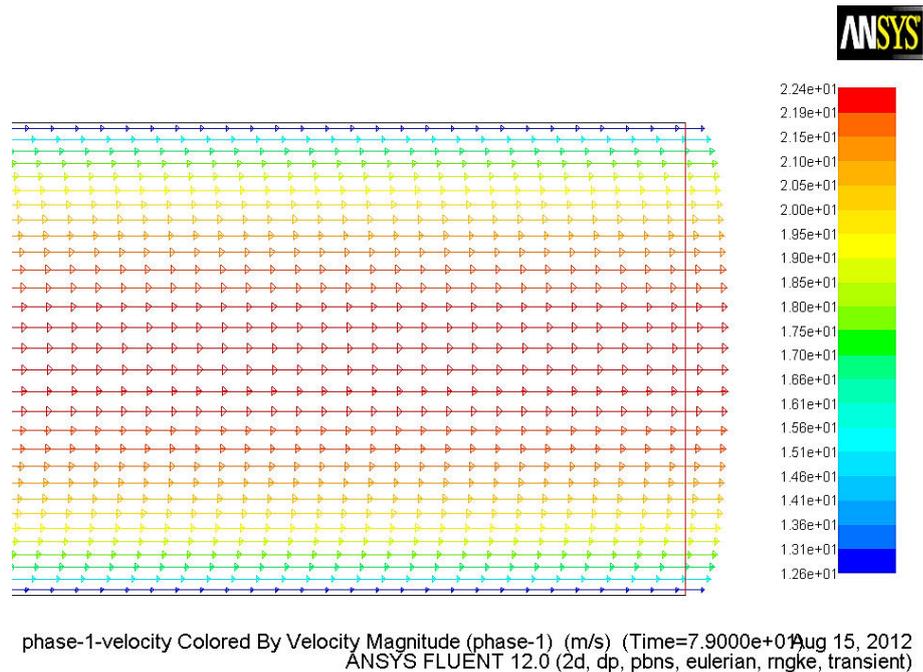


Figura 26. Vetores de velocidade numa região próxima a saída do tubo para $Re=30000$.

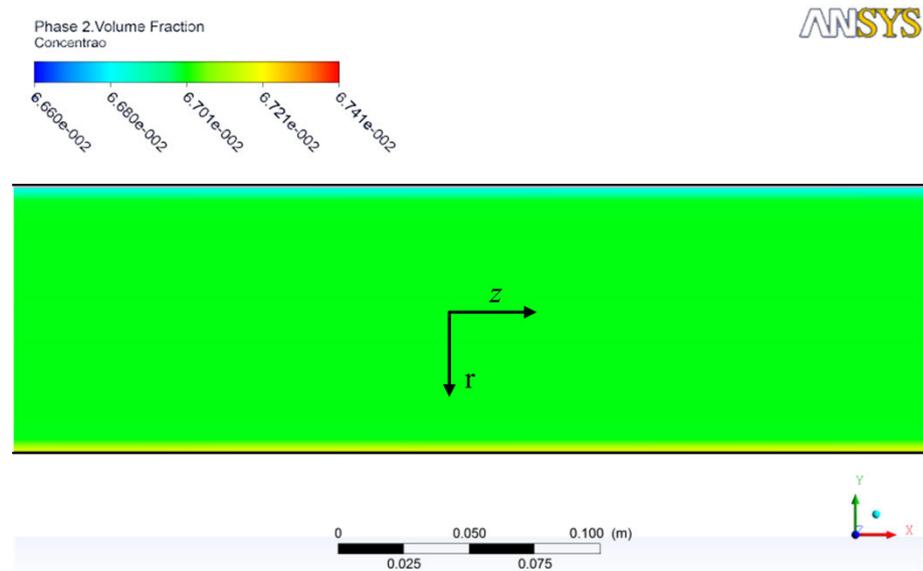


Figura 27. Perfil de concentração de sólidos homogêneo para $Re=30000$.

Uma vez que os resultados obtidos com a metodologia Euleriana nos pacotes comerciais de CFD não apresentam boa concordância com os dados experimentais, o modelo baseado nas equações de conservação (Capítulo IV) foi estudado e implementado.

5.4. Modelos Baseados nas Equações de Conservação

O modelo baseado na mecânica do contínuo foi avaliado por meio de quatro estudos de caso. Os principais resultados de cada estudo de caso são apresentados a seguir.

5.4.1. Primeiro estudo de caso: escoamento de fluido

O primeiro estudo de caso envolve o escoamento de fluido na ausência de partículas, foi considerado o escoamento bidimensional transiente. Considerando $c = 0$ o equacionamento estudado se reduz a:

$$\frac{\partial v_{ly}}{\partial y} + \frac{\partial v_{lz}}{\partial z} = 0, \quad (48)$$

$$\frac{\partial v_{ly}}{\partial t} = \frac{1}{\rho_l} \left(-\frac{\partial P}{\partial y} + \mu_l \left[\frac{\partial^2 v_{ly}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_{ly}}{\partial z^2} \right] + \rho_l g \right) - v_{ly} \frac{\partial v_{ly}}{\partial y} + v_{lz} \frac{\partial v_{ly}}{\partial z}, \quad (49)$$

$$\frac{\partial v_{lz}}{\partial t} = \frac{1}{\rho_l} \left(-\frac{\partial P}{\partial z} + \mu_l \left[\frac{\partial^2 v_{lz}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_{lz}}{\partial z^2} \right] \right) - v_{ly} \frac{\partial v_{lz}}{\partial y} + v_{lz} \frac{\partial v_{lz}}{\partial z}. \quad (50)$$

As condições iniciais e de contorno utilizadas para este caso foram:

$$y = 0 \quad \vec{v} = 0 \quad \forall t, \quad (51)$$

$$y = D \quad \vec{v} = 0 \quad \forall t, \quad (52)$$

$$z = 0 \quad v_{lz} = v_{z0} \quad \forall t, \quad (53)$$

$$z = 0 \quad v_{ly} = 0 \quad \forall t, \quad (54)$$

$$z = L \quad \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} = 0 \quad \forall t, \quad (55)$$

$$t = 0 \quad v_{lz} = v_{z0} \quad \forall z; y \neq 0; y \neq D, \quad (56)$$

$$t = 0 \quad v_{ly} = v_{z0} \quad \forall z; \forall y. \quad (57)$$

Os parâmetros utilizados neste estudo de caso são apresentados Tabela 10.

Tabela 10. Parâmetros usados no primeiro estudo de caso.

| Variável | Valor |
|--------------|--------------------------|
| ρ_l | 850,6 kg m ⁻³ |
| μ_l | 62,00 cP |
| v_{lz0} | 0,1557 m s ⁻¹ |
| ΔP_z | 200,00 Pa |

Os resultados para a simulação de 30 segundos de escoamento são apresentados na Figura 28, o fluido utilizado foi um óleo mineral ($\mu = 62$ cP e $\rho = 850.6$ kg m⁻³).

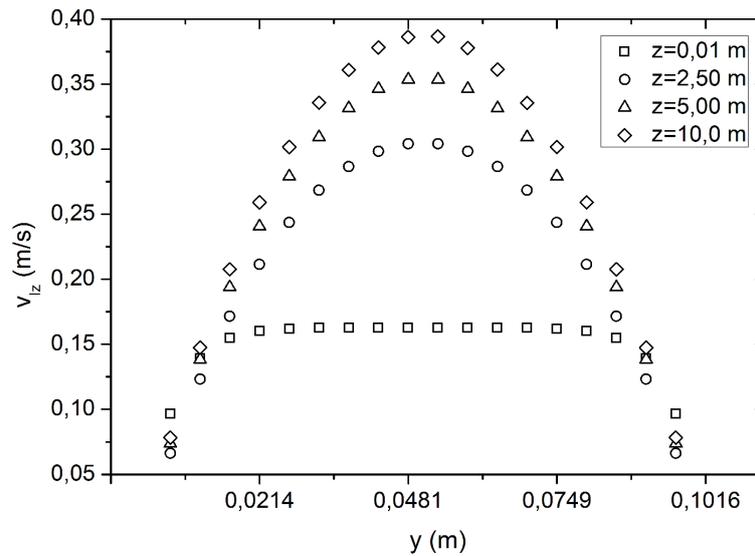


Figura 28. Perfil de velocidade como uma função da altura (y) em diferentes posições (z).

Neste caso, pode-se observar a formação do perfil de velocidade parabólico, que é a solução clássica para esta configuração de escoamento. Perto da entrada, observa-se o comportamento do escoamento empistonado, uma consequência da condição de alimentação utilizada nesta simulação.

Os resultados para $z = 10,67\text{m}$ foram comparados com o perfil parabólico clássico (BIRD, *et al.*, 2010), dado por:

$$v_{lz\infty} = \frac{\Delta P}{2\mu L} (y^2 - Dy). \quad (58)$$

A comparação do perfil de velocidade para $z = 10,67\text{m}$ e $t = 30\text{s}$ é apresentada na Figura 29. O modelo está qualitativamente de acordo com a solução analítica e os desvios foram inferiores a 7%.

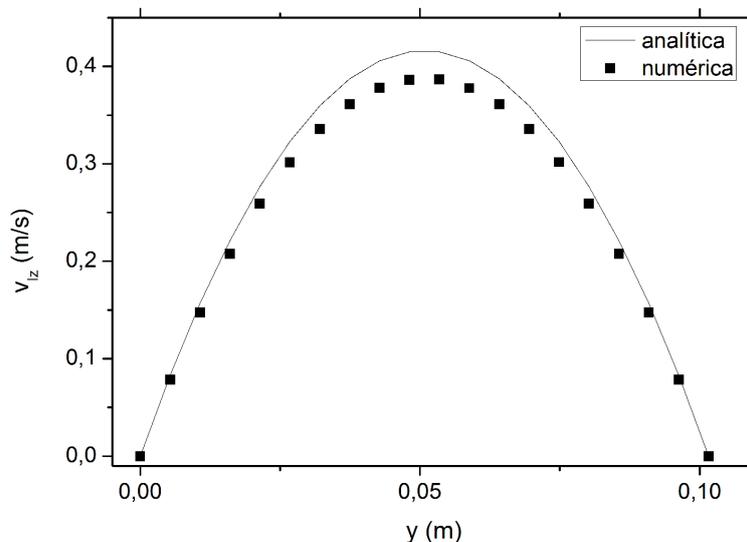


Figura 29. Perfil de velocidade como uma função de y. — solução analítica, ■ resultados numéricos.

5.4.2. Segundo estudo de caso: transporte hidráulico

No segundo estudo foi avaliado um caso de transporte hidráulico. O fluido foi alimentado com velocidade diferente de zero e o sólido foi alimentado com velocidade igual a zero. Foi considerado o escoamento axial transiente e avaliou-se o tempo necessário para os sólidos alcançarem 99% da velocidade do líquido. Neste caso o equacionamento se reduz a:

$$\frac{\partial v_{sz}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_s c} \left(c \frac{\partial P}{\partial z} + P \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho_s} (f_{sl}^z + f_{ss}^z), \quad (59)$$

$$\frac{\partial v_{lz}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_l (1-c)} \left[(1-c) \frac{\partial P}{\partial z} - P \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{1}{\rho_l} (f_{ls}^z + f_{ll}^z). \quad (60)$$

As forças foram modeladas com as Equações 38, 41, 46 e 47. As condições iniciais e de contorno utilizadas para este caso foram:

$$y = 0 \quad v_{lz} = v_{sz} = 0 \quad \forall t, \quad (61)$$

$$y = D \quad v_{lz} = v_{sz} = 0 \quad \forall t, \quad (62)$$

$$t = 0 \quad v_{lz} = v_{z0} \quad y \neq 0; y \neq D, \quad (63)$$

$$t = 0 \quad v_{sz} = 0 \quad y \neq 0; y \neq D. \quad (64)$$

As condições usadas nesta simulação são apresentadas na

Tabela 11.

Tabela 11. Parâmetros usados no segundo estudo de caso.

| Variável | Valor |
|-----------|--|
| v_{lz0} | 0,1557 m s ⁻¹ |
| v_{sz0} | 0,00 m s ⁻¹ |
| c | 6,7 % v/v |
| ρ_l | 850,6 kg m ⁻³ |
| ρ_s | 4200,0 kg m ⁻³ |
| μ_l | 0.062 kg m ⁻¹ s ⁻¹ |
| d_s | 25 µm |

Na Figura 30, os resultados para este estudo de caso são apresentados. A simulação foi realizada para as partículas de barita em óleo. A velocidade de deslizamento observada é da ordem de $1 \cdot 10^{-8}$ m s⁻¹, e o tempo necessário para que as partículas sólidas atinjam 99% da velocidade do líquido foi da ordem de $1 \cdot 10^{-7}$ s. A partir destes resultados pode-se concluir que, na direção z, pode-se usar uma velocidade média, economizando-se assim o tempo computacional. Este mesmo resultado foi observado por Nguyen (2009).

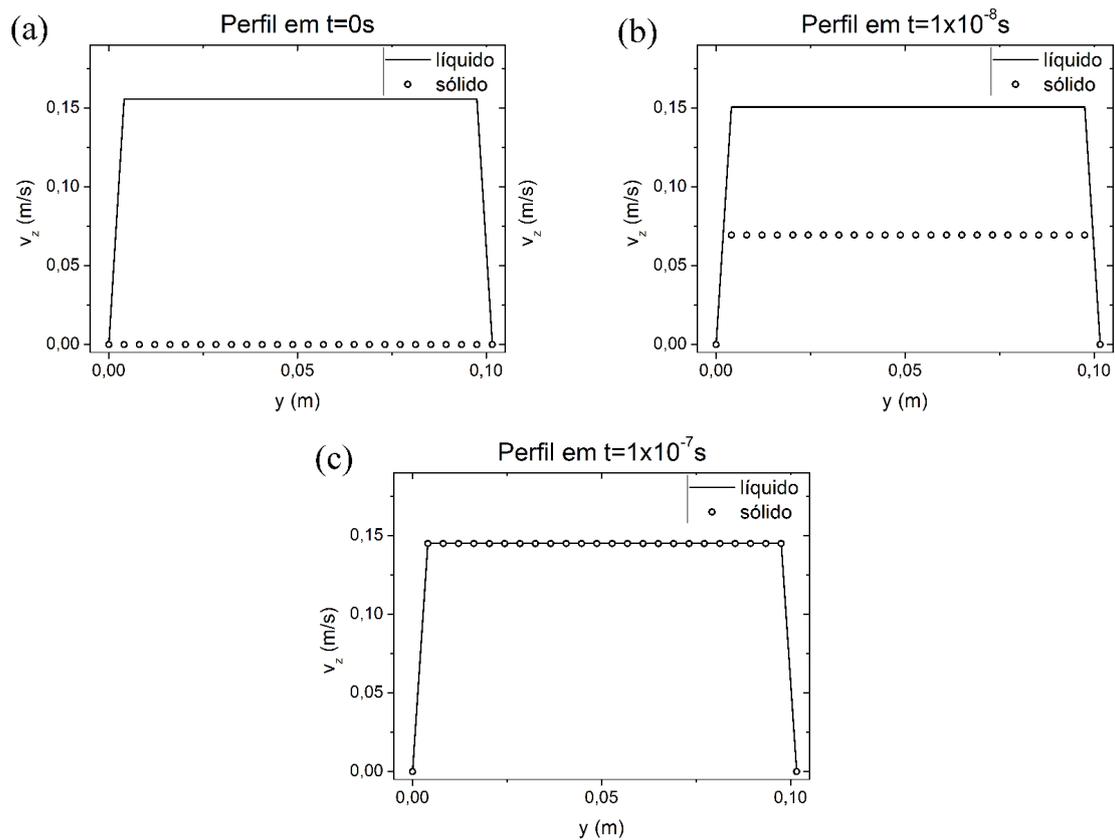


Figura 30. Perfil de velocidade no escoamento líquido-sólido para os tempos de: (a) 0 s; (b) $1 \cdot 10^{-8}$ s; (c) $1 \cdot 10^{-7}$ s.

5.4.3. Terceiro estudo de caso: sedimentação em batelada

O terceiro estudo de caso trata da simulação da sedimentação unidimensional de partículas em fluidos. O sistema simulado é ilustrado na Figura 31.

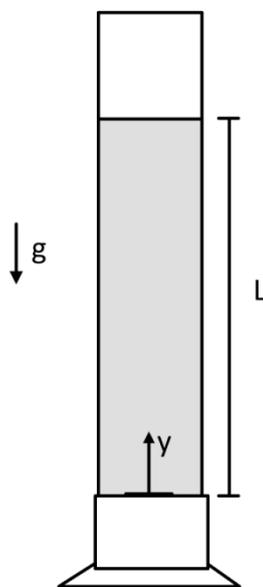


Figura 31. Esquema do sistema avaliado no terceiro estudo de caso.

Neste caso o equacionamento estudado se reduz a:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -c \frac{\partial v_{sy}}{\partial y} - v_{sy} \frac{\partial c}{\partial y}, \quad (65)$$

$$\frac{\partial v_{sy}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_s c} \left(c \frac{\partial P}{\partial y} + P \frac{\partial c}{\partial y} \right) - g + \frac{1}{\rho_s} (f_{sl}^y + f_{ss}^y), \quad (66)$$

$$\frac{\partial v_{ly}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_l (1-c)} \left[(1-c) \frac{\partial P}{\partial y} - P \frac{\partial c}{\partial y} \right] - g + \frac{1}{\rho_L} (f_{ls}^y + f_{ll}^y). \quad (67)$$

As forças foram modeladas com as Equações 35, 42, 45 e 47. As condições iniciais e de contorno utilizadas para este caso foram:

$$y = 0 \quad v_{ly} = v_{sy} = 0 \quad \forall t, \quad (68)$$

$$y = L \quad v_{ly} = 0 \quad \forall t, \quad (69)$$

$$t = 0 \quad v_{ly} = v_{sy} = 0 \quad \forall y, \quad (70)$$

$$t = 0 \quad c = c_0 \quad \forall y. \quad (71)$$

Os parâmetros físicos utilizados nessa simulação são apresentados na

Tabela 12.

Tabela 12. Parâmetros usados no terceiro estudo de caso.

| Variável | Valor |
|-----------|--|
| v_{sy0} | 0,00 m s ⁻¹ |
| c | 6,7 % v/v |
| ρ_l | 1000,0 kg m ⁻³ |
| ρ_s | 4200,0 kg m ⁻³ |
| μ_l | 0.001 kg m ⁻¹ s ⁻¹ |

Os perfis de concentração em função da altura para a simulação de partículas de barita em água são apresentados na Figura 32. Nestes perfis, pode-se observar a queda do topo da suspensão e a formação de um leito de partículas na parte inferior do sistema. O modelo prevê a presença de três zonas distintas: uma zona de líquido clarificado, uma zona de sedimentação e uma zona de leito de partículas. Nenhuma zona de compressão foi observada, pois, por motivo de simplificação, não foram usadas correlações para prever o fenômeno de compressão.

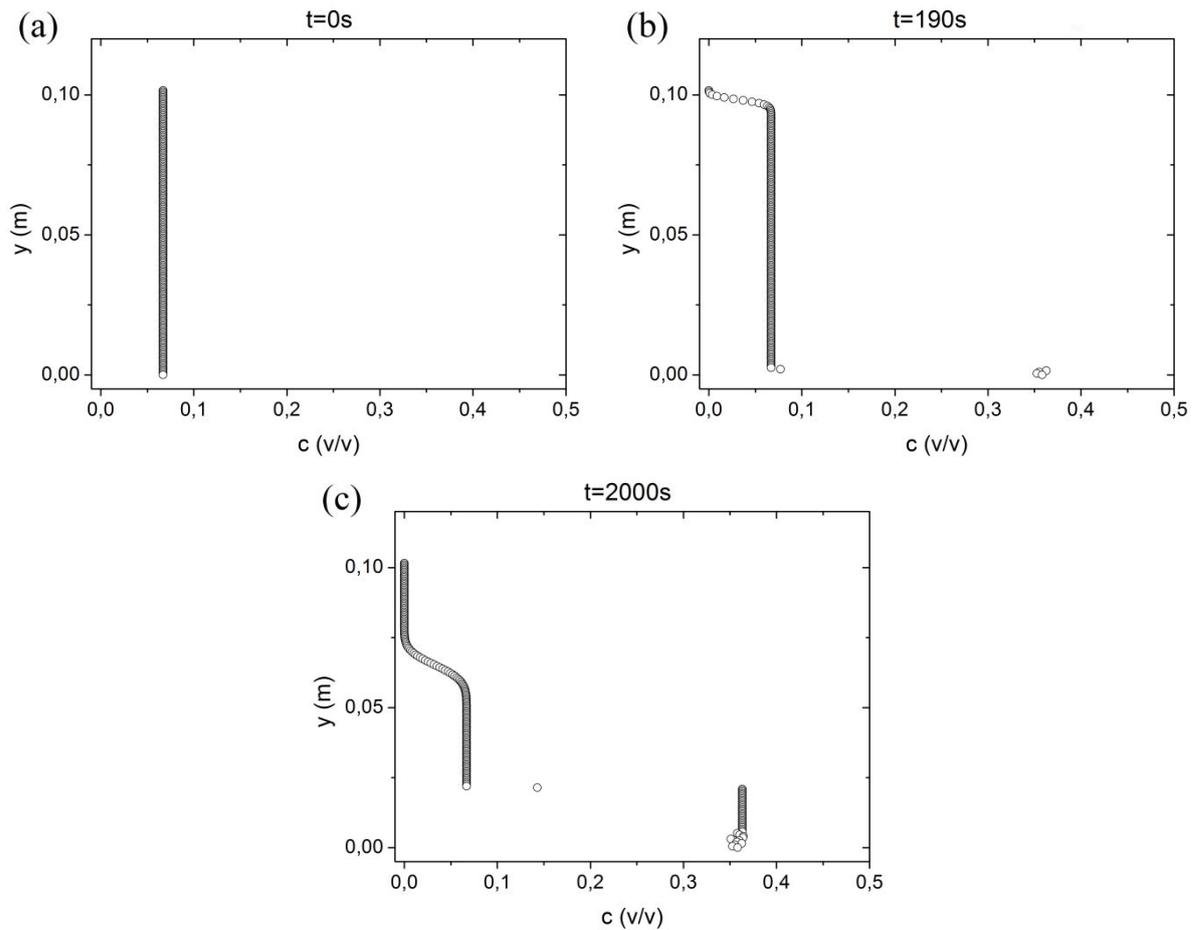


Figura 32. Perfis de concentração em função da altura para $c_0 = 6,7\%$.(a) 0 s;(b) 190 s; (c) 2000 s.

Os resultados para este estudo de caso foram comparados com dados experimentais de testes de proveta, apresentados na Figura 20. A queda de interface superior da suspensão calculada pelo modelo e observada experimentalmente é apresentada na Figura 33.

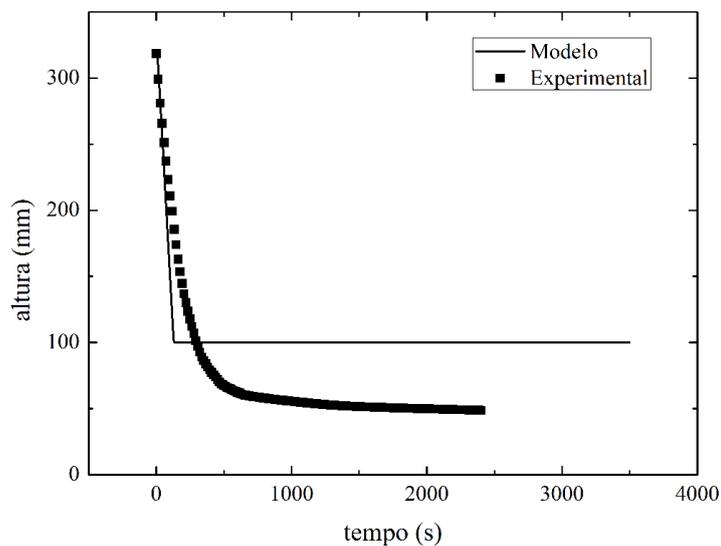


Figura 33. Altura da interface em função do tempo para $c_0 = 6,7\%$.

O modelo prevê qualitativamente os resultados experimentais de queda da interface superior da suspensão.

5.4.4. Quarto estudo de caso: sensibilidade paramétrica

No quarto estudo de caso, as Equações 65-71 foram usadas para avaliar a sensibilidade do modelo aos seguintes parâmetros físicos: 1. Tamanho de partícula; 2. Viscosidade do líquido; 3. Concentração de sólidos inicial. Foram utilizados 3 tamanhos de partículas, 3 viscosidades e 3 concentrações iniciais de sólidos para avaliar o comportamento do modelo.

Simulações foram realizadas com partículas de 10, 30 e 60 μm . A viscosidade utilizada nestas simulações foi 1cP e da concentração inicial sólido foi de 6,7%. Os resultados para as 3 simulações são apresentados na Figura 34. Pode-se observar que com o aumento de tamanho de partícula, a velocidade de sedimentação aumenta também. Sabe-se que, conforme o diâmetro da partícula se aproxima de zero, o sistema tende a comportar-se como uma única fase (Brennen, 2005).

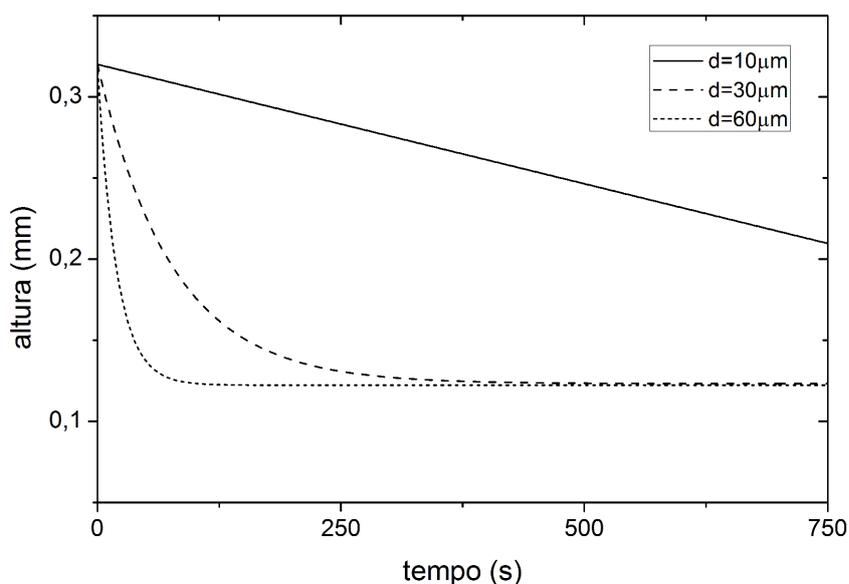


Figura 34. Altura da interface em função do tempo. Efeito do diâmetro de partícula.

Simulações foram realizadas com viscosidades de 1, 3 e 5 cP. O diâmetro das partículas utilizado nestas simulações foi de 30 μm e da concentração inicial sólido foi de 6,7%. Na Figura 35, os resultados para simulações com estes 3 viscosidades diferentes são apresentadas. Pode-se observar que com o aumento da viscosidade, a velocidade de sedimentação diminui. Isso acontece por causa da maior força de arraste em líquidos mais viscosos.

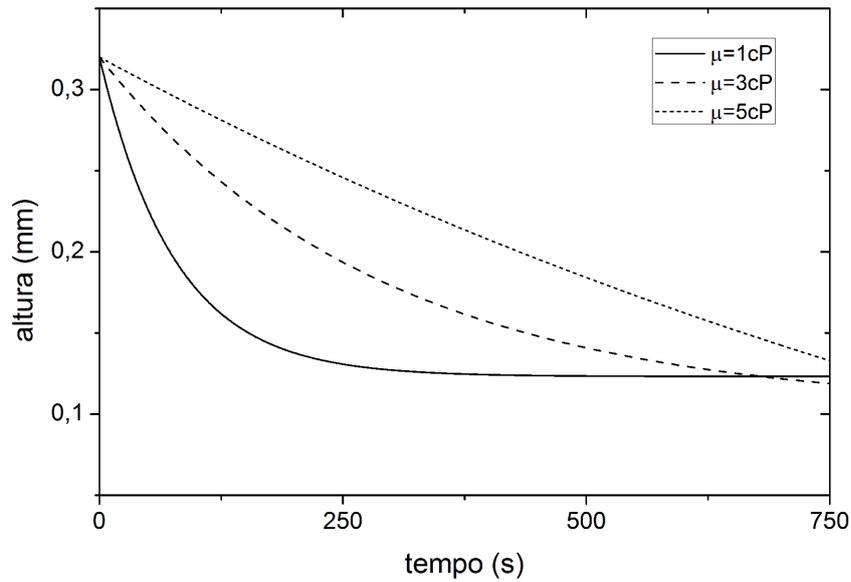


Figura 35. Altura da interface em função do tempo. Efeito da viscosidade.

Simulações foram realizadas com concentrações iniciais de 6,7, 12 e 20%. A viscosidade utilizada nestas simulações foi 1cP e diâmetro de partícula de $30\mu\text{m}$. Na Figura 36, os resultados para 3 concentrações de sólidos inicial são apresentados. Pode-se observar que, com o aumento da concentração de sólidos, a velocidade de sedimentação diminui. Este é o comportamento físico observado experimentalmente (vide seção 5.2), que é conhecido na literatura como efeito de população (Massarani, 2002).

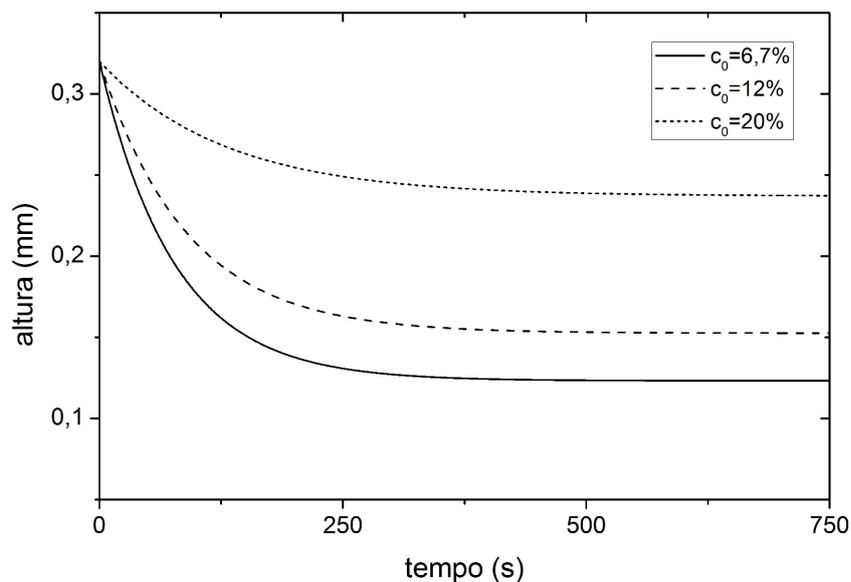


Figura 36. Altura da interface em função do tempo. Efeito da concentração inicial.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho, um fluido à base de óleo e um fluido à base de água foram avaliados com o teste VSST. Os resultados do teste indicam que o fluido à base de óleo possui maior tendência a sofrer sedimentação de material adensante que o fluido à base de água. O teste indica também que a tendência a ressuspender o leito do fluido à base de água é maior que a do fluido à base de óleo. O teste apresenta resultados promissores, pois seus resultados estão de acordo com as observações de campo.

Foram realizados testes de sedimentação em proveta para estimar parâmetros e avaliar o modelo estudado. Os testes foram realizados para concentrações de sólidos de 6,7% e 12%. Os resultados foram submetidos à análise de variância e apresentaram significativa reprodutibilidade.

Também foram estudadas duas metodologias para a modelagem da sedimentação de adensantes em fluidos de perfuração. Foram usados pacotes comerciais de CFD e um modelo baseado nas equações de conservação.

O pacote comercial Fluent 12.0.1 foi usado para simular o escoamento multifásico em duas dimensões. Foram testadas malhas com tamanhos entre 25 e 100 mil nós. Os resultados das simulações em CFD se mostraram satisfatórios apenas no regime turbulento. Entretanto, nesse regime a sedimentação não ocorre ou é desprezível.

No regime laminar, onde a sedimentação ocorre mais intensamente, as simulações em CFD, com a metodologia utilizada neste trabalho, não predizem corretamente o comportamento do sistema estudado. Os resultados apontam para um retorno de fluido, que não é observado experimentalmente. Esse retorno dificulta a convergência e atrapalha as predições.

Um conjunto clássico de equações propostas por Shook & Rocco (1991) foi utilizado em quatro estudos de casos com sucesso. O conjunto de equações foi capaz de prever o escoamento de fluido em duas dimensões, transporte hidráulico de partículas e o processo de decantação em batelada. O modelo está de acordo com as soluções analíticas clássicas e com dados experimentais.

Simulações foram realizadas para avaliar o comportamento do modelo em diferentes condições de sedimentação. Foram conduzidas simulações com 3 tamanhos de partículas, variando de 10 a 60 micra. O modelo prevê que o aumento de diâmetro de partícula aumenta a taxa de sedimentação. Simulações foram realizadas com 3 viscosidades e com 3 concentrações iniciais de sólidos. Avaliou-se viscosidades de 1 a 5cP e concentrações iniciais sólidos de 6,7 a 20%. O modelo foi capaz de prever que o aumento na viscosidade do líquido diminui a sedimentação e que o aumento na concentração de sólidos inicial reduz a taxa de sedimentação.

CAPÍTULO VII

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade a este trabalho, os próximos passos sugeridos são:

1. Avaliar o modelo em estudos de caso envolvendo simultaneamente os fenômenos estudados separadamente neste trabalho;
2. Validar o modelo com os dados experimentais e de campo;
3. Comparar os resultados do teste VSST com dados de campo para mais fluidos de perfuração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSYS Inc. Introductory FLUENT Training. Part of Ansys 12 Training Manuals, First Edition, 2009.
- AROUCA, F. O. Uma Contribuição ao Estudo da Sedimentação Gravitacional em Batelada. Dissertação de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, FEQ, Uberlândia, Minas Gerais, 2007.
- BATCHELOR, G.K. *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. 52, pp. 245, 1972.
- BELL, S.A.; MURPHY, R.J. Improve Drilling Economics Using Dynamic High Angle Sag Testing (DHAST). AADE-06-DF-HO-29, AADE Drilling Fluids Technical Conference, Houston, Texas, 2006.
- BIRD, R.B.; STEWART, W.E.; LIGHTFOOT, E. N. *Fenômenos de Transporte*. Segunda Edição Revisada e Atualizada, Editora LTC, 2010.
- BOURGOYNE, A.T.; MILLHEIM, K.K.; CHENEVERT, M.E.; YOUNG, F.S. *Applied Drilling Engineering*. Second Printing, Society of Petroleum Engineers, Richardson, Texas, 1991.
- BOYCOTT, A.E. Sedimentation of Blood Corpuscles. *Nature*, Vol. 104, pp.532, 1920.
- DE CLERCQ, B.; VANROLLEGHEM, P.A. Computational fluid dynamics in wastewater treatment. *Med. Fac. Landb. Toegep. Biol. Wet.* 67, pp. 15–19, 2002.
- DONG, K.J.; YANG, R.Y.; ZOU, R.P.; YU, A.B.; ROACH, G.; JAMIESON, E. Simulation of The Cake Formation and Growth in Sedimentation and Filtration. Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, CSIRO, Melbourne, Australia, 2003.
- DONG, K.J.; ZOU, R.P.; YANG, R.Y.; YU, A.B.; ROACH, G. DEM simulation of cake formation in sedimentation and filtration. *Minerals Engineering* 22, pp. 921–930, 2009.
- FELICE, R.; PAGLIAI, P. Interaction of a Sphere with a Suspension of Other Spheres. *AIChE Journal*, Vol.49, No.12, 2003.
- FELICE, R.; PAGLIAI, P. The falling velocity of a large sphere in a suspension of smaller spheres. *Int. Journal of Multiphase Flow*, Vol. 33, pp. 797-801, 2007.
- FORT, J.A.; BAMBERGER, J.A.; BATES, J.M.; ENDERLIN, C.W. Elmore C.W. Final Report 1/12-Scale Physical Modeling Experiments in Support of Tank 241-SY-101 Hydrogen Mitigation. Northwest Pacific Laboratory Richland, Washington, 1992.
- GOULA, A.M.; KOSTOGLU, M.; KARAPANTSIOS, T.D.; ZOUBOULIS, A.I. A CFD methodology for the design of sedimentation tanks in potable water treatment. Case study: The influence of a feed flow control baffle. *Chemical Engineering Journal*, 140 (1-3), pp. 110-121, 2008.

- HEMPHILL, T.; RAVI, K. Turning on Barite Sag with Drillpipe Rotation: Sometimes Surprises Are Really Not Surprises. AADE-06-DF-HO-28, AADE Drilling Fluids Technical Conference, Houston, Texas, 2006.
- JAMISON, D.E.; CLEMENTS, W.R. A new test method to Characterize Settling/Sag Tendencies of Drilling Fluids in Extended Reach Drilling. ASME Drilling Technology Symposium, 27, pp. 109, 1990.
- KYNCH, G. J. A Theory of Sedimentation. Trans. Amer. Soc., pp. 166–176, 1951.
- LIN, C.X.; EBADIAN, M.A. A numerical study of developing slurry flow in the entrance region of a horizontal pipe. Computers & Fluids 37, pp. 965–974, 2008.
- MCCABE, W.L.; SMITH, J.C.; HARRIOTT, P. Unit Operations of Chemical Engineering. Fifth Edition, McGraw-Hill Chemical Engineering Series, New York, 1993.
- NGUYEN T.C. Predicting Dynamic Barite Sag in Oil Based Drilling Fluids. (2009) Dissertação de Ph.D. The University of Tulsa, The Graduate School, Tulsa, Oklahoma.
- NGUYEN, T.C.; MISKA, S.; YU, M.; TAKACH, N. Predicting Dynamic Barite Sag in Newtonian Oil Based Drilling Fluids. SPE 124137, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, 2009.
- NGUYEN, T.; MISKA, S.; YU, M.; TAKACH, N.; AHMED R. Saasen A. Omland T.H. Maxey J. Experimental study of dynamic barite sag in oil-based drilling fluids using a modified rotational viscometer and a flow loop. Journal of Petroleum Science and Engineering 78, pp. 160–165, 2011.
- NUNZIATO, J. A Multiphase Mixture Theory for Fluid-Particle Flows. Theory of Dispersed Multiphase Flow, Academic Press, New York, 1983.
- OMLAND, T. H. Particle settling in non-Newtonian drilling Fluids. Dissertação de Ph.D. University of Stavanger, Faculty of Science and Technology, Department of Petroleum Engineering, 2009.
- OMLAND, T.H.; DAHL, B.; SAASEN, A.; SVANES, K.; AMUNDSEN, P.A. The influence of particle type and size distribution on viscosity in a non-Newtonian drilling fluid. Ann. Trans. Nordic Rheology Soc., vol. 13, pp.107-110, 2005.
- OMLAND, T.H.; SAASEN, A.; VAN DER ZWAAG, C.; AMUNDSEN, P.A. The Effect of Weighting Material Sag on Drilling Operation Efficiency. SPE 110537, SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, Jakarta, Indonesia, 2007.
- PASLAY, P.; SATHUVALLI, U.; PAYNE, M. A Phenomenological Approach to Analysis of Barite Sag in Drilling Muds. SPE 110404, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, California, 2007.

- PERRY, R.H.; GREEN, D.W. Perry's Chemical Engineers' Handbook. Seventh Edition, The McGraw-Hill Companies, New York, 1999.
- RICHARDSON, J.F.; ZAKI, W.N. Sedimentation and Fluidization. Transaction of Industrial Chem. Engrs, pp. 32 e 35, 1954.
- RISMANTO, R.; VAN DER ZWAAG, C. Explorative Study of NMR Drilling Fluid Measurement. Ann. Trans. Nordic Rheology Soc., vol. 15, 2007.
- SCHIESSER, W.E.; GRIFFITHS, G.W. A Compendium of Partial Differential Equation Models: Method of Lines Analysis with Matlab. Cambridge University Press, New York, 2009.
- SKALLE, P.; BACKE, K.R; LYOMOV, S.K; SVEEN, J. Barite Segregation in Inclined Boreholes. Journal of Canadian Petroleum Technology, Volume 38, No. 13, 1999.
- SHOOK, A.; ROCCO, C. Slurry Flow – Principles and Practice. Butterworth-Heinemann, Boston, 1991.
- TEHRANI, A.; ZAMORA, M. Power D. Role of Rheology in Barite Sag in SBM and OBM. AADE-04-DF-HO-22, AADE Drilling Fluids Technical Conference, Houston, Texas, 2004.
- THOMAS, J.E. Fundamentos da Engenharia de Petróleo. Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2001.
- ZAMORA, M.; BELL, R. Improved Wellsite Test for Monitoring Barite Sag. AADE-04-DF-HO-19, AADE Drilling Fluids Technical Conference, Houston, Texas, 2004.
- ZAMORA, M.; JEFFERSON, D. Controlling barite sag can reduce drilling problems, Oil and Gas Journal, pp. 47-52, 1994.

ANEXOS

- A. Rotina em MATLAB[®] para a solução do estudo de caso 1.
- B. Páginas 15-19 da ISO 10414-2 (2009).

Anexo A. Rotina em MATLAB para a solução do estudo de caso 1.

A seguir é apresentada a rotina principal **main.m**:

```
clc
echo on
%% Código - Decantação de Barita (estudo de caso 1)
%
% Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
% Departamento de Engenharia Química - Instituto de Tecnologia
% Laboratório de Escoamento de Fluidos Giulio Massarani
%
% Código desenvolvido por Felipe Moreira Eler
% Sob a orientação de Luís Américo Calçada & Cláudia Míriam Scheid

echo off
clear all
%% Criação de um área global:

global vlzz vlzzz vlzyy mu rho vlz0 npz npy dz dzs dy dys ncall ...
    dPdZ gz gy vlyz vlyzz vlyyy vlzy vlyy vly0 dPdy

%% Parâmetros do Modelo (unidades no SI):

mu=0.062;
rho=850.6;
D=0.1016;
L=10.67;
vlz0=0.1557;
vly0=0.0;
dPdZ=-200/L;
dPdy=-rho*9.81;
gz=0;
gy=-9.81;

%% Criação do Grid:

npz=input('entre com o número de pontos na direção z-->');
npy=input('entre com o número de pontos na direção y-->');

tic      % Contador de tempo

% Direção axial:

dz=L/npz;
dzd=2*dz;
dzs=dz^2;

z=ones(1,npz);

for i=1:npz
    z(i)=i*dz;
end

% Direção radial:

dy=D/(npy-1);
dyd=2*dy;
```

```

dys=dy^2;

yy=ones(1, npy);

for j=1:npy
    yy(j)=(j-1)*dy;
end

%% Variável independente de integração (t):

t0=0;
tf=30;
dt=0.1;
tout=0:dt:tf;
nout=(tf/dt)+1;
ncall=0;

%% Alocação de Memória:

vlz=ones(npz, npy);
vlzz=ones(npz, npy);
vlzzz=ones(npz, npy);
vlzy=ones(npz, npy);
vlzyy=ones(npz, npy);
vly=ones(npz, npy);
vlyz=ones(npz, npy);
vlyzz=ones(npz, npy);
vlyyy=ones(npz, npy);
vlyyyy=ones(npz, npy);
y0=ones(1, 2*((npz-1)*npy+npy));

%% Condições iniciais:

for i=1:npz
    for j=1:npy
        if j==1 || j==npy
            vlz(i, j)=0;
            vly(i, j)=0;
        else
            vlz(i, j)=vlz0;
            vly(i, j)=vly0;
        end
        y0((i-1)*npy+j)=vlz(i, j);           % 2D para 1D
        y0((i-1)*npy+j+npy*npz)=vly(i, j); % 2D para 1D
    end
end

%% Integração:

reltol=1.0e-04;
abstol=1.0e-04;
options=odeset('RelTol', reltol, 'AbsTol', abstol);
[t, y]=ode15s(@fluido, tout, y0, options);

%% 1D para 2D

clear vlz vly

```

```

vlz=ones (nout,npz, npy) ;
vly=ones (nout,npz, npy) ;

for it=1:nout
    for i=1:npz
        for j=1:npy
            vlz(it,i,j)=y(it,(i-1)*npy+j);
            vly(it,i,j)=y(it,(i-1)*npy+j+npy*npz);
        end
    end
end

toc      % Contador de tempo

```

A seguir é apresentada a rotina de discretização **fluido.m**:

```

%% Criação da subrotina de discretização

function yp=fluido(t,y)

%% Área global

global vlzz vlzzz vlzzy mu rho vlz0 npz npy dz dzs dy dys ncall ...
       dPdz gz gy vlyz vlyzz vlyyy vlzy vlyy vly0 dPdy

%% 1D para 2D:

vlz=ones (npz, npy) ;
vly=ones (npz, npy) ;
vlzt=ones (npz, npy) ;
vlyt=ones (npz, npy) ;
yp=ones (1,2*((npz-1)*npy+npy)) ;

for i=1:npz
    for j=1:npy

        vlz(i,j)=y((i-1)*npy+j);
        vly(i,j)=y((i-1)*npy+j+npy*npz);

    end
end

%% Discretização das derivadas e criação da EDP:

for i=1:npz
    for j=2:npy-1

        % dvlz/dz e dvly/dz:

        if i==1
            vlzz(i,j)=(vlz(i,j)-vlz0)/dz;
            vlyz(i,j)=(vly(i,j)-vly0)/dz;
        else
            vlzz(i,j)=(vlz(i,j)-vlz(i-1,j))/dz;
            vlyz(i,j)=(vly(i,j)-vly(i-1,j))/dz;
        end
    end
end

```

```

% d2vlz/dz2 e d2vly/dz2:

if i==1
    vlzzz(i,j)=(vlz(i+1,j)-2*vlz(i,j)+vlz0)/dzs;
    vlyzz(i,j)=(vly(i+1,j)-2*vly(i,j)+vly0)/dzs;
elseif i==npz
    vlzzz(i,j)=(vlz(i,j)-2*vlz(i-1,j)+vlz(i-2,j))/dzs;
    vlyzz(i,j)=(vly(i,j)-2*vly(i-1,j)+vly(i-2,j))/dzs;
else
    vlzzz(i,j)=(vlz(i+1,j)-2*vlz(i,j)+vlz(i-1,j))/dzs;
    vlyzz(i,j)=(vly(i+1,j)-2*vly(i,j)+vly(i-1,j))/dzs;
end

% dvlz/dy e dvly/dy:

vlzy(i,j)=(vlz(i,j+1)-vlz(i,j))/dy;
vlyy(i,j)=(vly(i,j+1)-vly(i,j))/dy; % Eq. Cont.

% d2vlz/dy2 e d2vly/dy2:

vlzyy(i,j)=(vlz(i,j+1)-2*vlz(i,j)+vlz(i,j-1))/dys;
vlyyy(i,j)=(vly(i,j+1)-2*vly(i,j)+vly(i,j-1))/dys;

% EDPs

vlzt(i,j)=(1/rho)*(-dPdz+mu*(vlzyy(i,j)+vlzzz(i,j))+rho*gz)-
vlz(i,j)*vlzz(i,j)-vly(i,j)*vlzy(i,j);
vlyt(i,j)=(1/rho)*(-dPdy+mu*(vlyyy(i,j)+vlyzz(i,j))+rho*gy)-
vlz(i,j)*vlyz(i,j)-vly(i,j)*vlyy(i,j);

    end
end

% Aplicação das cc's em y:

vlzt(:,1)=0;
vlyt(:,1)=0;
vlzt(:,npy)=0;
vlyt(:,npy)=0;

% Definição da função yp 2D para 1D:

for i=1:npz
    for j=1:npy

        yp((i-1)*npy+j)=vlzt(i,j);
        yp((i-1)*npy+j+npy*npz)=vlyt(i,j);

    end
end

```

```
% Transpor e contar:
```

```
yp=yp';  
ncall=ncall+1;
```

Por fim é apresentada a rotina de geração de gráficos e animações filme.m:

```
function [a,vid]=filme (vlz,yy,it,dt,npj,npj,z,dz,dy)  
  
a=ones (npj,npj);  
q=round (npj/4); % 25% de L  
h=round (npj/2); % 50% de L  
  
for ii=1:it  
    for i=1:npj  
        for j=1:npj  
  
            a(i,j)=vlz(ii,i,j);  
  
        end  
    end  
    t=(ii-1)*dt;  
    subplot(2,2,1)  
    plot (a(1,:),yy)  
    axis([0 0.42 0 0.1016])  
    xlabel 'velocidade vlz (m/s)'  
    ylabel 'altura y (m)'  
    title (['Perfil de Velocidades Transiente em z=',num2str(dz),...  
           ' m em ',num2str(t), ' s'])  
    subplot(2,2,2)  
    plot (a(q,:),yy)  
    axis([0 0.42 0 0.1016])  
    xlabel 'velocidade vlz (m/s)'  
    ylabel 'altura y (m)'  
    title (['Perfil de Velocidades Transiente em z=',num2str(q*dz),...  
           ' m em ',num2str(t), ' s'])  
    subplot(2,2,3)  
    plot (a(h,:),yy)  
    axis([0 0.42 0 0.1016])  
    xlabel 'velocidade vlz (m/s)'  
    ylabel 'altura y (m)'  
    title (['Perfil de Velocidades Transiente em z=',num2str(h*dz),...  
           ' m em ',num2str(t), ' s'])  
    subplot(2,2,4)  
    plot (a(npz,:),yy)  
    axis([0 0.42 0 0.1016])  
    xlabel 'velocidade vlz (m/s)'  
    ylabel 'altura y (m)'  
    title (['Perfil de Velocidades Transiente em z=',num2str(npz*dz),...  
           ' m em ',num2str(t), ' s'])  
    vid(ii)=getframe;  
end
```

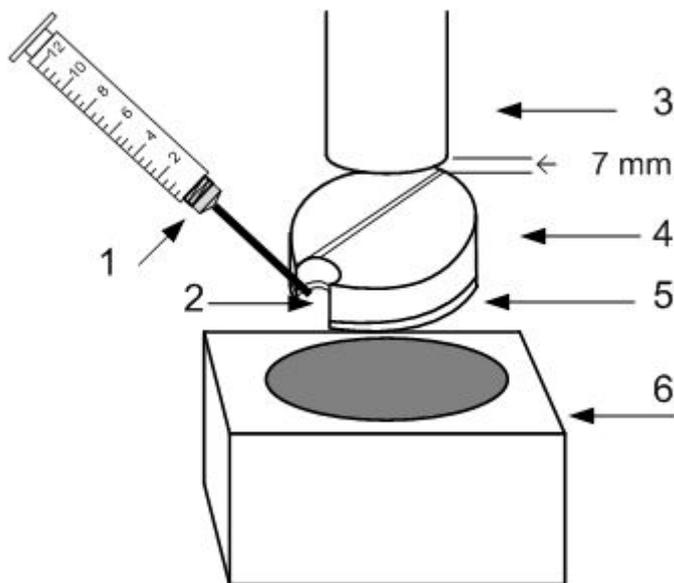
O.5 DYNAMIC WEIGHT-MATERIAL SAG TEST – VSST METHOD

O.5.1 Principle

O.5.1.1 The Viscometer Sag Shoe Test (VSST) is a wellsite and laboratory test to measure weight-material sag tendencies of field and lab-prepared drilling fluids under dynamic conditions.

O.5.1.2 The VSST provides an intrinsic fluid property without regard to the conditions under which the fluid has been or will be used. As such, results must be combined with operational factors to correlate with sag experienced in the field. (This is analogous to measuring yield point, but still having to combine it with operational factors in order to correlate with pressure loss.)

O.5.1.3 The VSST designation is derived from the rotational viscometer used as a mixer and the thermoplastic insert (Sag Shoe) designed to concentrate sagged weight material in the bottom of a viscometer thermocup. Figure O.8 shows the basic equipment for determining VSST.



KEY:

- 1 Syringe
- 2 Collection well
- 3 Viscometer rotor
- 4 VSST Sag Shoe
- 5 Metal-backing plate
- 6 Thermocup

Figure O.8 – Key equipment for VSST method

O.5.1.4 Sag tendency is determined by the density increase of samples extracted from the collection well over a 30-min period at a standard temperature and under a consistent rate of shear.

O.5.1.5 Weight-material bed pickup can be run as an optional measurement to characterise bed removal by higher shear levels. Results can be used to suggest opportunities for bed removal in the field prior to tripping out of the hole.

O.5.2 Apparatus

O.5.2.1 Direct-indicating viscometer, powered by an electric motor, see clause 6.3.1.1 for dimensions.

O.5.2.2 Stopwatch or Timer, accurate to ± 1 s.

O.5.2.3 Thermostatically controlled viscometer cup.

NOTE The VSST Sag Shoe should fit inside the thermocup without being too tight.

O.5.2.4 Thermometer, with a range of 0 °C to 105 °C (32 °F to 220 °F).

O.5.2.5 Luer syringe, 10 ml, 2-piece, solvent-resistant, Norm-Jet® from HSW GmBH or equivalent.¹

O.5.2.6 Pipetting needle, blunt-end, 6-in, 14-gauge needle with Luer connection.

O.5.2.7 Balance, digital, with 0,01 g resolution. A triple-beam balance may be used in the field where excessive vibration is expected.

¹ Norm-Jet is an example of a suitable product available commercially. This information is given for the convenience of users of ISO 10414-2/API RP 13B-2, and does not constitute an endorsement by either ISO or API of this product.

O.5.2.8 Pycnometer or retort cup, 10 ml.

NOTE: The pycnometer equipment is not required if the test is run at the wellsite, or if the procedure will include the pickup test described in subclause O.5.3.3.

O.5.2.9 Spatula, 6 in or similar.

O.5.2.10 Distilled water.

O.5.2.11 Multimixer, capable of operating at 11 500 r/min \pm 300 r/min under load, with single corrugated impeller approximately 25,4 mm (1 in) in diameter.²

O.5.2.12 Container, for mixing, 180 mm deep (7-1/8 in), d = 97 mm (3-3/4 in) at top and 70 mm (2-3/4 in) at bottom.³

O.5.2.13 VSST Sag Shoe, shaped, cylindrical disk manufactured of Delrin^{®4} or equivalent thermoplastic material, maximum diameter of 57 mm \pm 0,38 mm (2,35 \pm 0,015 in) and length of 27,7 mm (1,09 in). The well is a notch cut through the thermoplastic disk and metal-backing plate that connects with the thermocup bottom. The metal plate is used solely to increase the overall mass of the Sag Shoe so that it does not float when used with very dense fluids. The VSST Sag Shoe may be obtained from several oilfield testing equipment suppliers or licensed from M-I SWACO, 5950 N. Course Drive, Houston, TX 77079 USA.

O.5.3 Procedure

O.5.3.1 Equipment setup

O.5.3.1.1 Insert the Sag Shoe into the thermocup and place both on the viscometer plate.

O.5.3.1.2 Raise the plate until the top of the Sag Shoe touches the bottom of viscometer sleeve, and mark the support leg at the upper edge of the locking mechanism.

O.5.3.1.3 Lower the plate and thermocup to the base, and mark the support leg 7 mm (0,25 in) below the first mark.

O.5.3.1.4 Calibrate syringe with blunt-end pipetting needle attached using distilled water and digital balance.

NOTE: Calibrate pycnometer or retort cup with distilled water if it will be used for density measurements.

O.5.3.2 Sag measurement

O.5.3.2.1 Insert the Sag Shoe into the thermocup with the collection well positioned for easy access by the syringe, e.g. 60° to 90° either side of the viscometer centre line.

O.5.3.2.2 Pre-heat the thermocup with Sag Shoe to 49 °C (120 °F).

O.5.3.2.3 Collect a 350-ml fluid sample in a container, mix appropriately, and pour approximately 140 ml into the thermocup. Most consistent results are obtained if the starting fluid temperature is close to 49 °C (120 °F) to minimize sag during heating.

O.5.3.2.4 Position and lock the upper edge of the viscometer locking mechanism to coincide with the lower mark on the support leg. The top of the Sag Shoe should be 7 mm (0,25 in) below the viscometer sleeve.

O.5.3.2.5 Set viscometer at 100 r/min and start 30-min timer.

O.5.3.2.6 Using the syringe with blunt-end pipetting needle attached and cleared of air, draw slightly more than a 10-ml sample from the drilling fluid remaining in the container. Carefully clear syringe and pipetting needle of residual air and push plunger to the 10-ml calibration mark. Wipe pipetting needle and syringe surfaces until clean and dry.

O.5.3.2.7 Weigh fluid-filled syringe and record mass as m_{F1} , expressed in grams.

NOTE When using the pycnometer or retort cup, transfer the fluid from the syringe, weigh all, and record total mass as m_{F1} , expressed in grams.

O.5.3.2.8 Stop viscometer rotation at the end of the 30-min test period.

O.5.3.2.9 Repeat subclause O.5.3.2.6, except take sample from the collection well of the Sag Shoe. Use the pipetting needle tip to find the collection well.

O.5.3.2.10 Weigh fluid-filled syringe and record total mass as m_{F2} , expressed in grams.

² Multimixer Model 9B with B29 impeller is an example of a suitable product available commercially. This information is given for the convenience of users of this ISO 10414-2/API RP 13B-2, and does not constitute an endorsement by ISO or API of this product.

³ Hamilton Beach Mixer Cup No. M110-D is an example of a suitable product available commercially. This information is given for the convenience of users of this ISO 10414-2/Api RP 13B-2, and does not constitute an endorsement by ISO or API of this product.

⁴ Delrin is an example of a suitable material available commercially. This information is given for the convenience of users of ISO 10414-2/API RP 13B-2, and does not constitute an endorsement by either ISO or API of this product.

NOTE When using the pycnometer or retort cup, transfer the fluid from the syringe, weigh all, and record total mass as m_{F2} , expressed in grams.

O.5.3.3 Bed pickup measurement (m_{F3}) (optional)

O.5.3.3.1 Gently return the 10-ml test sample from the fluid-filled syringe obtained in subclause O.5.3.2.9 to the Sag Shoe collection well.

O.5.3.3.2 Run viscometer at 600 r/min for 20 min.

O.5.3.3.3 Collect sample from Sag Shoe collection well as in subclause O.5.3.2.9. Weigh fluid-filled syringe and record total mass as m_{F3} , expressed in grams.

O.5.4 Calculation

O.5.4.1 Calculate the BVSST using the following equation.

$$B_{VSST} = 0,8345 (m_{F2} - m_{F1}) \quad (O.8)$$

where

B_{VSST} is the amount of weight-material sag, expressed in pounds-mass per gallon;

m_{F1} is the mass of drilling fluid following shear at 100 r/min, expressed in grams;

m_{F2} is the mass of drilling fluid taken from Sag Shoe following shear at 100 r/min, expressed in grams;

Report B_{VSST} in pounds-mass per gallon.

O.5.4.2 Calculate optional R_{BPU} using the following equation.

$$R_{BPU} = \frac{83,45 (m_{F2} - m_{F3})}{B_{VSST}} \quad (O.9)$$

R_{BPU} is the calculated bed pickup measurement ratio, expressed in percentage;

B_{VSST} is the amount of weight-material sag, expressed in pounds-mass per gallon;

m_{F2} is the mass of drilling fluid taken from Sag Shoe following shear at 100 r/min, expressed in grams;

m_{F3} is the mass of drilling fluid taken from Sag Shoe following shear at 600 r/min, expressed in grams;

Report R_{BPU} as a percentage (%).