

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MATHEUS DE MOURA JORGE  
MATHEUS STRAPAÇÃO HEINE

**ANÁLISE DIMENSIONAL E EFICIÊNCIA DE LIMPEZA EM  
POÇOS COM CIRCULAÇÃO DIRETA E REVERSA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO  
(TCC2 – 46)

CURITIBA

2017

MATHEUS DE MOURA JORGE  
MATHEUS STRAPAÇÃO HEINE

## **ANÁLISE DIMENSIONAL E EFICIÊNCIA DE LIMPEZA EM POÇOS COM CIRCULAÇÃO DIRETA E REVERSA**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Matos Germer

Coorientador: Eng. Rubens R. Fernandes, MSc

CURITIBA

2017

## TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "ANÁLISE DIMENSIONAL E EFICIÊNCIA DE LIMPEZA EM POÇOS COM CIRCULAÇÃO DIRETA E REVERSA", realizado pelos alunos MATHEUS DE MOURA JORGE e MATHEUS STRAPAÇÃO HEINE, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Eduardo Matos Germer  
DAMEC, UTFPR  
Orientador

Prof. Dr. Giuseppe Pintaúde  
DAMEC, UTFPR  
Avaliador

Prof. Dr. César Otaviano Ribeiro Negrão  
DAMEC, UTFPR  
Avaliador

Curitiba, 30 de novembro de 2017.

## RESUMO

Jorge, M. de M, Heine, M. S. de. **Análise dimensional e eficiência de limpeza em poços com circulação direta e reversa**. 2017, 75f, Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

Bancadas experimentais em escala reduzida, que representam perfurações de poços de petróleo, são utilizadas devido à dificuldade em reproduzir situações de perfuração e/ou extração de petróleo em escala real. Para garantir a representatividade dos resultados, de forma que possam ser extrapolados para o campo, usa-se a teoria do modelo. Segundo ela, experimentos similares guardam entre si três tipos de semelhança, a geométrica, a cinemática e a dinâmica. Para uma melhor aproximação de experimentos com escoamento de fluidos, como os escoamentos que ocorrem em operações de perfuração, onde o fluido carrega os cascalhos para a superfície, deve-se ainda respeitar a semelhança cinemática e a semelhança dinâmica, representada por grupos adimensionais, como o número de Reynolds. Destas condições de semelhança, a mais difícil de ser respeitada é a semelhança dinâmica, devido ao grande número de adimensionais envolvidos no processo. Uma forma de resolver isto é definindo quais os grupos adimensionais são mais representativos no escoamento. A primeira parte deste trabalho teve com objetivo definir que grupos são estes para o caso em estudo. Através de revisão bibliográfica verificou-se que para o caso estudado, os principais números adimensionais são os de Reynolds e Stokes. Com isto, foi desenvolvida uma planilha com a faixa de Re de vários poços, a qual foi utilizada para determinar os parâmetros utilizados na bancada. Em seguida, foi analisado o adimensional de Stokes para determinar os parâmetros das partículas utilizadas. Para simplificar a geometria da broca, foram usadas duas colunas, com razões de contração ( $\beta$ ) de 2,12 e de 4,25, manteve-se o Reynolds no anular em 4600 e foram analisadas as retiradas de partículas com a contração a 45 e 90 mm de distância do fundo do poço, usando circulação direta e reversa. Os resultados mostraram que operando na circulação direta, ambas as contrações apresentaram uma maior taxa de limpeza estando a 90 mm do fundo do poço. O contrário foi observado na circulação reversa,

a altura menor, 45 mm, apresentou uma melhor taxa de limpeza. Já comparando as duas contrações, em ambas as circulações, a coluna com  $\beta = 2,12$  obteve melhores resultados.

**Palavras-chave:** análise dimensional, circulação direta, circulação reversa, eficiência de limpeza.

## Abstract

Jorge, M. de M, Heine, M. S. de. **Dimensional analysis and cutting cleaning capacity on wells with direct and reverse circulation**. 2017, 75f, Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

Small scale experimental stands, which represent oil and gas drilling wells, are often used due the difficulty to reproduce drilling situations in real scale. To assure the representation of outcome, in a way that they might be extrapolated to field, it is used the model theory. According to it, similar experiments have geometrical, kinematics and dynamics similarities. To a better representation of experiments that use a fluid flowing, like the one that occurs on well drillings, where the fluid carry the cuttings to the surface, the kinematic and dynamic similarity must be observed, represented by dimensionless groups, such as Reynolds number. From these conditions of similarity, the most difficult to represent is the dynamic, due the large number of dimensionless involved. A way to solve it is to define which are the dimensionless that better represent the flow. The first part of this paper aimed to define wich groups are the best to the case studied. Through the literature review it could be noted that for the case studied, the two main dimensionless numbers are Reynolds and Stokes. With this in mind, it was created a spreadsheet with a range of Re from various wells, wich was used to determine parameters that would be used in the experimental stand. Then, the dimensionless number of Stokes was analyzed to ascertain parameters of the particle used. To simplify the geometry of the bit, two contractions were used ( $\beta=2,12$  and  $4,25$ ), the annulus Reynolds number was kept at 4600 and the cuttings carrying capacity was analyzed with the contraction at 45 and 90 mm from the bottom of the well, using both direct and reverse circulations. Results show that working with direct circulation, both contractions present a better carrying capacity being at 90 mm from the bottom of the well. The opposite was observed using reverse circulation, the lower height, 45 mm, presented a better carrying capacity. However, comparing both contractions, operating on both circulations, the column with contraction  $\beta=2,12$  presented better results.

**Key-words:** dimensional analysis, direct circulation, reverse circulation, cuttings carrying capacity,

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Representação das circulações direta (a) e reversa (b) em processos de perfuração. ....	12
Figura 1.2 - Desenvolvimento das características da unidade experimental. ....	15
Figura 2.1 - Gráfico de tensão de cisalhamento por taxa de deformação para dois fluidos newtonianos. ....	22
Figura 2.2 - Gráfico de tensão de cisalhamento por taxa de deformação. ....	23
Figura 3.1 - Parâmetros chave que podem ser usados para controlar a limpeza do poço. Adaptado de: Nazari <i>et al.</i> (2010). ....	32
Figura 3.2 - Ilustração da formação de vórtices de Taylor em um anular. FONTE: Adaptado de Belavadi e Chukuwu (1994). ....	33
Figura 3.3 - Gráfico taxa de deformação por tensão de cisalhamento dos fluidos listados. ....	40
Figura 4.1 - Esquema da bancada experimental. ....	45
Figura 4.2 - Aparato utilizado para evitar a evasão de partículas antes de serem depositadas no fundo do poço. ....	50
Figura 4.3 - Esquema da bancada adaptada com a peneira. Adaptado de: Vieira (2017). ....	51
Figura 4.4 - Esquema do método utilizado para a secagem das partículas. ....	52
Figura 5.1 – Comparação dos números de Reynolds do anular dos poços reais operando com os fluidos listados com os números de Reynolds do anular limitadores da unidade experimental analisada. ....	58
Figura 5.2 - Resultado da eficiência de limpeza operando com circulação direta. ....	64
Figura 5.3 – Resultado da eficiência de limpeza operando com circulação reversa. ....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Parâmetros de operações de perfuração reais. ....	38
Tabela 3.2 - Dados reológicos para mistura de bentonita+água e bentonita+água+lignita. ....	39
Tabela 3.3 - Comparação entre situação em campo e experimental. ....	41
Tabela 3.4 - Parâmetros dos experimentos analisados. ....	43
Tabela 5.1 - Viscosidade aparente por taxa de deformação. ....	54
Tabela 5.2 - Taxa de deformação dos poços. ....	55
Tabela 5.3 - Viscosidades aparentes (Pa.s) dos poços com cada fluido. ....	56
Tabela 5.4 – Números de Reynolds da região anular das combinações de poços e fluidos. ....	56
Tabela 5.5 – $Re_{anular}$ máximo e mínimo operáveis na bancada. ....	57
Tabela 5.6 - Vazão determinada para operar a bancada. ....	59
Tabela 5.7 - $Re_{contração}$ utilizados. ....	60
Tabela 5.8 - Diâmetros admitidos segundo similaridade geométrica. ....	61
Tabela 5.9 - Stokes mínimo e máximo do poço e fluido analisados. ....	61
Tabela 5.10 - Dados fornecidos pelo fabricante acerca do particulado utilizado. ....	61
Tabela 5.11 - Stokes da bancada analisada. ....	62
Tabela 5.12 - Similaridade geométrica. ....	62
Tabela 5.13 - Parâmetros respeitanto a constante de similaridade. ....	63

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

### Símbolos Latinos

$g$	Aceleração da gravidade [m/s <sup>2</sup> ]
$A$	Área [m <sup>2</sup> ]
$C_d$	Coefficiente de Arrasto [-]
$L$	Comprimento [m]
$D$	Diâmetro [m]
$E$	Empuxo [N]
$F_a$	Força de Arrasto [N]
$F_g$	Força Gravitacional [N]
$u_R$	Incerteza do experimento [-]
$u_A$	Incerteza padrão tipo A [-]
$u_B$	Incerteza padrão tipo B [-]
$n$	Número de observações [-]
$Re$	Número de Reynolds [-]
$St$	Número de Stokes [-]
$Q$	Vazão volumétrica [m <sup>3</sup> /s]
$q_k$	Valor das observações [-]
$R$	Variável analisada [-]
$V$	Velocidade [m/s]
$v$	Volume [m <sup>3</sup> ]

### Símbolos Gregos

$\sigma$	Desvio Padrão [-]
$\varepsilon$	Fração Volumétrica [-]
$\rho$	Massa Específica [kg/m <sup>3</sup> ]
$\mu$	Viscosidade dinâmica [Pa.s]
$\lambda$	Tempo característico [s]
$\tau$	Tensão de Cisalhamento [Pa]
$\nu$	Viscosidade cinemática [m <sup>2</sup> /s]

### Subscritos

$m$	Referente à mistura
-----	---------------------

$\rho$   
 $c$

Referente à partícula  
Referente ao fluido

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	Contextualização do Tema	11
1.2	Caracterização do Problema	12
1.3	Objetivos	13
1.4	Justificativa	14
1.5	Organização do trabalho	15
<b>2</b>	<b>Fundamentação Teórica</b>	<b>17</b>
2.1	Escoamento em Tubos	17
2.1.1	Escoamento laminar e turbulento	17
2.2	Escoamento Bifásico Líquido-Sólido	17
2.2.1	Forças atuantes na partícula	19
2.3	Processo de Perfuração de poços de petróleo	20
2.3.1	Fluidos de Perfuração	20
2.4	Classificação Reológica dos Fluidos	21
2.4.1	Fluidos Newtonianos	21
2.4.2	Fluidos Não newtonianos	22
2.5	Análise dimensional	23
2.5.1	Similiaridade geométrica	24
2.5.2	Similaridade cinemática	25
2.5.3	Similaridade dinâmica	26
2.5.4	Conclusão da utilização da análise dimensional	28
2.6	Análise de incertezas experimentais	28
2.6.1	Incerteza-padrão do tipo A	29
2.6.2	Incerteza-padrão do tipo B	29
2.6.3	Aplicação no presente trabalho	30
2.7	Síntese do capítulo	30
<b>3</b>	<b>Revisão da literatura</b>	<b>32</b>
3.1	Parâmetros significativos para avaliação da limpeza de poços	32
3.2	Similaridade geométrica e dinâmica	34
3.3	Análise de circulação direta	34
3.4	Análise da circulação reversa	37
3.5	Parâmetros operacionais de campo	38
3.6	Cálculo da eficiência de limpeza	41
3.7	Síntese do capítulo	42
<b>4</b>	<b>Materiais e métodos</b>	<b>44</b>
4.1	Descrição da bancada	44
4.1.1	Contração	45
4.2	Partícula de trabalho	46
4.3	Fluido de trabalho	46
4.4	Metodologia	47
4.4.1	Definição dos números adimensionais	48
4.4.2	Eficiência de limpeza	49
4.5	Síntese do capítulo	52
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>54</b>
5.1	Definição dos parâmetros do fluido	54

5.2	Definição dos parâmetros da partícula	60
5.2.1	Similaridade geométrica	62
5.3	Consideração sobre a análise dimensional	63
5.4	Eficiência de limpeza	63
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
	REFERÊNCIAS	68

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização do Tema

Por ser a fonte de energia mais utilizada desde a Segunda Revolução industrial (PAREJO, 2006), o petróleo atrai grande interesse comercial em todo o mundo, incluindo o Brasil. Relatos indicam que no Brasil, a exploração de petróleo foi realizada pela primeira vez no ano de 1864, porém o petróleo obtido era de baixa qualidade (DIAS e QUAGLINO, 1993). A descoberta de petróleo em águas ultraprofundas ocorreu somente no ano de 1985, (PINTO, 2016), sendo este produto de boa qualidade e com alto valor comercial (PETROBRAS, 2016).

Desde então, observou-se um grande avanço nas tecnologias envolvendo a perfuração de poços em águas ultraprofundas. Esses desenvolvimentos resultaram na redução do tempo de perfuração de um poço, que caiu de 310 dias em 2010 para apenas 89 no começo de 2016. Em paralelo, o valor de extração de um barril de óleo equivalente (óleo + gás) passou de US\$ 9,1 em 2014 para menos de US\$8 no primeiro trimestre de 2016 (PETROBRAS, 2016).

O processo de perfuração se dá pelo cisalhamento da formação rochosa, que ocorre devido à rotação de uma broca, associada à aplicação de uma força desta broca sobre a rocha (BOURGOYNE *et al.*, 1991). Tanto a rotação quanto a pressão, exercidas na broca, são realizadas por meio da coluna de perfuração. Para realizar a retirada do particulado gerado pelo cisalhamento para a superfície, e continuar o processo de perfuração, é utilizado um fluido, que se convencionou chamar de fluido de perfuração.

A circulação desse fluido no processo pode ocorrer de duas formas, a circulação direta e a circulação reversa, como exemplificado pela Figura 1.1.

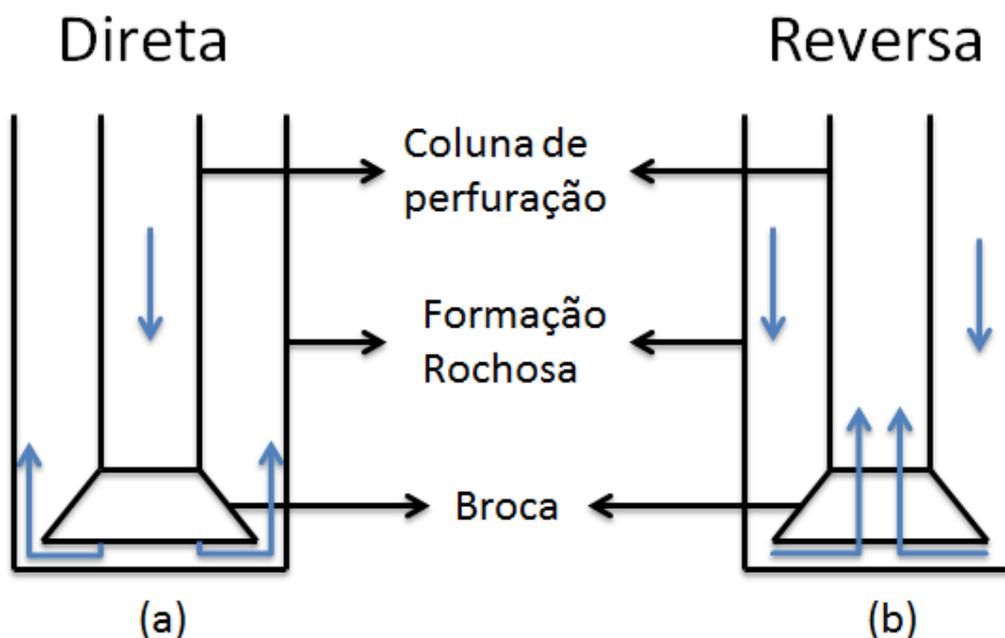


Figura 1.1 - Representação das circulações direta (a) e reversa (b) em processos de perfuração.

Pelo método da circulação direta (Figura 1.1(a)), o fluido é bombeado pelo interior da coluna de perfuração em direção à broca, sendo acelerado em canais dentro da broca, e liberado em jatos no fundo do poço, retornando à superfície carregando os cascalhos pela parte anular. Já pelo método de circulação reversa (Figura 1.1 (b)), o fluido é bombeado pela parte anular em direção ao fundo do poço, retornando pelo centro da coluna de perfuração em direção à superfície (LICHANG, 2006).

## 1.2 Caracterização do Problema

Devido à grande demanda por petróleo, tem-se buscado obter o produto de formas que anteriormente não eram usuais, como por exemplo o petróleo a partir do xisto, retirado nos EUA. Ou mesmo em regiões de difícil acesso, como no caso do Brasil, o petróleo do chamado pré-Sal, localizado em águas ultraprofundas.

Essa dificuldade de obtenção deste recurso por estes novos meios, faz com que o custo de extração do petróleo seja elevado, fazendo-se necessário o aprimoramento de técnicas, materiais e a obtenção de parâmetros mais precisos para uma exploração mais rápida, confiável e de menor custo.

Reproduzir de forma adequada o comportamento hidrodinâmico dos fluidos, ao escoar durante a perfuração de poços em águas ultraprofundas, não é uma tarefa trivial. A dificuldade está relacionada às dimensões, velocidades, variações de temperaturas, campo de pressões, equipamentos, entre outros fatores limitantes. Assim, a realização de ensaios experimentais torna-se uma tarefa importante, sendo para isto utilizadas bancadas reduzidas, que têm por objetivo reproduzir da melhor forma possível, o que acontece em condições reais de perfuração.

Alguns trabalhos, como o de Sansoni (2005), afirmam que durante a perfuração com circulação direta, existe a possibilidade de que o cascalho obstrua a região anular, inviabilizando a limpeza do poço e levando, em casos extremos, ao seu abandono. O autor cita que, para melhorar a capacidade de carreamento dos cascalhos pelo fluido, algumas ações podem ser tomadas, tais como o aumento da viscosidade do fluido e o aumento da vazão. Além disso, propõe que a circulação reversa seja utilizada para evitar acúmulos de cascalhos na região anular.

A circulação reversa, apesar de pouco utilizada (KUMAR *et al.*, 2005), apresenta possibilidades de melhora no carreamento de cascalhos em relação à circulação direta. Uma forma de confirmar esta afirmação é realizando ensaios em laboratório, onde o foco não seja necessariamente o processo de perfuração em si, com toda a sua complexidade (rotação, corte, etc), mas focando somente na circulação e na retirada de particulado. Tal processo, se bem definido, pode dar uma indicação qualitativa e quantitativa do processo de limpeza do poço.

### **1.3 Objetivos**

O principal objetivo deste trabalho foi a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos necessários para uma melhor representação dos poços de perfuração, em bancadas de tamanho reduzido. Após definidos estes parâmetros, foi utilizado o trabalho de Kelessidis *et al.* (2004) para definir valores para realização de alguns testes experimentais. Tais testes foram executados na bancada experimental projetada e construída por Santos (2015).

Os experimentos tiveram como foco a avaliação da eficiência de limpeza do poço, utilizando tanto a circulação direta quanto a reversa. Para isto foram usados os parâmetros definidos na etapa anterior. A metodologia de operação da bancada e

determinação da eficiência de limpeza foi baseada no procedimento desenvolvido por Vieira (2016), sendo que algumas modificações/melhorias foram implementadas.

Para viabilizar essas etapas, algumas simplificações em relação ao modelo real foram consideradas: não haverá rotação na coluna de perfuração; o fluido utilizado será a água; a broca será modelada por uma contração abrupta; e o particulado estará solto no fundo do poço, não havendo simulação do processo de perfuração (corte/ruptura de rocha). Desta forma, as características das operações de perfuração, tanto direta quanto reversa, que foram mantidas são: escoamento em tubos verticais e concêntricos contendo uma redução de área próxima à broca, e o arrasto de particulado pelo fluido.

#### **1.4 Justificativa**

Martins (1996) afirma que para se realizar um experimento em escala reduzida, é essencial que se tenha um modelo que represente bem as condições da realidade que se deseja retratar. Se as condições avaliadas não forem bem representadas, pode-se acabar avaliando variáveis que não condizem com as das condições reais de perfuração.

Na zona do pré-sal o valor da exploração do petróleo é bastante elevado. Segundo Machado e Lage (2008) o custo total pode chegar a US\$1,2 trilhão. Isto significa que avaliações erradas de processos possam levar a perdas financeiras significativas.

Desta forma, acredita-se que este trabalho possa auxiliar no desenvolvimento de procedimentos de ensaios experimentais cada vez mais representativos de processos reais de perfuração. Assim como indicar, com base nos parâmetros obtidos na bancada utilizada, como se comportam os processos de limpeza de poço usando a circulação direta e a reversa.

Esses mesmos parâmetros foram analisados por Vieira (2017), mas em condições que não necessariamente retratam operações reais de perfuração. Buscou-se com este trabalho, uma primeira abordagem em definições melhores para valores desejáveis de determinadas propriedades de fluido e partícula, de modo que o experimento represente mais adequadamente o processo de perfuração real,

fazendo com que as análises realizadas na bancada sejam mais aproximadas de condições reais.

O processo de criação da unidade experimental que foi utilizada ocorreu em etapas. Desde sua concepção, até o presente momento, algumas adaptações foram feitas para que ela pudesse operar com características mais fieis à realidade. Vieira (2017) adaptou a bancada para operar com circulação reversa além de direta. A Figura 1.2 apresenta algumas das etapas de aperfeiçoamento da unidade em seu desenvolvimento para que proporcione uma melhor representatividade de poços reais. Com isso, pretende-se que este trabalho seja mais um passo no processo de obtenção de resultados que representem condições reais de campo.

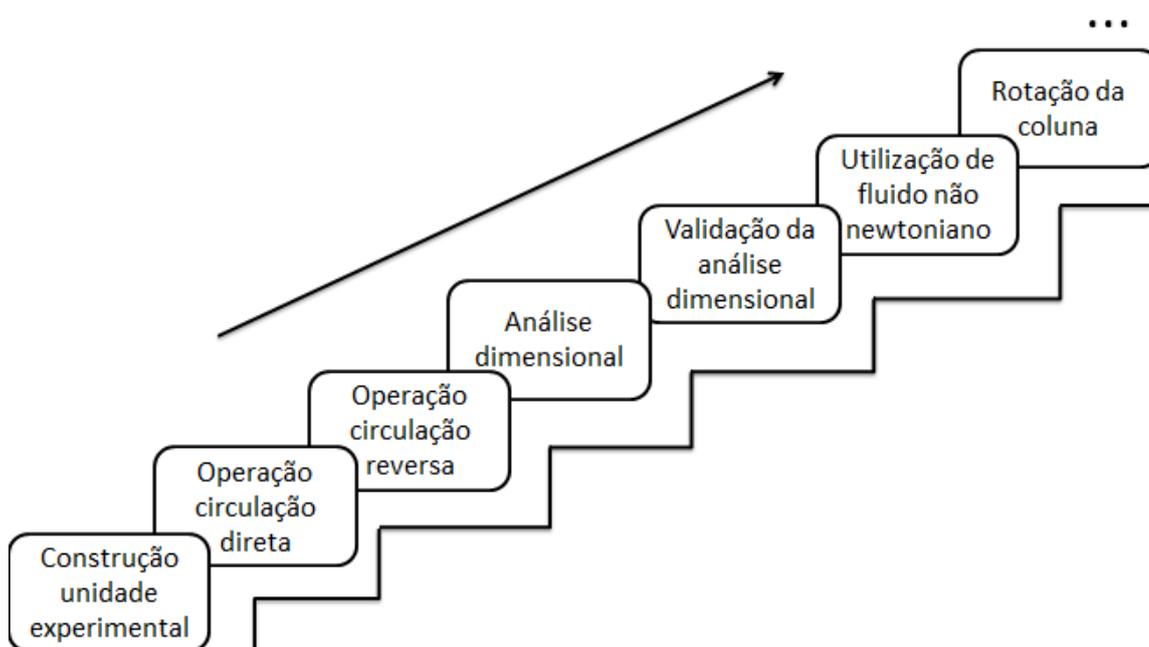


Figura 1.2 - Desenvolvimento das características da unidade experimental.

## 1.5 Organização do trabalho

Este trabalho está dividido em seis capítulos. No primeiro capítulo é feita uma breve introdução ao tema, citando o problema e objetivos. No segundo capítulo são apresentados conceitos de mecânica dos fluidos necessários para o entendimento do assunto. Apresentam-se também conceitos mais específicos do tema, como por exemplo, fluidos de perfuração. No Capítulo 3 é apresentada uma revisão da literatura acerca do tema, citando trabalhos relevantes abordando tanto a circulação direta quanto a reversa. Apresentam-se ainda dados de perfurações reais nesta seção. Já o Capítulo 4 expõe a metodologia que foi aplicada para desenvolver o

presente trabalho, descrevendo a bancada e citando o critério que foi usado para determinar as propriedades da partícula e do fluido. No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos derivados da análise dimensional e da eficiência de limpeza, operando nas condições determinadas. No Capítulo 6 é feita uma breve consideração em relação ao trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Escoamento em Tubos

São escoamentos em que há a completa limitação sólida ao redor do fluido. Escoamentos em tubos, dutos, bocais, entre outros, podem ser considerados escoamentos internos (FOX *et al.*, 2009).

Os escoamentos internos e externos podem ser divididos em laminares e turbulentos. Os escoamentos laminares em tubos circulares podem ser resolvidos analiticamente, enquanto os turbulentos, muitas vezes devem ser analisados com base em modelos empíricos (FOX *et al.*, 2009) e simulações numéricas.

#### 2.1.1 Escoamento laminar e turbulento

O escoamento laminar é aquele em que o fluido permanece em lâminas que não se misturam umas às outras. Considerando um tubo reto, quando ocorre um aumento da vazão do fluido até certo ponto, o fluido começa a perder a linearidade do movimento, ocorrendo um movimento aleatório e variações de velocidades no interior do tubo (FOX *et al.*, 2009).

Alguns dos fatores que influenciam a passagem do escoamento laminar para o turbulento são a velocidade, a presença de uma superfície sólida, alguma força de campo, e a viscosidade do fluido. Para analisar o comportamento do escoamento, usa-se o número de Reynolds ( $Re$ ). Quando  $Re$  é maior que 2300 em tubos circulares, o escoamento pode ser considerado turbulento (FOX *et al.*, 2009). Maiores discussões sobre o número de Reynolds serão tratadas na seção 2.5.3.1.

### 2.2 Escoamento Bifásico Líquido-Sólido

Em diversas aplicações, como as presentes nas indústrias do petróleo e alimentícias, produtos são transportados através de tubulações. Nesse transporte podem ocorrer escoamentos de duas fases (líquido-sólido), o que leva à necessidade de um estudo mais aprofundado sobre esse tipo de escoamento (PEKER e HELVACI, 2011).

Na indústria do petróleo, um dos casos em que se observa o escoamento bifásico líquido-sólido corresponde ao processo de perfuração de poços. Nesse

processo os cascalhos são removidos pelo fluido de perfuração, gerando assim um escoamento bifásico.

Durante o processo de remoção das partículas sólidas, existe a possibilidade de aprisionamento no poço, causando uma redução na área de passagem do fluido de perfuração. Essa redução na área ocasiona um aumento de velocidade e por consequência um aumento na queda de pressão. Elevadas taxas de perda de pressão são totalmente indesejadas neste tipo de procedimento, pois a perda de carga resulta em uma maior dificuldade no transporte das partículas sólidas (ZHANG, *et al.*, 2015).

Segundo Mishra *et al.*, (1997), os parâmetros mais importantes no transporte de sólidos em escoamento de líquido são a velocidade do fluxo e o tamanho da partícula.

Para determinar a proporção entre as fases é necessário calcular a fração volumétrica ( $\varepsilon$ ), definida por (LOTH, 2010):

$$\varepsilon = \frac{v}{v_m} \quad (0.1)$$

Em que  $v_m$  é o volume da mistura e  $v$  é o volume do sólido ou líquido, dependendo da proporção que está sendo calculada.

Em escoamentos líquido-sólido, ocorre o transporte das partículas sólidas pelo líquido. O tamanho das partículas sólidas tem influencia importante na modelagem do escoamento.

Quanto ao tamanho das partículas, existem dois casos possíveis, os de partículas coloidais e os de partículas não coloidais. Denomina-se suspensão coloidal aquela onde a partícula é de tamanho de ordem nanométrica, como por exemplo, alguns géis (PEKER e HELVACI, 2011). As suspensões de partículas coloidais usualmente apresentam características reológicas não newtonianas, como tensão limite de escoamento e dependência do tempo. No transporte de cascalhos durante o processo de perfuração, uma parcela considerável dos cascalhos não são coloidais, pois o seu tamanho é consideravelmente maior, sendo que algumas vezes podem chegar a centímetros. Dessa forma, nesse trabalho serão consideradas

dispersões não coloidais, e não serão considerados os efeitos não newtonianos provocados pelas partículas dispersas no fluido.

### 2.2.1 Forças atuantes na partícula

A primeira das forças atuantes sobre a partícula é a força peso, ou força gravitacional ( $F_g$ ). Esta força é classificada como uma força de campo, e toda partícula englobada por esse campo está submetido à sua ação. A força gravitacional de uma partícula é expressa em termos de sua massa específica ( $\rho$ ) e volume ( $v$ ) (PEKER e HELVACI, 2011) e é representada pela Equação (2.2).

$$F_g = \rho_p v_p g \quad (0.2)$$

Em que  $g$  representa a aceleração da gravidade e o subíndice p indica a partícula.

Outra força que atua sobre a partícula é o empuxo. Esta é uma força que age sobre qualquer corpo imerso em um fluido, sendo sua ação no sentido contrário ao da força gravitacional. É proporcional ao volume de líquido deslocado ( $v_l$ ), à aceleração da gravidade ( $g$ ) e à massa específica do líquido ( $\rho_l$ ) (PEKER e HELVACI, 2011), conforme representado pela Equação (2.3):

$$E = v_l \rho_l g \quad (0.3)$$

E finalmente a última força a ser citada, mas de extrema importância para o estudo do movimento das partículas sólidas imersas em fluido, é a força de arrasto. Essa força sempre atua na direção contrária à velocidade relativa entre o fluido e a partícula, e pode ser compreendida como a resistência ao movimento da partícula. O arrasto é dependente da velocidade relativa ( $V$ ) entre a partícula e o fluido, da massa específica do meio líquido ( $\rho_l$ ), e do diâmetro da partícula ( $D_p$ ) (PEKER e HELVACI, 2011), é representada por:

$$F_a = \frac{C_D \pi \rho_l D_p^2 V^2}{8} \quad (0.4)$$

Em que o coeficiente de arrasto ( $C_D$ ) é dependente da velocidade da partícula, da viscosidade do fluido, da forma da partícula e rugosidade superficial da partícula.

### **2.3 Processo de Perfuração de poços de petróleo**

Durante o processo de perfuração ocorre o cisalhamento da rocha devido à rotação da coluna de perfuração. Na extremidade desta coluna, acopla-se uma broca que aplica uma força normal sobre a rocha (peso da coluna). À rocha removida do substrato dá-se o nome de cascalho. Este material gerado pela trituração e cisalhamento da rocha precisa ser retirado do fundo do poço. Essa remoção é usualmente realizada pelo fluido de perfuração.

Existem duas possibilidades de transporte desses cascalhos. A primeira é quando o fluido é injetado pelo interior da coluna de perfuração e retorna à superfície pelo espaço anular formado pela parede do poço e a coluna, que é conhecido como circulação direta. Outra possibilidade consiste em injetar o fluido pelo espaço anular e, dessa forma, transportar os cascalhos pelo interior da coluna de perfuração, em um processo conhecido como circulação reversa (THOMAS *et al.*, 2001).

#### **2.3.1 Fluidos de Perfuração**

Fluidos de perfuração devem desempenhar diversas funções durante o processo de perfuração. Dentre essas funções, podem-se citar o transporte dos cascalhos gerado pela broca até a superfície, a manutenção da estabilidade da parede do poço e a lubrificação da broca (THOMAS *et al.*, 2001).

Algumas características do fluido de perfuração são de extrema importância para garantir uma perfuração rápida e segura, tais como ser estável quimicamente, estabilizar as paredes do poço e facilitar a separação dos cascalhos na superfície (DARLEY e GRAY, 1988). É essencial que quando o escoamento estiver em repouso, o fluido de perfuração se gelifique mantendo os sólidos em suspensão. Outras características importantes são de ser inerte em relação às rochas produtoras, ser bombeável e apresentar custo compatível com a operação. (THOMAS *et al.*, 2001).

A principal classificação dos fluidos de perfuração é de acordo com seu fluido base, onde neste caso tem-se os fluidos à base de água, à base de óleo e à base de gás (CAENN *et al.*, 2011).

Fluidos de perfuração a base de água geralmente são usados para perfurar formações com maior grau de dificuldade de penetração (HOSSAIN e AL-MAJED, 2015). Durante a perfuração, se for necessário prevenir ou eliminar danos à formação é recomendado o uso de fluidos de perfuração à base de óleo (BOURGOYNE *et al.*, 1991; ABDO e HANEEF, 2012).

## 2.4 Classificação Reológica dos Fluidos

O comportamento de um fluido em escoamento é dependente das suas propriedades reológicas, que afetam diretamente a perda de carga do fluido ao escoar na tubulação. Além disto, as propriedades reológicas influenciam diretamente a capacidade de transportar partículas / sólidos. (THOMAS *et al.*, 2001). A literatura classifica os fluidos como newtonianos e não newtonianos.

### 2.4.1 Fluidos Newtonianos

Alguns fluidos como água, ar ou gasolina são classificados como fluidos Newtonianos, pois sua taxa de deformação é proporcional à tensão de cisalhamento. Considerando um escoamento cisalhante unidimensional, a tensão de cisalhamento é dada pela relação linear (ÇENGEL e CIMBALA, 2007):

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (0.5)$$

Em que  $\mu$  é a viscosidade dinâmica (ou absoluta) e  $\dot{\gamma}$  é a taxa de deformação. A Figura 2.1 ilustra que a taxa de deformação de um fluido newtoniano é proporcional à tensão de cisalhamento. Desta forma, a constante de proporcionalidade entre essas duas grandezas é a viscosidade dinâmica.



**Figura 2.1 - Gráfico de tensão de cisalhamento por taxa de deformação para dois fluidos newtonianos.**

**Adaptado de: Çengel e Cimbala, 2007.**

Uma característica observada do gráfico é que a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação é linear. Para um fluido mais viscoso (óleo) é necessário uma tensão de cisalhamento mais elevada para obter uma mesma taxa de deformação que um fluido menos viscoso (água).

#### **2.4.2 Fluidos Não newtonianos**

Dentre os diferentes tipos de fluidos não newtonianos, destacam-se os fluidos newtonianos generalizados. A tensão de cisalhamento desses materiais depende apenas da taxa de deformação instantânea, e ao contrário dos fluidos newtonianos, apresenta uma relação não linear com a taxa de deformação.

Se nos fluidos newtonianos o coeficiente de proporcionalidade (viscosidade dinâmica) é constante, nos fluidos não newtonianos este coeficiente é variável. Tal coeficiente é dito viscosidade aparente do fluido.

Na Figura 2.2, a viscosidade aparente do fluido é dada pela inclinação da curva de tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para diferentes tipos de fluidos newtonianos generalizados (ÇENGEL e CIMBALA, 2007).

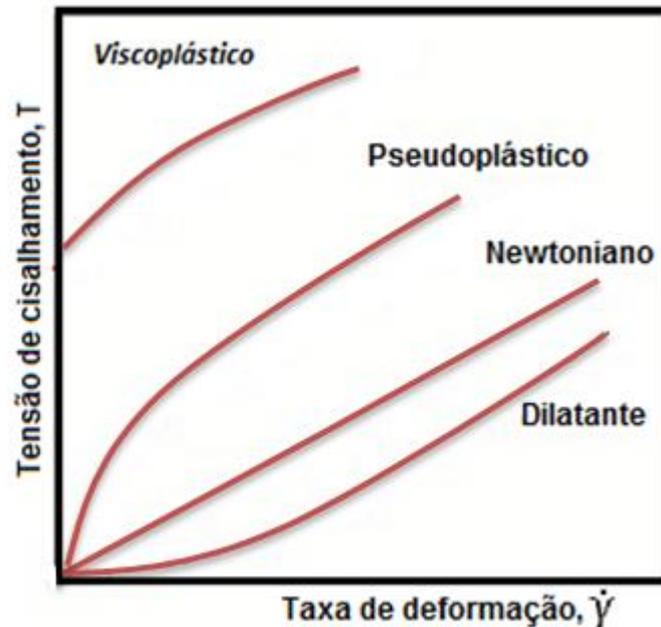


Figura 2.2 - Gráfico de tensão de cisalhamento por taxa de deformação.  
Adaptado de: Çengel e Cimbala, 2007.

Nos casos em que a viscosidade aparente aumenta com a taxa de deformação são nominados como fluidos dilatantes. Fluidos que se tornam menos viscosos à medida que a tensão de cisalhamento aumenta são denominados como fluidos pseudoplasticos. Tintas, soluções de polímeros ou algumas suspensões de partículas sólidas em líquidos são exemplos de fluidos pseudoplasticos (ÇENGEL e CIMBALA, 2007).

Existem fluidos que se comportam de forma predominantemente elástica até que sua tensão limite de escoamento é excedida, e apenas então passam a apresentar comportamento viscoso. Esses materiais são conhecidos como fluidos elastoviscoplasticos. Fluidos de perfuração são exemplos desse tipo de fluido (FOX *et al.*, 2009).

## 2.5 Análise dimensional

Muitos experimentos são realizados em escalas geométricas reduzidas, pois geralmente há uma grande dificuldade em realizá-los em bancadas em escala real, devido aos altos custos e elevado tempo de testes. Porém, é necessário atenção na

mudança adequada de escala dos resultados. Uma ferramenta com a função de resolver esse tipo de problema é análise dimensional.

A garantia de que a física envolvida no protótipo possa ser prevista no modelo real, e prever tendências entre os parâmetros, também são funções da análise dimensional (ÇENGEL e CIMBALA, 2007).

Para atingir a similaridade por completo é necessário que três etapas sejam satisfeitas. A primeira condição diz que o modelo deve ter a mesma forma do protótipo, mas podendo ser escalonado (similaridade geométrica). A velocidade do escoamento do modelo em um determinado ponto deve ser proporcional (escalonada) à do protótipo. Essa condição se dá pela similaridade cinemática, que pode ser relacionada com a equivalência em escala de tempo. A terceira condição é referente à situação em que as forças do escoamento no modelo são proporcionais ao do protótipo (similaridade dinâmica) (ÇENGEL e CIMBALA, 2007).

### **2.5.1 Similaridade geométrica**

Uma fiel reprodução da situação real é de extrema importância para uma representação satisfatória em escala reduzida. A similaridade geométrica é a primeira condição para a obtenção da similaridade entre modelo e protótipo. Para garantir a semelhança geométrica, o modelo deve ser uma réplica (em escala) perfeita do protótipo e garantir que sempre exista a mesma relação de semelhança geométrica para todas as dimensões do modelo em relação ao do protótipo, inclusive a rugosidade.

#### **2.5.1.1 Similaridade geométrica aplicada à experimentos envolvendo perfurações de poços**

Sendo de grande relevância para o experimento em análise, a similaridade geométrica deve ser mantida por todas as seções do modelo. Para a unidade experimental analisada, as dimensões que devem seguir o fator de escala são: diâmetro interno do poço, diâmetro interno e externo da coluna de perfuração, diâmetro interno da contração e o comprimento do poço, conforme representado pela Equação (2.6).

$$\lambda = \frac{D'_{ic}}{D''_{ic}} = \frac{D'_{ec}}{D''_{ec}} = \frac{D'_{ip}}{D''_{ip}} = \frac{D'_{icont}}{D''_{icont}} = \frac{L'}{L''} \quad (0.6)$$

Na Equação (0.6),  $D'_{ic}$ ,  $D'_{ec}$ ,  $D'_{ip}$  e  $D'_{icont}$  representam os diâmetros das seções interna da coluna, externa da coluna, interna do poço e interna da contração, respectivamente. Além disso, o sobrescrito ' representa as dimensões do poço e o sobrescrito '' as dimensões da unidade experimental.

### 2.5.2 Similaridade cinemática

O segundo critério de semelhança a ser seguido é a similaridade cinemática, a qual é obtida através da razão de velocidades do fenômeno e do experimento analisado. A proporcionalidade de velocidade é atingida quando a velocidade de pontos correspondentes do modelo e do protótipo apresentam a mesma direção e sentido, porém mantêm uma mesma constante de proporcionalidade para seus módulos em todos os pontos. O regime de escoamento para o modelo e o protótipo também devem ser o mesmo. Para garantir que a similaridade cinemática ocorra, é necessário que a similaridade geométrica seja atendida (FOX *et al.*, 2009).

#### 2.5.2.1 Similaridade cinemática aplicada à experimentos envolvendo perfuração de poços

Avaliando os conceitos apresentados para o caso analisado, nota-se a importância da satisfação da similaridade cinemática para o experimento. Para isso, fazem-se necessárias as velocidades de escoamento do fluido de perfuração e de rotação da coluna de perfuração respeitem uma constante de proporcionalidade, como representado pelas Equações (2.7) e (2.8).

$$k = \frac{\bar{V}'}{\bar{V}''} \quad (0.7)$$

$$w' = k\lambda^{-1}w'' \quad (0.8)$$

Na Equação (0.7),  $\bar{V}$  representa a velocidade média do escoamento. Já na Equação (0.8),  $w$  representa a velocidade angular de rotação da coluna de perfuração.

### 2.5.3 Similaridade dinâmica

Em fenômenos não estáticos, a semelhança dinâmica é fundamental (MARTINS, 1996). A semelhança dinâmica é garantida quando as forças atuantes no modelo e no protótipo mantem uma mesma razão de proporcionalidade. Para facilitar a análise dos fatores influentes no sistema, usam-se números adimensionais, os quais, muitas vezes, reproduzem uma melhor aproximação do fenômeno do que a própria variável.

A seguir são apresentados alguns grupos adimensionais mais importantes para o presente trabalho, são eles os números de Reynolds e de Stokes.

#### 2.5.3.1 Número de Reynolds

Ao analisar um escoamento em uma tubulação vê-se que as propriedades hidrodinâmicas importantes referente ao escoamento do líquido são o diâmetro da tubulação, as propriedades do fluido e as velocidades do escoamento. Utilizando o teorema de PI de Buckingham obtem-se como resultado que o número de Reynolds é o adimensional que relaciona todas essas propriedades, então a semelhança dinâmica de um escoamento se dá pelo número de Reynolds.

O escoamento do modelo e do protótipo podem ter fluidos diferentes, diâmetros diferentes e velocidades diferentes e mesmo assim apresentar semelhança dinâmica, desde que o número de Reynolds do modelo seja igual ao número de Reynolds do protótipo. Tal adimensional é dado por:

$$\text{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (0.9)$$

Na Equação (0.9),  $\rho$  é a massa específica do fluido,  $V$  a velocidade média do escoamento,  $D$  o diâmetro hidráulico (para o caso de tubos/dutos) e  $\mu$  a viscosidade dinâmica do fluido.

Esse adimensional foi usado inicialmente para avaliar escoamentos em tubulações, mas posteriormente foi mostrado que o número de Reynolds pode ser utilizado para outros casos de escoamento (FOX *et al.*, 2009).

Estudos mostraram que a Equação (0.9) é uma importante ferramenta para determinar o regime do escoamento, sendo útil para avaliar se o escoamento é laminar ou turbulento. Escoamentos que apresentam elevados ( $Re$ ), em geral, são turbulentos. Quando as forças inerciais são pequenas comparadas às forças viscosas, assim apresentando baixo  $Re$ , o escoamento é caracterizado como laminar. Em escoamentos internos em tubulações, a transição de laminar para turbulento ocorre quando o valor de  $Re$  ultrapassa 2300 (FOX *et al.*, 2009).

### 2.5.3.2 Número de Stokes

O número adimensional de Stokes faz uma relação entre tempo de relaxamento da partícula, o qual representa o tempo necessário para ocorrer algum movimento molecular (FREIRE, 2012), e o tempo característico do escoamento. O número de Stokes é representado pela Equação (2.10) (ÇENGEL e CIMBALA, 2007).

$$St = \frac{\lambda_p}{\lambda_c} \quad (0.10)$$

Considerando apenas a força de arrasto e supondo que a partícula seja esférica, aplicando a segunda lei de Newton para o movimento temos uma equação para  $\lambda_p$ , representada pela Equação (2.11), em que  $\lambda_p$  é o tempo de relaxação da partícula (BARBOSA, 2015).

$$\lambda_p = \frac{\rho_p D_p^2}{18\mu_c} \quad (0.11)$$

Na Equação (0.11),  $\rho_p$  é a massa específica da partícula,  $\mu_c$  é a viscosidade dinâmica do fluido e  $D_p$  é o diâmetro da partícula.

O comprimento característico do escoamento ( $L_c$ ) e a velocidade do fluido ( $V_c$ ) são os dois fatores relevantes para o cálculo do tempo característico do escoamento ( $\lambda_c$ ). O tempo característico pode ser calculado pela Equação (2.12).

$$\lambda_c = \frac{L_c}{V_c} \quad (0.12)$$

No presente trabalho, o comprimento característico ( $L_c$ ) foi considerado como sendo o diâmetro hidráulico.

Em casos em que a velocidade da partícula se aproxima da velocidade do fluido, ou seja, a partícula se move junto com o fluido, temos um número de Stokes próximo à zero. Em casos em que a partícula apresenta maior resistência ao movimento do fluido (maior inércia), o escoamento apresenta valores maiores de número Stokes (BARBOSA, 2015).

#### 2.5.4 Conclusão da utilização da análise dimensional

Por fim, conclui-se que, com a utilização da análise dimensional em modelos reduzidos por meio do cumprimento das similaridades geométrica, dinâmica e cinemática, há a economia de tempo e dinheiro, podem ser utilizados fluidos diferentes dos fluidos de trabalho e os resultados podem ser extrapolados para a situação real.

## 2.6 Análise de incertezas experimentais

Sempre que medições são realizadas, há erros envolvidos. Segundo Fox *et al.* (2009), dados resultantes de experimento são, muitas vezes, utilizados como base para projetos. Entretanto, a qualidade desses dados nem sempre é boa, fazendo-se necessária uma medida que valide e quantifique a acurácia de tais dados.

Segundo a ISO GUM (2008), a incerteza origina-se de vários fatores, os quais podem ser divididos em dois grupos de acordo com o método utilizado para estimar seus valores:

- A. Erros avaliados por métodos estatísticos;

## B. Erros avaliados por outros meios.

Embora esses dois métodos envolvam uma grande gama de tipos erros possíveis, há ainda a possibilidade de se realizar a análise fazendo uma combinação dos dois.

### 2.6.1 Incerteza-padrão do tipo A

Quando se tem a possibilidade de realizar várias medições, pode-se utilizar a avaliação da incerteza do tipo A para determinar o valor esperado de uma grandeza. Esse tipo de incerteza é obtido fazendo a média aritmética das medições, como mostrado na Equação (2.13).

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (0.13)$$

Em que  $n$  é o número de medições feitas e  $q_k$  são as observações individuais.

Para determinar a dispersão dos valores em relação ao ponto esperado para a grandeza observada, ou seja, o desvio padrão ( $\sigma$ ), utiliza-se a Equação (2.14).

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2} \quad (0.14)$$

### 2.6.2 Incerteza-padrão do tipo B

Para se estimar a incerteza de uma variável observada poucas vezes, como por exemplo, quando um experimento que demora um longo tempo para se realizar, faz-se uso da incerteza do tipo B. Segundo a ISO GUM (2008), esse tipo de incerteza pode levar em conta vários fatores, tais como:

- Dados de medições já realizadas;
- Especificações do fabricante;
- Informações de certificados de calibração;
- Informações de incertezas disponibilizadas por manuais.

Quando a grandeza medida depende de mais de uma variável, Fox *et al.* (2009) propõem a Equação (2.15) para determinar uma estimativa do erro de uma variável  $R$  que depende de  $n$  variáveis, ou seja  $R = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ .

$$u_R = \pm \left[ \left( \frac{x_1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_1} u_1 \right)^2 + \left( \frac{x_2}{R} \frac{\partial R}{\partial x_2} u_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{x_n}{R} \frac{\partial R}{\partial x_n} u_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (0.15)$$

Em que  $u_R$  é a incerteza do experimento,  $x_n$  são as medições das variáveis e  $\partial R / \partial x_n$  são as variações de  $R$  em relação à variável  $x_n$ .

### 2.6.3 Aplicação no presente trabalho

Para o presente trabalho, será utilizada uma combinação das duas incertezas, para isso, a incerteza será aproximada segundo a Equação (2.16). Para minimizar os efeitos de incertezas aleatórias, os experimentos serão executados mais de uma vez, podendo, assim, aplicar a incerteza-padrão do tipo A. Também serão consultados os manuais dos equipamentos utilizados, como por exemplo, balança e medidor de vazão *coriollis* para definir suas incertezas e poder ser calculada a incerteza-padrão do tipo B.

$$\delta = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (0.16)$$

Em que  $u_A$  é a incerteza-padrão do tipo A e  $u_B$  é a do tipo B.

## 2.7 Síntese do capítulo

No capítulo 2 foram apresentados conceitos básicos para a compreensão do trabalho. Primeiramente foram introduzidas as definições de escoamentos que ocorrem em processos de perfurações, como por exemplo, escoamentos em tubos e escoamentos bifásicos líquido-sólido, o qual ocorre quando o fluido carrega o cascalho até a superfície. Em seguida, apresentaram-se conceitos mais específicos de perfurações, definindo alguns fluidos de perfuração, especificando ainda a

classificação reológica dos fluidos. Posteriormente, foram apresentados conceitos para se realizar a análise dimensional, destacando-se aqui a escolha dos números adimensionais pertinentes ao trabalho, sendo eles os números de Reynolds e Stokes. Por fim, apresentou-se o método a ser utilizado para a determinação das incertezas referentes ao experimento.

Em seguida, no capítulo 3, será apresentada uma revisão dos trabalhos realizados envolvendo perfurações de poços, ressaltando ainda a utilização de circulação direta e reversa e parâmetros de perfurações de poços reais.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1 Parâmetros significativos para avaliação da limpeza de poços

Vários são os fatores que afetam a taxa de limpeza na perfuração de um poço de petróleo. Para Sansoni (2005), a vazão e as propriedades reológicas do fluido, taxa de penetração da broca e diâmetro do poço são alguns destes fatores.

A Fig.5 apresenta os aspectos/parâmetros que Nazari *et al.* (2010) consideraram como mais importantes na limpeza do poço. Os autores ainda os classificaram em função da facilidade de controle destes parâmetros em campo, como mostrado na Figura 3.1.

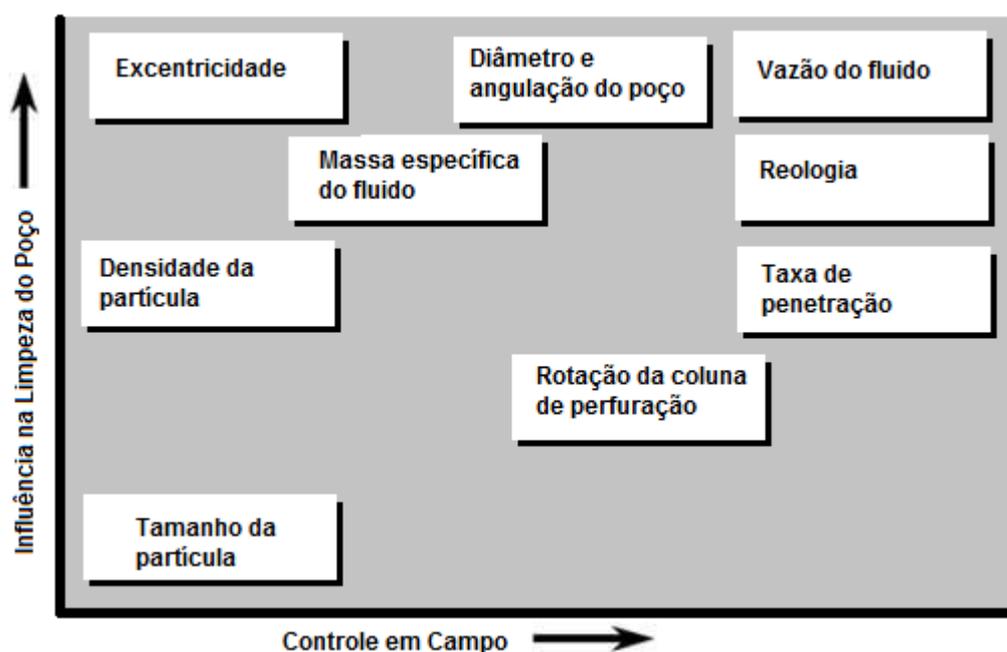
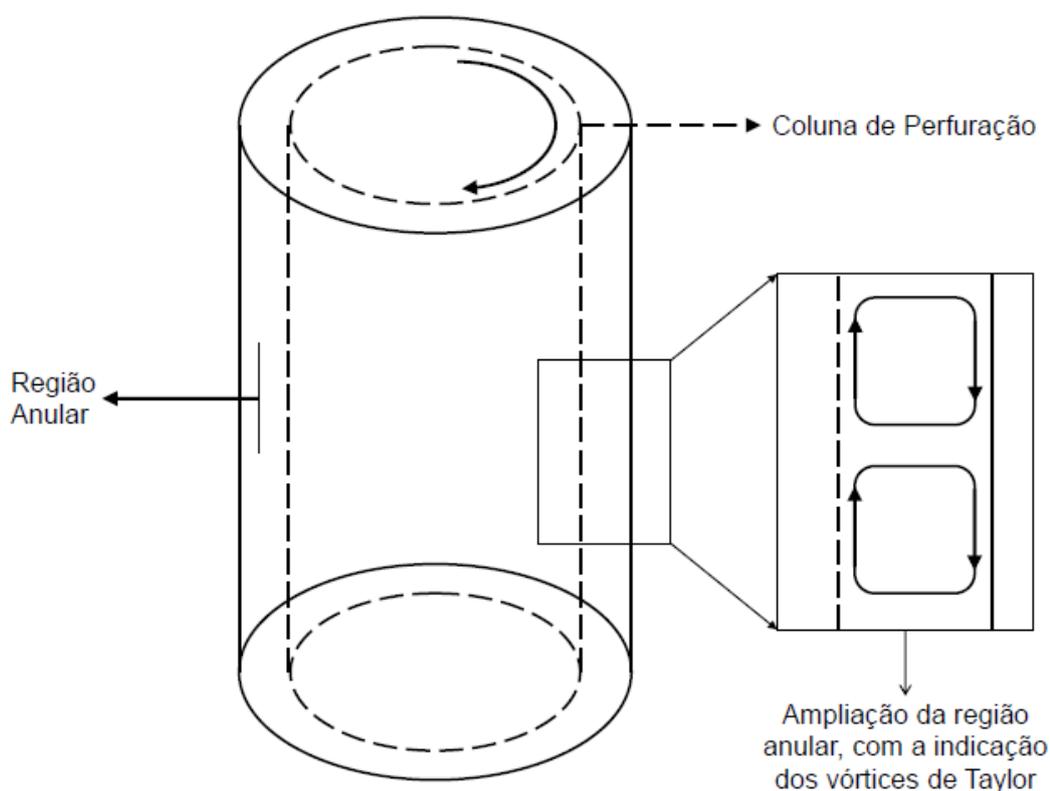


Figura 3.1 - Parâmetros chave que podem ser usados para controlar a limpeza do poço. Adaptado de: Nazari *et al.* (2010).

Alguns autores citam que a vazão do fluido, rotação da coluna de perfuração, reologia e taxa de penetração são fatores determinantes para uma eficiente taxa de limpeza (NAZARI *et al.*, 2010; BURBA *et al.*, 1990; RASI, 1994; MCCOLLUM *et al.*, 1998; GREEN *et al.*, 1999). O aumento da vazão volumétrica do fluido em poços verticais é estudado por Hussaini e Azar (1983). Segundo os autores, esse aumento acarreta em uma redução na velocidade de sedimentação da partícula, isso se dá pelo fato do peso da partícula e as forças do escoamento estarem em sentidos

opostos. A respeito da rotação da coluna, Belavadi e Chukuwu (1994) discorrem sobre o favorecimento da remoção de partículas de pequenos diâmetros quando é aplicada rotação sobre a coluna de perfuração. Segundo os autores, a rotação da coluna gera vórtices de Taylor, os quais favorecem a suspensão das partículas. A Figura 3.2 representa a formação dos vórtices de Taylor na região anular, os quais surgem quando há rotação da coluna interna e a parte externa permanece estática.



**Figura 3.2 - Ilustração da formação de vórtices de Taylor em um anular.**  
**FONTE: Adaptado de Belavadi e Chukuwu (1994).**

Em seus experimentos, Hussaini e Azar (1983) avaliaram ainda a influência da viscosidade aparente e a tensão de escoamento do fluido. Os autores concluíram que ambas as propriedades, viscosidade aparente e a tensão de escoamento, representam um efeito significativo para pequenas (0,305 m/s) e médias (0,457 m/s) velocidades anular, já para velocidades mais elevadas (0,606 m/s), as propriedades analisadas não exercem efeito significativo no carregamento de partículas.

Tendo o conhecimento de alguns parâmetros significativos para a taxa de limpeza, o presente trabalho levará em conta apenas alguns desses fatores: vazão

do fluido, reologia e massa específica do fluido e da partícula. Os demais fatores ficam inviabilizados pelo fato da bancada ser limitada em certos parâmetros, como por exemplo, não oferecer a possibilidade de rotação do tubo interno, alteração de seus diâmetros nem a possibilidade de analisar o escoamento com tubos excêntricos.

### **3.2 Similaridade geométrica e dinâmica**

Para garantir que um modelo em escala reduzida represente satisfatoriamente a situação real, faz-se necessário a utilização de algumas ferramentas como a teoria da similaridade (MARTINS, 1996).

A similaridade geométrica é uma característica de grande relevância que deve ser respeitada, porém não é suficiente. Segundo Fox *et al.* (2009), para que haja semelhança geométrica, é necessário que o experimento tenha a mesma forma que o modelo real e respeite, ainda, uma escala constante. Para situações não estáticas, há de se respeitar a similaridade dinâmica (MARTINS, 1996), propriedades físicas, como massa específica da partícula ( $\rho_p$ ), massa específica do fluido ( $\rho$ ), viscosidade do fluido ( $\mu$ ) e números adimensionais, como número de Reynolds e de Galilei (KELESSIDIS *et al.*, 2004).

### **3.3 Análise de circulação direta**

A seguir, com a intenção de mostrar que não há uma unanimidade em relação aos parâmetros utilizados nos experimentos e nem o cuidado de verificar se esses parâmetros respeitam as similaridades requeridas para uma fiel representação da situação real de perfuração, são apresentados trabalhos realizados por diversos autores, citando os parâmetros utilizados nas bancadas e suas conclusões.

Belavadi e Chukuwu (1994) usaram um tubo de acrílico vertical de 38,1 mm de diâmetro para representar perfurações reais e monitorar movimentos dentro do tubo. Foram utilizados fluidos de perfuração tanto Newtonianos como não Newtonianos. Os autores analisaram ainda a influência de partículas de diferentes tamanhos. Com isso, concluíram que o transporte de partículas aumenta com o aumento da vazão do fluido de altas densidades e a aplicação de rotação no tubo interno. Analisaram ainda a influência do número de Reynolds na limpeza do poço, concluindo que, um

pequeno aumento do número de Reynolds (aumentando a razão da massa específica e da viscosidade do fluido) resulta em uma diminuição na taxa de transporte, levando a uma limpeza menos eficiente do poço. Ressalta-se porém, que Belavadi e Chukuwu (1994) não tomaram o cuidado de comparar os números de Reynolds utilizados com os de perfurações reais.

Sifferman (1974), com a intenção de eliminar erros de escala, conduziu seu experimento em tamanho real, com uma torre de perfuração de 42,67 metros. Para as partículas, o autor utilizou plástico, cera e liga de chumbo, cortadas em tamanhos pequeno, médio e grande, sendo 2,4, 3,81 e 5,334 milímetros de diâmetro, respectivamente. Já para o fluido de trabalho, foram utilizados água e óleo, representando fluidos Newtonianos além de dispersões de bentonita, de forma a avaliar o transporte de partículas com um fluido não-Newtoniano. Sifferman concluiu que os principais fatores que afetam o transporte de partículas são a velocidade anular e as propriedades reológicas do fluido de trabalho. Verificou que quanto maior for a velocidade anular, maior será a capacidade de limpeza do poço, entretanto, na faixa de 0,51 m/s a 1,0 m/s, a taxa de limpeza tende a estabilizar ou aumentar mais lentamente com o aumento da velocidade anular. Além disso, Sifferman (1974) concluiu que quanto mais denso for o fluido, menor será a velocidade anular necessária para alcançar determinadas taxas de transporte de partículas (razão entre a velocidade do fluido e da partícula sendo carregada). Sifferman (1974) determinou o número de Reynolds apenas com o intuito de analisar se o escoamento era laminar ou turbulento.

Para realizar seus experimentos, Hussaini e Azar (1983) utilizaram três fluidos de trabalho que são comumente utilizados em perfurações reais, sendo eles: dispersão de bentonita em água, uma mistura de bentonita com goma xantana e soda cáustica e uma mistura de bentonita com Peltex (lignosulfato de ferrocromo) e soda cáustica. Os autores ajustaram também a velocidade média na região anular para 0,304, 0,457 e 0,606 m/s para os três tipos de fluido. Para estudar o efeito do tamanho das partículas, foram utilizados dois tamanhos diferentes. Para a representação da torre de perfuração, foi utilizada uma bancada com um comprimento de 12,7 metros, um tubo translúcido de 0,635 cm de espessura, com diâmetro interno de 12,7 cm. Para o tubo interno, foi utilizado aço com 2,975 cm de diâmetro. Hussaini & Azar (1983) concluíram que a velocidade anular apresenta uma

maior representatividade para o carreamento de partículas. Além disso, observou-se que o aumento da razão entre a tensão limite de escoamento e a viscosidade plástica do fluido, aumenta o rendimento do carreamento das partículas.

Walker e Li (2000) utilizaram uma bancada constituída por um tubo transparente de 6,096 metros de comprimento e 127 milímetros de diâmetro interno, simulando o poço e um tubo de aço de 60,325 milímetros de diâmetro para simular a coluna de perfuração. A bancada construída por Walker e Li (2000) permitia, ainda, a inclinação dos tubos de forma a simular perfurações não verticais. Foram estudados casos com três tipos de particulados, com diâmetros de 0,15, 0,762 e 7 milímetros. Os autores concluíram que as propriedades reológicas do fluido de trabalho representam um papel importante na limpeza do poço, sendo que para retirar as partículas, o melhor é utilizar fluidos com baixa viscosidade e escoamento turbulento, já para maximizar a capacidade de carregamento das partículas do poço, o melhor é utilizar um gel ou fluido multifásico. Concluíram ainda que partículas finas são as mais fáceis de carregar, já partículas esféricas com um tamanho médio de 0,76 mm representam a maior dificuldade para serem carregadas.

Lim e Chukwu (1996) utilizaram uma coluna de vidro de 1,52 metros de altura representando o poço. Os autores analisaram o tempo necessário para que o fluido carregasse as partículas do fundo até a cabeça do poço, alterando os diâmetros e a quantidade de bocais presentes no fundo do poço para a saída do fluido de perfuração, a velocidade de rotação da coluna e a vazão do fluido. Com essa análise, Lim e Chukwu concluíram que um desbalanceamento nos jatos de fluido de trabalho exerce uma melhora na taxa de limpeza do particulado existente no fundo do poço. Lim e Chukwu utilizaram o número de Reynolds em seu experimento com a intenção de determinar o coeficiente de atrito, sem levar em conta se o número de Reynolds calculado representa os parâmetros de uma operação em poços reais.

Nota-se que não é comum aos autores apresentados averiguar se os parâmetros utilizados por eles condizem com os de perfurações reais. Por esse motivo, a realização de experimentos considerando uma análise dimensional dos parâmetros caracteriza uma interessante oportunidade de estudo, com base na literatura apresentada.

### 3.4 Análise da circulação reversa

Apesar do desenvolvimento da circulação reversa em poços de petróleo ser algo recente (GRANT, 2014), alguns dados apontam para uma boa perspectiva de utilização desta técnica.

Michel *et al.* (2004) indicam que no Alasca, por exemplo, dentre mais de 1600 operações utilizando essa circulação, poucas foram as que apresentaram falhas. Os autores afirmam ainda que a circulação reversa é extremamente eficiente para a remoção de partículas de areia de poços com grandes diâmetro e inclinação, afirmam ainda que esta circulação pode proporcionar menores custos e tempo de execução.

Nota-se que ainda há uma quantidade relativamente pequena de trabalhos relacionados com o tema (VIEIRA, 2016). A seguir são apresentados alguns desses trabalhos que envolvem a circulação reversa, citando alguns parâmetros e conclusões obtidas.

Kumar *et al.* (2005) realizaram experimentos em três poços horizontais, em operação, situados no Omã. Testaram tanto a circulação direta quanto a reversa. Determinaram, com isso, que com a circulação reversa foi viável remover partículas que não foi possível com a circulação direta em poços horizontais onde a circulação não era possível devido à baixa pressão dos reservatórios.

Michel *et al.* (2004) analisaram dados de mais de 1600 poços operando com circulação reversa. Apesar de constatarem que esse método apresenta boa eficiência no carreamento de partículas de areia, pode também ser utilizado para outras partículas, se o planejamento e equipamentos forem definidos apropriadamente. Os autores ressaltam ainda a necessidade de ser feito um estudo prévio adequado de vários parâmetros, como as propriedades da rocha a ser cisalhada, taxa de penetração da broca e vazão do fluido de trabalho. Recomendam ainda que a queda de pressão no tubo seja monitorada e seja usado algum software para estimar as limitações da operação.

Com isso, nota-se que a avaliação da circulação reversa carece de um estudo mais aprofundado, levando em conta cada caso, para avaliar suas vantagens e desvantagens em relação à circulação direta.

### 3.5 Parâmetros operacionais de campo

Kelessidis *et al.* (2004) apresenta uma tabela com um compilado de parâmetros observados em poços de perfurações em uso, como diâmetro do poço ( $d_e$ ), da coluna ( $d_i$ ), vazão ( $Q$ ), velocidade ( $U$ ) e densidade do fluido ( $\rho$ ) utilizado, como apresentado na Tabela 3.1.

Os dados apresentados por Kelessidis *et al.* (2004) serão utilizados no presente trabalho como base para ajustar os parâmetros da bancada para a representação de poços reais, comparando os parâmetros de perfurações reais e os da unidade experimental.

Tabela 3.1 – Parâmetros de operações de perfuração reais.

Fonte	$D_e$ [mm]	$d_i$ [mm]	$D_h$ [mm]	$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$U$ [m/s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>SPE 24594</b>	120,65	44,45	76,2	$5,46 \cdot 10^{-3}$	0,54	998,18
" "	120,65	50,8	69,85	$8,73 \cdot 10^{-3}$	0,9	998,18
<b>SPE 29491</b>	127	48,26	78,74	$6,49 \cdot 10^{-3}$	0,58	
" "	127	48,26	78,74	$1,30 \cdot 10^{-3}$	1,16	
<b>SPE 54496</b>	95,25	50,8	44,45	$4,09 \cdot 10^{-3}$	0,78	1097,64
<b>SPE 54502</b>	155,52	60,32	95,25	$6,82 \cdot 10^{-3}$	0,41	1097,64
<b>SPE 68436</b>	127	48,26	78,74	$3,41 \cdot 10^{-3}$	0,3	1097,64
" "	127	48,26	78,74	$1,70 \cdot 10^{-3}$	1,52	1097,64

Adaptado de: Kelessidis *et al.* (2004)

Segundo Kelessidis *et al.* (2006), bentonita é adicionada a fluidos de perfuração visando o controlar a viscosidade e ajudar no carreamento das partículas do fundo até a superfície do poço. Os autores discutem ainda o fato de que, por volta dos 120°C e ambientes altamente salinos, a bentonita começa a se tornar mais espessa. Para evitar esse processo, diluentes são adicionados à mistura. Entretanto, muitos desses diluentes perdem suas características na mesma faixa de temperatura. Os autores sugerem, então, a utilização de lignita, diluente que não perde as propriedades quando na mesma faixa de temperatura.

Kelessidis *et al.* (2006) apresentam, ainda, a Tabela 3.2, a qual expõe dados de vários fluidos utilizados em perfurações reais, sendo eles: misturas de água e bentonita à 6,42% e água, bentonita e lignita à 0,5 e 3,0%. Supondo que: A= suspensão de bentonita e B= suspensão de lignita, a amostra S1 representa A

hidratada a 25°C, S2: A envelhecido a 25°C, S3: A+L<sub>1</sub> 3,0% envelhecido a 25°C, S4: A+L<sub>2</sub> 3,0% envelhecido a 25°C, S5: A+L<sub>4</sub> 3,0% envelhecido a 25°C, S6: A+L<sub>5</sub> 3,0% envelhecido a 25°C, S7: A+L<sub>6</sub> 3,0% envelhecido a 25°C, S8: A+L<sub>7</sub> 0,5% hidratado a 25°C, S9: A+L<sub>1</sub> 0,5% hidratado a 65°C, S10: A+L<sub>4</sub> 3,0% hidratado a 65°C, S11: A+L<sub>8</sub> 0,5% hidratado a 25°C e S12: A+L<sub>3</sub> 3,0% hidratado a 25°C. Essas misturas são exemplos de fluidos não newtonianos, pois, como pode se verificar na Figura 3.3, não há uma relação constante entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação dos fluidos.

Esses fluidos serão utilizados no Capítulo 5.1 como base para avaliar as propriedades pertinentes para determinação dos parâmetros necessários para aproximar a operação da unidade experimental à operações com poços reais.

**Tabela 3.2 - Dados reológicos para mistura de bentonita+água e bentonita+água+lignita.**  
Tensão de Cisalhamento [Pa]

Taxa de Def. [1/s]	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
1021,38	28,50	48,42	21,92	6,92	10,25	20,75	18,17	11,75	12,83	4,50	9,33	12,17
851,15	27,75	46,83	22,75	6,17	8,92	19,25	16,67	11,08	9,75	4,17	8,58	11,00
680,92	26,83	44,58	26,08	5,58	7,83	17,92	14,75	9,75	8,58	3,58	7,92	9,83
510,69	25,00	41,58	22,42	4,75	5,92	17,08	12,75	8,58	8,00	3,08	6,83	8,33
340,46	22,58	37,83	18,58	3,67	4,75	15,17	9,92	6,58	7,33	2,42	5,58	6,83
170,23	21,00	35,67	13,58	2,17	3,42	12,33	6,50	4,25	5,58	1,75	3,42	4,00
136,18	21,00	33,25	12,00	1,83	3,08	11,67	6,17	4,08	5,42	1,50	2,92	3,42
102,14	20,08	30,83	10,50	1,33	2,92	10,75	5,75	3,75	5,08	1,42	2,42	2,75
51,07	16,67	27,42	6,92	0,58	2,00	9,00	4,00	2,58	4,00	1,08	1,50	1,58
34,05	17,50	27,83	7,42	0,50	1,67	8,83	4,17	2,42	4,17	1,00	1,33	1,42
17,02	16,00	21,90	6,67	0,08	1,25	8,08	3,33	2,08	3,67	0,67	1,00	1,17
10,21	14,67	23,75	6,25	0,00	1,00	8,17	3,25	1,83	3,67	0,58	0,58	0,92
5,11	13,20	19,90	5,10	0,00	0,50	7,70	2,80	1,60	3,25	0,50	0,50	0,10

Adaptado de: Kelessidis *et al.* (2006)

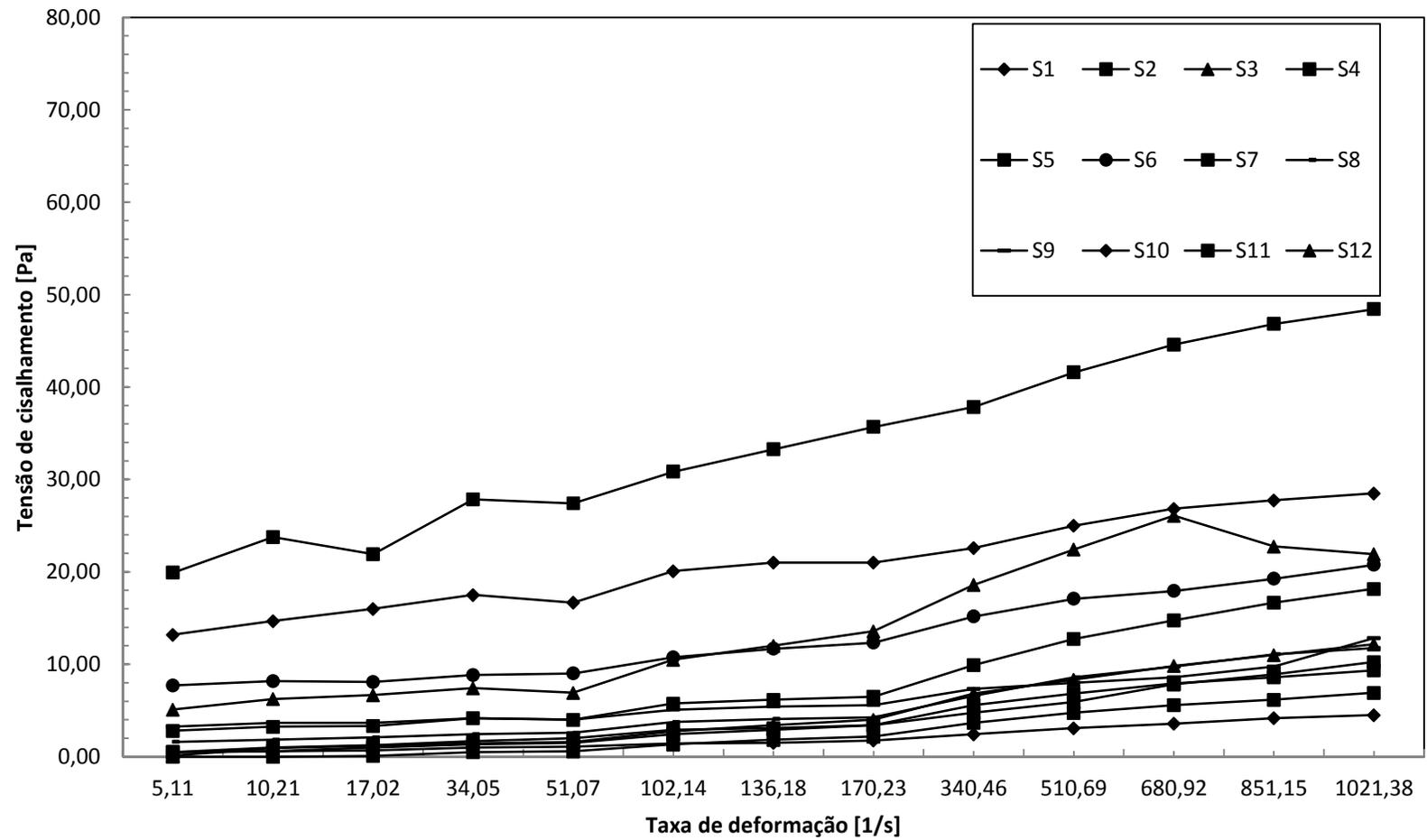


Figura 3.3 - Gráfico taxa de deformação por tensão de cisalhamento dos fluidos listados.

Em seu experimento, Kelessidis *et al.* (2004) utilizaram dois tubos concêntricos de acrílico, sendo o externo com diâmetro 69,85 mm e o interno com 40,0 mm de diâmetro, podendo movê-los da horizontal à vertical. Kelessidis *et al.* (2004) tiveram o cuidado de realizar a comparação de alguns parâmetros observados em seu experimento com aqueles obtidos em condições de campo. A Tabela 3.3 apresenta esses dados.

Utilizando esses dados, Kelessidis *et al.* (2004) concluíram que o parâmetro que mais influi no transporte do particulado é a velocidade média da mistura no anular (razão da vazão com a área anular). Os autores concluíram ainda que o escoamento deve ser turbulento e que a densidade do fluido também é um parâmetro importante para o carreamento de partículas.

**Tabela 3.3 - Comparação entre situação em campo e experimental.**

<b>Parâmetro</b>	<b>Condições em campo</b>	<b>Condições experimentais avaliadas por Kelessidis <i>et al.</i> (2004)</b>
$D_e$ (mm)	69,85 - 120,65	69,85
$d_i$ (mm)	50,8 - 73,03	40
$d_i/D_e$	0,40 - 0,82	0,57
$(D_e-d_i)/D_e$	0,37 - 0,61	0,43
$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$4,1 \cdot 10^{-3}$ - $8,2 \cdot 10^{-3}$	$0,35 \cdot 10^{-3}$ - $12,00 \cdot 10^{-3}$
$U$ (m/s)	0,30 - 1,5	0,3 - 4,42
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	998,15 - 1138,35	998,15 - 1048,48
$\rho_p$ (kg/m <sup>3</sup> )	2492,39	2492,39
$d_p$ (mm)	1,016 - 6,982	1,016 - 4,064

**Adaptado de: Kelessidis *et al.* (2004)**

O presente trabalho visa realizar uma análise baseada nos estudos de Kelessidis *et al.* (2004), comparando os diâmetros interno e externo, adimensionais, da bancada com os de perfurações reais, levando em conta, ainda, parâmetros como os números adimensionais de Reynolds e Stokes para operar a bancada em situação o mais próximo possível da operação do poço.

### **3.6 Cálculo da eficiência de limpeza**

Com o intuito de mensurar a eficiência de limpeza de poços experimentais horizontais, Okon e Agwu (2015) utilizaram o índice de remoção de cascalhos (CCI).

Em seus experimentos, para avaliar o percentual de partículas retirada, os autores dispõem um leito de partículas, a uma altura constante, por toda extensão do anular. Em seguida, um escoamento baixo o suficiente para que não ocorra o carreamento das partículas é imposto por dois minutos. Após esse tempo, a vazão de teste é iniciada e mantida por cinco minutos. Ao final desse período, com base na massa das partículas retiradas pelo escoamento, o CCI pode ser definido, visto que a massa inicial do experimento é conhecida. Para realizar o cálculo do CCI, os autores utilizam a definição mostrada na Equação (3.1).

$$CCI = \frac{qk\rho_f}{694,44\pi D^2} \quad (0.17)$$

Em que  $q$  representa a vazão,  $\rho_f$  a massa específica do fluido,  $D$  o diâmetro do poço e  $k$  o índice de consistência do fluido, que é uma função das propriedades reológicas do fluido. Com isso, compreende-se que quanto maior for o valor do CCI definido, melhor será a capacidade de limpeza do poço.

### 3.7 Síntese do capítulo

No capítulo 3 foram apresentados trabalhos realizados abordando perfurações de poços. Primeiramente, apresenta-se uma breve revisão dos principais parâmetros que influenciam no carreamento das partículas pelo fluido de trabalho, destacando aqui que nem todos os parâmetros citados poderão ser analisados utilizando a bancada em estudo. Em seguida, citaram-se trabalhos envolvendo experimentos com perfurações de poços envolvendo circulação direta. Evidenciando que nos trabalhos apresentados não é feita uma análise dos números adimensionais, um resumo dos dados utilizados nos experimentos apresentados nesta etapa pode ser observado na Tabela 3.4, em que os espaços preenchidos por “-“ representam dados não mencionados.

Tabela 3.4 - Parâmetros dos experimentos analisados.

<b>Autores</b>	<b>Diâmetro do poço [mm]</b>	<b>Velocidade [m/s]</b>	<b>Altura [m]</b>	<b>Material do particulado</b>
Sifferman (1974)	-	0,51 a 1,0	42,67	Plástico, cera e liga de chumbo
Hussaini & Azar (1983)	127	0,30 a 0,61	12,7	-
Walker e Li (2000)	127	-	6,1	-
Lim e Chukwu (1996)	-	-	1,52	-

Posteriormente foram apresentados trabalhos envolvendo a circulação reversa. Nesta etapa, nota-se que não há muitas informações disponíveis na literatura a respeito do tema, indicando que o presente trabalho pode buscar preencher essa lacuna. Por fim, foram apresentados parâmetros de perfurações reais, os quais serão usados como base para a definição de parâmetros no presente trabalho.

No Capítulo 4 serão apresentados os materiais e métodos utilizados para a definição dos parâmetros e as taxas de limpeza do poço.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

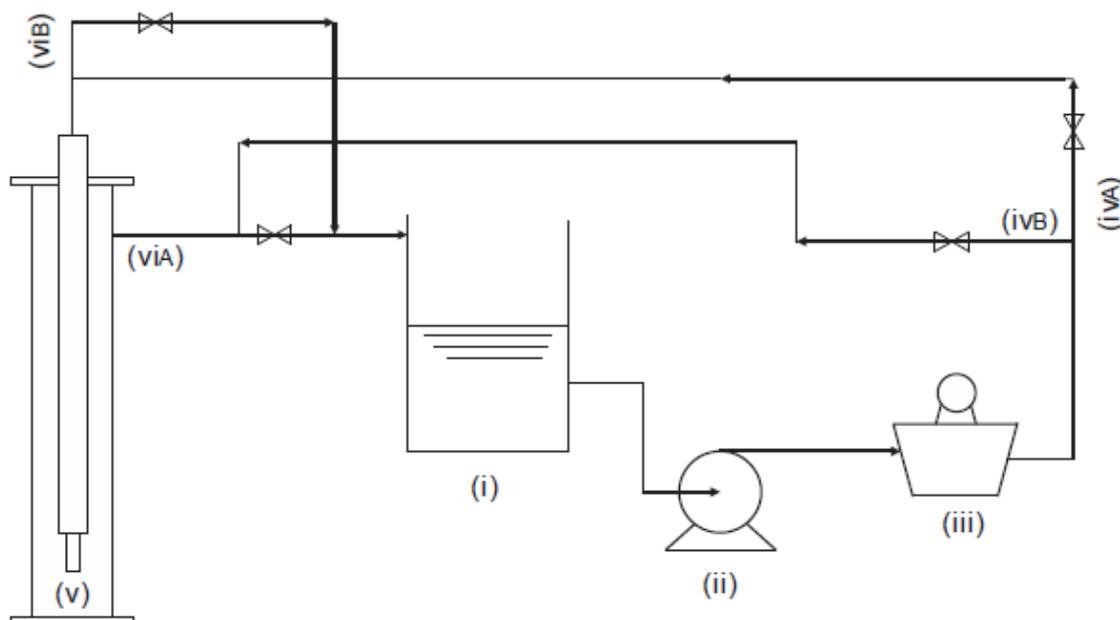
A definição dos parâmetros de similaridade para determinação de dados de ensaios que possibilitem a comparação/extrapolação dos resultados experimentais para situações de operação em campo foi feita tendo por base os requisitos de similaridade, explicados no Capítulo 0. Tal definição foi feita de forma conceitual.

Para a avaliação da eficiência de limpeza do poço com as circulações direta e reversa, escolheu-se a utilização da bancada experimental já montada no laboratório, tendo em vista que essa bancada já se encontra em operação de forma consistente, conforme pode ser observado no trabalho desenvolvido por Vieira (2017).

Importante observar que os valores obtidos de dados de campo foram utilizados para definir somente a vazão do escoamento. Não foram respeitadas as semelhanças geométricas nem cinemáticas. Assim, a similaridade completa entre bancada e poço não foi obtida, uma vez que a bancada, em sua configuração atual, não aceita rotação da coluna. Logo, a semelhança cinemática já estaria comprometida. Da mesma forma, a bancada aproxima a broca por uma contração, desrespeitando a semelhança geométrica.

### 4.1 Descrição da bancada

A bancada utilizada encontra-se no Centro de Pesquisa em Reologia e Fluidos não Newtonianos (CERNN), da UTFPR, que possibilita a simulação de circulação direta e reversa de fluido em poços de petróleo. A Figura 4.1 apresenta o esquema da bancada.



**Figura 4.1 - Esquema da bancada experimental.**

**Fonte: Vieira (2016)**

No tanque misturador, representado por (i), pode-se armazenar cem litros do fluido de trabalho utilizado. Uma bomba centrífuga (ii) bombeia o fluido que passa por um medidor de vazão mássica do tipo *coriolis* (iii), chegando à tubulação de acrílico. A partir daí, o escoamento vai depender do modo de circulação do fluido: na circulação direta, o fluido entra por dentro da coluna de perfuração (iv<sub>a</sub>), já na a reversa, o fluido entra pela região anular (iv<sub>b</sub>). Chegando ao fundo do poço, o fluido passa pela contração, retornando ao tanque, podendo ser, também, por dois caminhos, dependendo do modo de circulação do fluido: quando utilizado o modo direto, o fluido retorna pela região anular (vi<sub>a</sub>), já no modo reverso, o fluido retorna pelo centro da coluna (vi<sub>b</sub>).

#### **4.1.1 Contração**

Bisson *et al.* (1988) expõem a complexidade da geometria das brocas e dos bocais ejetores utilizados em perfurações. Ao projetar a unidade experimental analisada, Santos (2014) optou por utilizar três colunas com contrações abruptas em uma de suas extremidades para simplificar a geometria e os padrões de escoamento.

Para o presente trabalho, foram utilizadas contrações com razão de contração  $\beta=2,12$  e  $4,25$  pela disponibilidade no laboratório do CERNN.

Segundo Vieira (2017), é usual que a distância do bocal ejetor até a formação rochosa que será cisalhada seja muito pequena, visto que a incidência dos jatos se dá enquanto a broca perfura poço. Entretanto, o presente trabalho avaliará a influência da altura na eficiência de limpeza. As alturas analisadas foram  $h = 45$  e  $90$  mm.

#### **4.2 Partícula de trabalho**

Para realizar seu experimento na mesma bancada que será utilizada no presente trabalho, Vieira (2017) levantou algumas características que as partículas deveriam conter, sendo elas: ser visível em meio ao fluido de trabalho, apresentar massa específica suficiente para evitar que ocorra excesso de deposição ou suspensão e também possuir uma granulometria suficiente para poder ser notada pelo instrumento de aquisição de imagem e compatível também com o diâmetro da contração. Para isso, Vieira (2006) utilizou particulado de Ureia.

Partindo dos parâmetros necessários, determinados a partir das análises dos dados, foi verificada a necessidade de material para a realização dos testes. Caso as partículas já utilizadas não fossem satisfatórias para a adequação das similaridades, seria determinada uma partícula que atendesse às necessidades requeridas, adequando a massa específica e o tamanho da partícula. Tal ação não se mostrou necessária.

#### **4.3 Fluido de trabalho**

O fluido de perfuração tem grande importância no processo de perfuração dos poços, sendo o principal agente atuando na retirada dos cascalhos. Para uma maior eficiência em retirar as partículas dos poços, Locket *et al.* (1993) sugerem que a viscosidade do fluido seja alta e também que a diferença da massa específica do fluido e do particulado seja baixa.

Para simplificar a execução do experimento, Vieira (2017) utilizou a água como fluido de trabalho. O presente trabalho ainda utilizará água, pois, como será discutido nas seções subsequentes, com a utilização desse fluido, os números

adimensionais analisados, Reynolds e Stokes, são respeitados. Além disso, levou-se em conta a facilidade de obtenção, manuseio e o fato de não ser prejudicial ao meio ambiente.

#### **4.4 Metodologia**

A primeira parte do trabalho focou na definição de parâmetros que devem ser respeitados com o objetivo de extrapolar dados experimentais de bancadas para poços reais. Para isso, foram analisados parâmetros geométricos, como os diâmetros interno e externo, verificando se esses respeitam a escala geométrica. Foram avaliados também parâmetros cinemáticos, como por exemplo, se a velocidade medida em determinada seção do escoamento apresenta direção e sentido iguais às do modelo real, diferindo apenas por um fator de escala em sua intensidade (FOX *et al.*, 2004). Além disso, foram analisados os números adimensionais de Reynolds e Stokes. Para que a bancada atenda às necessidades encontradas para o escoamento, foram determinados fluido e partícula que apresentem as características requeridas. A sequência seguida para realização desta etapa é apresentada pela Figura 4.2.

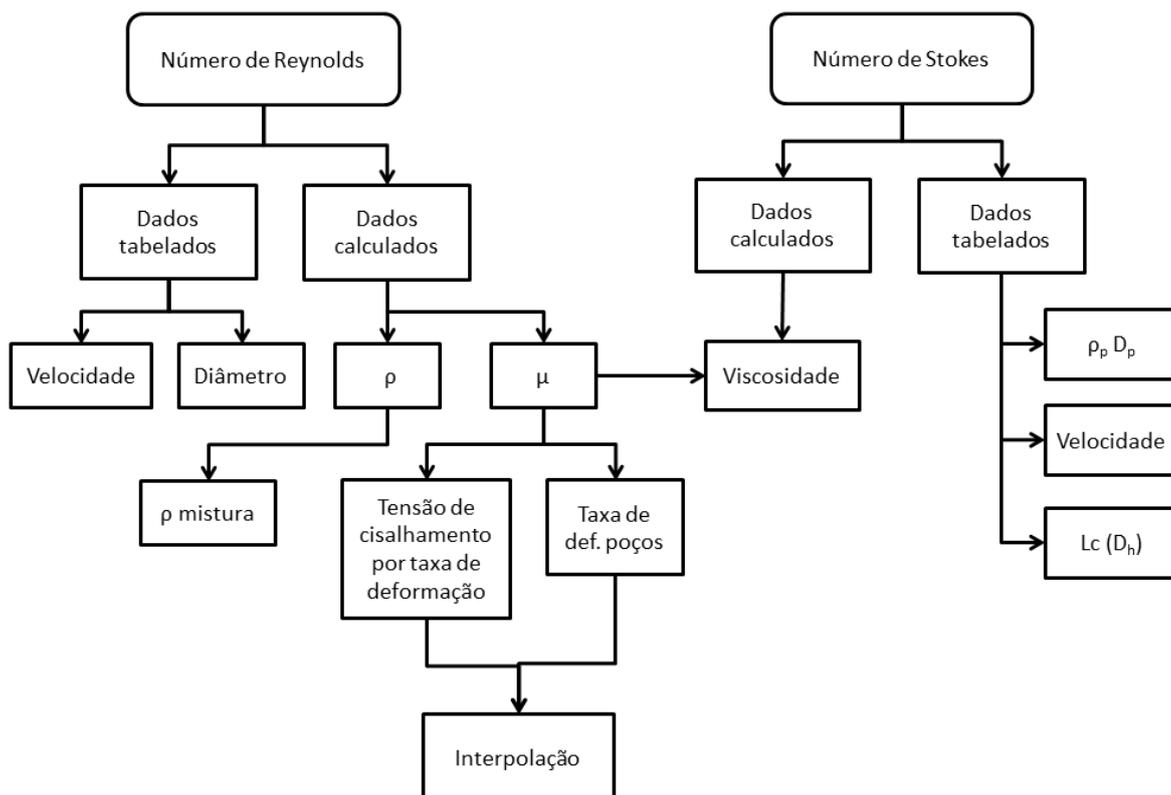


Figura 4.2 - Fluxograma do cálculo do número de Reynolds e de Stokes.

Na segunda parte do trabalho, avaliou-se a capacidade de limpeza do poço, utilizando o fluido e partícula determinados na primeira parte, tanto para circulação direta quanto reversa. Para isso, foram avaliadas duas variações de diâmetro da contração (25,4 e 12,7 mm, conforme disponibilidade no laboratório) e duas variações de altura da contração em relação ao fundo do poço, 45 e 90 mm. Para manter a similaridade dinâmica com o poço previamente definido, o Re do anular será mantido constante em todas as configurações.

#### 4.4.1 Definição dos números adimensionais

Como o fluido escolhido para a realização dos cálculos foi a água, a massa específica e viscosidades já são conhecidas. Dessa forma, deve-se definir a vazão que deverá ser utilizada na bancada para obter a compatibilidade com o número de Reynolds do poço analisado.

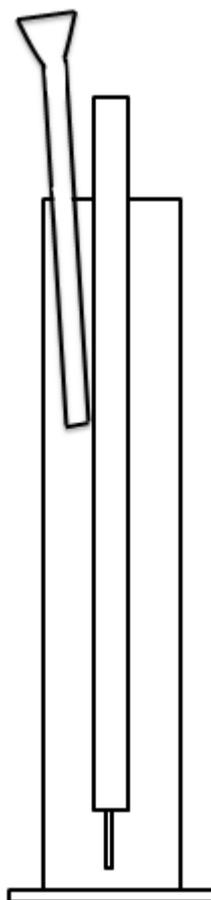
Segundo a definição apresentada no capítulo 2.5.3.2 sobre o número de Stokes, poderão ser determinadas as propriedades da partícula a ser utilizada. Para

isso, será utilizado o número adimensional de Stokes de perfurações reais, utilizando dados de fluido e cascalho apresentados no trabalho de Kelessidis *et al.* (2004). A partir do número adimensional de Stokes encontrado, serão determinadas massa específica e diâmetro das partículas. Nesta etapa, será utilizada a viscosidade do fluido determinada na etapa anterior.

#### 4.4.2 Eficiência de limpeza

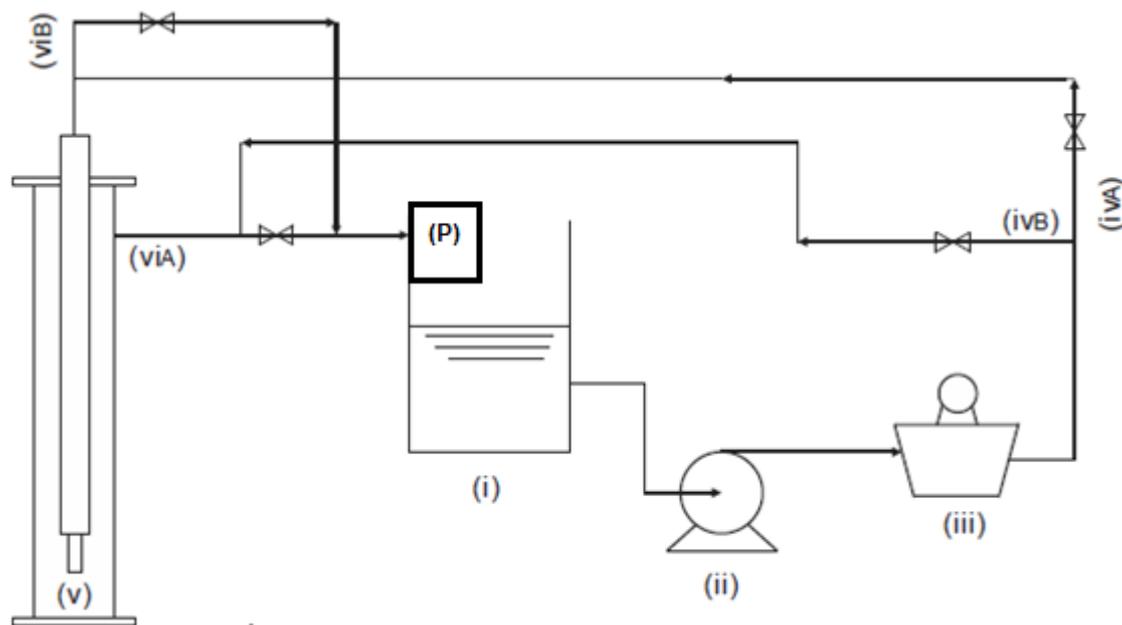
Para avaliar a eficiência de limpeza do poço, o método utilizado por Vieira (2017) foi adaptado para uma maior eficiência na operação.

Após o completo preenchimento das colunas pelo fluido, foi mantido um  $Re_{\text{contração}}$  de 5000 para que as partículas fossem adicionadas pelo flange superior (Re alto suficiente para continuar o escoamento, porém baixo suficiente para que as partículas submergissem até o fundo da coluna). Para a disposição das partículas no interior da coluna, foi utilizado um tubo de acrílico de 40 mm de comprimento com um funil em uma das pontas, conforme representado no esquema da Figura 4.3. Figura 4.3 - Aparato utilizado para evitar a evasão de partículas antes de serem depositadas no fundo do poço.. Esse tubo foi utilizado com o intuito de diminuir a evasão de partículas que, ao serem adicionadas sem o aparato, eram sugadas de volta para o tanque sem ser depositada no fundo da coluna. Manteve-se o  $Re_{\text{contração}}$  de 5000 durante 2 minutos para que todas as partículas se depositassem no fundo. Em seguida, a vazão de teste (correspondente a  $Re_{\text{anular}} = 4600$ , que será melhor definido na Seção 5.1) foi inserida no controle da bancada e mantida por 3 minutos.



**Figura 4.3 - Aparato utilizado para evitar a evasão de partículas antes de serem depositadas no fundo do poço.**

Para evitar que as partículas retornassem ao tanque, foi utilizada uma peneira (P) posicionada no retorno do fluido da coluna para o tanque (i), como mostra a Figura 4.4.



**Figura 4.4 - Esquema da bancada adaptada com a peneira.**  
Adaptado de: Vieira (2017)

Ao fim dos 3 minutos, a bomba foi desligada, cessando a vazão do fluido e a peneira foi retirada. O tempo de teste foi definido em experimentos preliminares e observou-se que 3 minutos seria o mais indicado para o presente trabalho.

Para a secagem do particulado peneirado, dispuseram-se as partículas espalhadas em uma caixa de dimensões aproximadas de 500x400x400 mm. Em seguida, utilizou-se um secador de cabelo de 1900 W para insuflar ar quente. A temperatura de saída do ar obtida em leitura com medidor de temperatura com sensor externo (faixa de medição de -20 a 70°C) foi de aproximadamente 53°C. O processo de sopro sobre o particulado teve duração de 20 minutos. Para evitar que partículas fossem arremessadas para fora da caixa, foi utilizada uma peneira na abertura da saída de ar, como mostra o esquema na Figura 4.5. Após esse procedimento, as partículas foram deixadas repousando por mais meio dia para a completa secagem das mesmas.

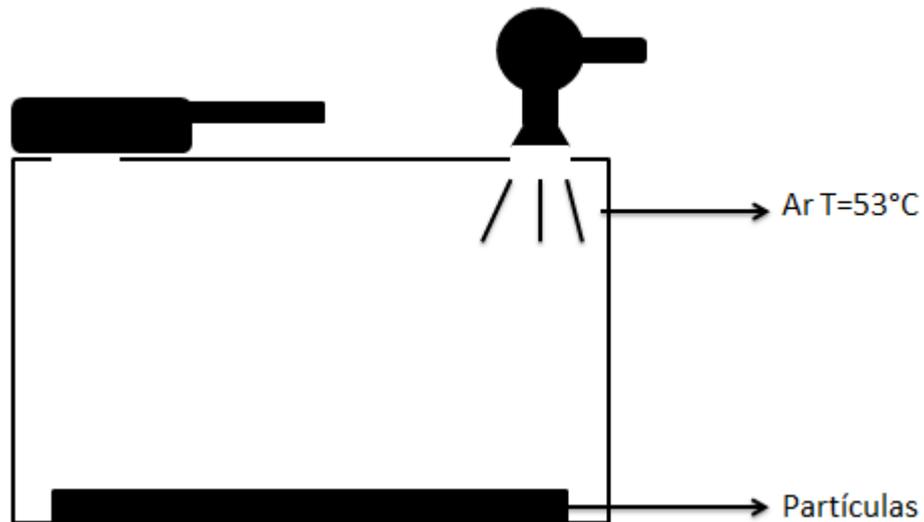


Figura 4.5 - Esquema do método utilizado para a secagem das partículas.

Para determinar a eficiência de limpeza do poço, operando tanto com circulação direta quanto reversa, o método utilizado foi realizado adaptando a metodologia utilizada por Okon e Agwu (2015). Embora os autores propusessem a formulação apresentada na Equação (0.17), o CCI foi calculado medindo a massa das partículas adicionadas ao experimento e comparando com a massa retirada devido à circulação do fluido, definida pela Equação (4.1).

$$CCI = \frac{m_s}{m_e} \quad (0.18)$$

Em que CCI é o indicador de remoção de partículas,  $m_s$  a massa retirada pelo escoamento e  $m_e$  representa a massa de entrada no experimento.

#### 4.5 Síntese do capítulo

Primeiramente, no Capítulo 4, foi feita uma descrição da bancada que será utilizada, definindo os equipamentos que a compõe. Em seguida foram apresentadas algumas características pertinentes que a partícula utilizada deve ter, citando os parâmetros que serão definidos para uma melhor representação da realidade, como diâmetro e massa específica. Por fim, apresentou-se a metodologia que será utilizada para definir os números adimensionais de Reynolds e Stokes, os

quais serão utilizados para determinar as propriedades do fluido e da partícula. Também se apresentaram as metodologias para a determinação das eficiências de limpeza do poço.

Nos capítulos subsequentes, 5 e 6, serão apresentados os resultados e as considerações finais, respectivamente.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Definição dos parâmetros do fluido

Para realizar a determinação do fluido e partícula necessários para que o experimento respeite as similaridades, foram calculados os números de Reynolds de todos os poços presentes na Tabela 3.1, alternando com os fluidos existentes na Tabela 3.2. Ou seja, supôs-se que cada poço opera com cada um dos fluidos citados.

Para isso, primeiramente foi realizado o cálculo das viscosidades aparentes dos fluidos, por meio da Equação (5.1).

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (0.19)$$

Em que  $\tau$  representa a tensão de cisalhamento e  $\dot{\gamma}$  a taxa de deformação.

As viscosidades aparentes em função da taxa de deformação obtidas para cada fluido são apresentadas na Tabela 5.1.

**Tabela 5.1 - Viscosidade aparente por taxa de deformação.**

Taxa de Def. [1/s]	Viscosidade aparente											
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
1021,38	0,028	0,047	0,021	0,007	0,010	0,020	0,018	0,012	0,013	0,004	0,009	0,012
851,15	0,033	0,055	0,027	0,007	0,010	0,023	0,020	0,013	0,011	0,005	0,010	0,013
680,92	0,039	0,065	0,038	0,008	0,011	0,026	0,022	0,014	0,013	0,005	0,012	0,014
510,69	0,049	0,081	0,044	0,009	0,012	0,033	0,025	0,017	0,016	0,006	0,013	0,016
340,46	0,066	0,111	0,055	0,011	0,014	0,045	0,029	0,019	0,022	0,007	0,016	0,020
170,23	0,123	0,210	0,080	0,013	0,020	0,072	0,038	0,025	0,033	0,010	0,020	0,023
136,18	0,154	0,244	0,088	0,013	0,023	0,086	0,045	0,030	0,040	0,011	0,021	0,025
102,14	0,197	0,302	0,103	0,013	0,029	0,105	0,056	0,037	0,050	0,014	0,024	0,027
51,07	0,326	0,537	0,136	0,011	0,039	0,176	0,078	0,051	0,078	0,021	0,029	0,031
34,05	0,514	0,817	0,218	0,015	0,049	0,259	0,122	0,071	0,122	0,029	0,039	0,042
17,02	0,940	1,287	0,392	0,005	0,073	0,475	0,196	0,122	0,216	0,039	0,059	0,069
10,21	1,437	2,326	0,612	0,000	0,098	0,800	0,318	0,179	0,359	0,057	0,057	0,090
5,11	2,583	3,894	0,998	0,000	0,098	1,507	0,548	0,313	0,636	0,098	0,098	0,020

Para avaliar a viscosidade aparente de cada fluido em cada um dos poços, calculou-se a taxa de deformação média da região anular de cada poço utilizando o método proposto por Santoyo-Gutiérrez (1997), representado pela Equação (5.2). A

taxa de deformação varia com o raio da região anular, o que faz com que a viscosidade dos fluidos de perfuração não seja constante ao longo do raio da seção anular. Entretanto, será utilizada a taxa de deformação média ao longo da região anular, e será utilizada a hipótese de que o fluido de perfuração responde de forma homogênea à taxa de deformação ao longo do raio da seção anular. Essa é, provavelmente, uma das fontes de erro do presente trabalho. Entretanto, avaliar o comportamento dinâmico das partículas escoando em um campo heterogêneo de velocidades exige o uso de técnicas mais refinadas de análise, como a Velocimetria por Imagens de Partículas (PIV) ou simulações numéricas dos escoamentos bifásicos, e foge ao objetivo do presente trabalho.

$$\dot{\gamma}_{anular} = 12 \frac{\bar{V}}{D_h} \quad (0.20)$$

Na Equação (0.20),  $\bar{V}$  é a velocidade média do fluido na região anular e  $D_h$  é o diâmetro hidráulico do poço, definido pela Equação (5.3).

$$D_h = D_i - d_e \quad (0.21)$$

Em que  $D_i$  é o diâmetro interno do poço e  $d_e$  o diâmetro externo da coluna de perfuração.

As taxas de deformação obtidas são apresentadas na Tabela 5.2.

**Tabela 5.2 - Taxa de deformação dos poços.**

<b>Fonte</b>	<b>Taxa de Deformação [1/s]</b>
<b>SPE 24594</b>	85,04
" "	154,62
<b>SPE 29491</b>	88,39
" "	176,78
<b>SPE 54496</b>	210,57
<b>SPE 54502</b>	51,65
<b>SPE 68436</b>	45,72
" "	231,65

Com isso, interpolaram-se as taxas de deformação obtidas na Tabela 5.2 com as da Tabela 5.1 para obter as viscosidades aparentes da combinação dos poços com os fluidos. A Tabela 5.3 apresenta esses resultados.

**Tabela 5.3 - Viscosidades aparentes (Pa.s) dos poços com cada fluido.**

	<b>SPE 24594</b>	<b>SPE 24594</b>	<b>SPE 29491</b>	<b>SPE 29491</b>	<b>SPE 54496</b>	<b>SPE 54502</b>	<b>SPE 68436</b>	<b>SPE 68436</b>
<b>S1</b>	0,2401	0,1375	0,2315	0,1212	0,1098	0,3249	0,3854	0,1028
<b>S2</b>	0,3806	0,2254	0,2928	0,2058	0,1862	0,5342	0,6251	0,1740
<b>S3</b>	0,1137	0,0836	0,0998	0,0788	0,0738	0,1351	0,1614	0,0707
<b>S4</b>	0,0125	0,0131	0,0144	0,0127	0,0123	0,0114	0,0124	0,0120
<b>S5</b>	0,0321	0,0212	0,0262	0,0199	0,0186	0,0390	0,0423	0,0179
<b>S6</b>	0,1290	0,0785	0,1043	0,0714	0,0658	0,1754	0,2023	0,0624
<b>S7</b>	0,0637	0,0415	0,0553	0,0378	0,0360	0,0781	0,0922	0,0349
<b>S8</b>	0,0413	0,0273	0,0370	0,0247	0,0236	0,0504	0,0570	0,0229
<b>S9</b>	0,0593	0,0360	0,0497	0,0323	0,0301	0,0780	0,0922	0,0287
<b>S10</b>	0,0163	0,0106	0,0120	0,0102	0,0095	0,0211	0,0237	0,0091
<b>S11</b>	0,0256	0,0207	0,0233	0,0199	0,0192	0,0293	0,0324	0,0188
<b>S12</b>	0,0283	0,0242	0,0274	0,0234	0,0227	0,0309	0,0343	0,0223

Com isso, têm-se todos os dados para calcular os números de Reynolds na região anular de todas as combinações de poços e fluidos listados. Os dados são apresentados na Tabela 5.4.

**Tabela 5.4 – Números de Reynolds da região anular das combinações de poços e fluidos.**

	<b>SPE 24594</b>	<b>SPE 24594</b>	<b>SPE 29491</b>	<b>SPE 29491</b>	<b>SPE 54496</b>	<b>SPE 54502</b>	<b>SPE 68436</b>	<b>SPE 68436</b>
<b>S1</b>	189,01	504,14	217,50	831,26	348,06	132,53	67,59	1284,06
<b>S2</b>	119,23	307,53	172,02	489,53	205,31	80,61	41,67	758,38
<b>S3</b>	401,58	834,79	507,86	1286,71	521,53	320,84	162,47	1879,78
<b>S4</b>	3664,94	5342,02	3518,97	8001,95	3134,06	3810,98	2114,33	11037,79
<b>S5</b>	1421,78	3284,33	1937,80	5107,17	2065,38	1110,46	620,41	7432,84
<b>S6</b>	354,07	888,88	486,04	1420,98	584,72	247,15	129,60	2130,14
<b>S7</b>	717,43	1683,68	916,70	2679,99	1067,98	555,30	284,42	3804,93
<b>S8</b>	1098,92	2546,22	1363,74	4074,24	1619,79	856,06	457,67	5761,80
<b>S9</b>	765,92	1927,86	1015,36	3117,34	1271,05	552,74	282,84	4600,45
<b>10</b>	2797,57	6573,28	4208,85	9982,04	4039,45	2058,12	1105,01	14543,68
<b>S11</b>	1774,83	3351,00	2160,17	5054,83	1992,12	1471,08	804,45	7044,81
<b>S12</b>	1615,96	2879,23	1851,54	4339,69	1696,83	1403,39	764,05	5969,46

De posse de todos os números de Reynolds possíveis das combinações, pôde-se comparar com os dados apresentados por Vieira (2017), onde são listados os números de Reynolds máximo e mínimo da seção anular que a bancada pode ser operada para um funcionamento satisfatório, identificados na Tabela 5.5.

**Tabela 5.5 –  $Re_{anular}$  máximo e mínimo operáveis na bancada.**

	$Re_{anular}$
Mínimo	2738
Máximo	4612

Obtidos os dados da combinação de todos os poços com todos os fluidos apresentado e conhecendo os Reynolds limitadores da bancada, traçou-se um gráfico para analisar as combinações que estão dentro da faixa operável da bancada, representadas pela Figura 5.1.

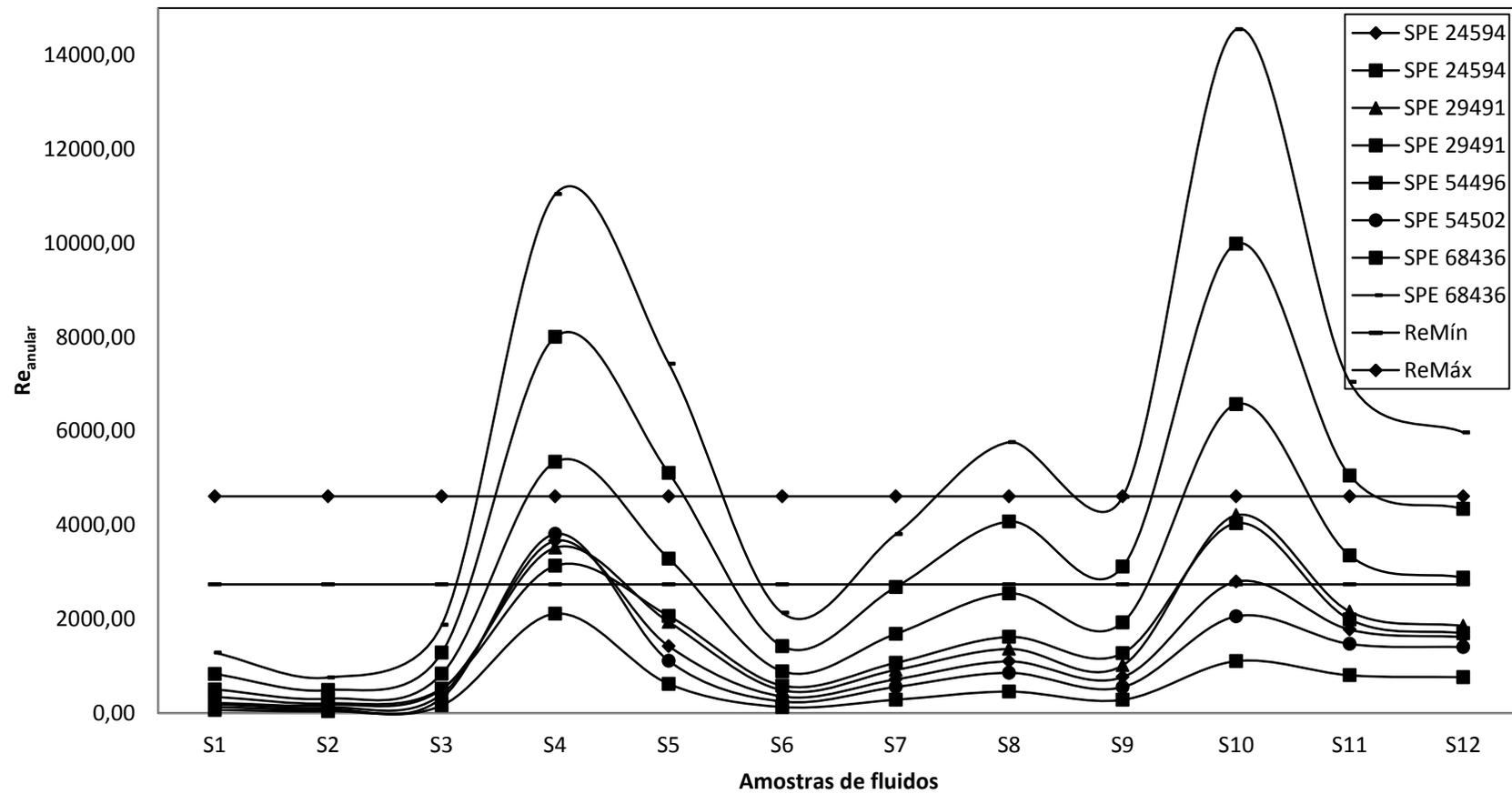


Figura 5.1 – Comparação dos números de Reynolds do anular dos poços reais operando com os fluidos listados com os números de Reynolds do anular limitadores da unidade experimental analisada.

Analisando as possíveis combinações, optou-se pela escolha do poço SPE 68436 com o fluido S9, que apresenta um Reynolds de 4600,45, para os cálculos subsequentes. Foi escolhido este poço, pois os Re nas contrações que serão analisadas permanecem condizentes com as limitações da bancada.

Com o número de Reynolds que será utilizado na bancada já definido, foi possível definir a vazão com que ela será operada, fazendo o passo inverso do cálculo do número de Reynolds, isolando a velocidade, como mostra a Equação (5.4).

$$V = \frac{Re \mu}{\rho D} \quad (0.22)$$

De posse da velocidade a ser utilizada, calculou-se a vazão correspondente, definida pela Equação (5.5). Utilizaram-se ainda os dados apresentados pelo medidor de vazão, como massa específica e viscosidade do fluido. Os dados obtidos com essa análise são apresentados na Tabela 5.6.

$$Q = V.A \quad (0.23)$$

Em que  $Q$  representa a vazão em  $m^3/s$ .

**Tabela 5.6 - Vazão determinada para operar a bancada.**

$Re_{anular}$	$\rho[kg/m^3]$	$\mu[Pa.s]$	$d_e[mm]$	$d_i[mm]$	$V_{anular}[m/s]$	$Q[m^3/s]$
4600,45	996,58	0,00085	101,6	60,0	0,08476	0,00049805

Com isso, todos os dados relativos ao fluido e condições de operações foram definidos, podendo, assim, passar para a avaliação da partícula.

Como o controle da bancada se dá pelo Re da contração, converteram-se os números de Reynolds da seção anular para os das contrações utilizadas a fim de manter a vazão definida. Para isso, primeiramente obteve-se a velocidade na contração, utilizando a conservação da massa. Igualaram-se as vazões do anular com as de ambas as contrações,  $\beta=2,12$  (25,4 mm) e  $\beta=4,25$  (12,7 mm), como mostra a Equação (5.6). Em seguida, pôde-se calcular o número de Reynolds da

contração, utilizando para isso a Equação (5.7). Os parâmetros obtidos são apresentados na Tabela 5.7.

$$V_{contração} = A_{contração} \frac{V_{anular}}{A_{anular}} \quad (0.24)$$

$$Re_{contração} = \frac{Re_{anular} V_{contração} d_{contração}}{V_{anular} D_h} \quad (0.25)$$

**Tabela 5.7 -  $Re_{contração}$  utilizados.**

Razão de contração [-]	$Re_{contração}$
4,25	58538
2,12	29269

## 5.2 Definição dos parâmetros da partícula

Primeiramente fez-se a análise da similaridade geométrica. Determinando, com isso, os diâmetros máximos e mínimos que a partícula deve possuir para que o fator de escala seja mantido. Para isso, utilizou-se a Equação (5.8).

$$d_p = \frac{D_p}{D_h} d_h \quad (0.26)$$

Na Equação (0.26)  $d_h$  refere-se ao diâmetro hidráulico da unidade experimental e  $D_h$  o do poço real.

Como, segundo os dados presentes na Tabela 3.3, os diâmetros das partículas presentes em perfurações reais variam de 1,016 a 6,982 mm, obteve-se uma faixa de valores possíveis. Esses valores são apresentados na Tabela 5.8.

**Tabela 5.8 - Diâmetros admitidos segundo similaridade geométrica.**

<b><math>d_p</math> [mm]</b>	
Mínimo	0,54
Máximo	3,69

Não obstante, foi realizado o cálculo através do número de Stokes para confirmar a similaridade do escoamento. Para isso, primeiramente foi calculado o  $St$  referente ao poço e fluido analisados. Para isso, foram utilizados os dados da Tabela 3.1 para obter os parâmetros referentes ao poço, como a velocidade do fluido e o comprimento característico (neste caso, utilizou-se o diâmetro hidráulico). Para a definição da viscosidade do fluido, utilizou-se a Tabela 5.3. Já para os parâmetros referentes à partícula, foram utilizados dados da Tabela 3.3 para definir a massa específica e diâmetro. Variando os diâmetros das partículas apresentadas na Tabela 3.3. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.8.

**Tabela 5.9 - Stokes mínimo e máximo do poço e fluido analisados.**

<b>St</b>	
Mínimo	0,096
Máximo	4,537

Com isso, foi avaliado o  $St$  da bancada utilizando a água como fluido e ureia como particulado. Vieira (2017) apresenta os dados fornecidos pelo fabricante da partícula em análise, representados na Tabela 5.10.

**Tabela 5.10 - Dados fornecidos pelo fabricante acerca do particulado utilizado.**

Diâmetro médio ( $\overline{D_p}$ )	$0,8 \text{ mm} < \overline{D_p} < 1,2 \text{ mm}$
Massa Específica à 25°C	$1,5 - 1,6 \text{ g/cm}^3$

**Fonte: Vieira (2017)**

Utilizando os dados do fluido, da bancada e da Tabela 5.10, combinando o menor diâmetro com a menor massa específica das partículas esperados, e os respectivos valores limites superiores e fazendo a média, obteve-se o valor do número de Stokes médio presente na unidade experimental, conforme apresentado na Tabela 5.11.

**Tabela 5.11 - Stokes da bancada analisada.**

	<b>St</b>
Médio	0,144

Nota-se, com isso, que o número de Stokes médio da bancada experimental está, de fato, dentro da faixa apresentada na Tabela 5.9, respeitando a similaridade representada pelo adimensional de Stokes.

### 5.2.1 Similaridade geométrica

Para que se garanta a similaridade geométrica, é necessário que todos os parâmetros existentes respeitem uma correlação, como apresentado na Seção 2.5.1.1. Entretanto, como nem todos os dados do poço analisado foram encontrados na literatura, apenas algumas dimensões foram analisadas.

Como a construção da bancada não foi projetada levando em conta a semelhança com o poço aqui analisado, a similaridade geométrica não é atendida por completo, como apresentado na Tabela 5.12.

**Tabela 5.12 - Similaridade geométrica.**

	<b>Unidade experimental</b>	<b>Poço</b>	<b>Constante</b>
$D_{ip}$	101,6 mm	127 mm	1,25
$D_{ec}$	60 mm	48,26 mm	0,804333
$D_{pMínimo}$	0,8 mm	1,01 mm	1,2625
$D_{pMáximo}$	1,2 mm	6,982 mm	5,818333
$V_{anular}$	0,9 m/s	1,52 m/s	16,12
$V_{coluna}$	0,18 m/s	0,93 m/s	5,27

Na Tabela 5.12  $D_{ip}$ ,  $D_{ec}$  e  $D_p$  representam os diâmetros interno do poço, externo da coluna de perfuração e da partícula, respectivamente.  $V_{anular}$  e  $V_{coluna}$  representam as velocidades na região anular e na coluna, respectivamente.

Para que fosse respeitada a similaridade em todas as seções analisadas, algumas dimensões da unidade experimental deveriam ser alteradas para manter a mesma constante  $\lambda$  e  $k$  (referente aos diâmetros e velocidades, respectivamente). Para tal, definiu-se como padrão a constante  $\lambda = 1,25$  e  $k = 10$ . Os diâmetros e velocidades obtidos com essa análise são apresentados na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 - Parâmetros respeitanto a constante de similaridade.

	Unidade experimental	Poço	$\lambda$
$D_e$	101,6 mm	127 mm	1,25
$d_i$	38,61 mm	48,26 mm	1,25
$D_{p\text{Mínimo}}$	0,81 mm	1,01 mm	1,25
$D_{p\text{máximo}}$	5,58 mm	6,982 mm	1,25
$V_{\text{anular}}$	0,152 m/s	1,52 m/s	10
$V_{\text{coluna}}$	0,093 m/s	0,929 m/s	10

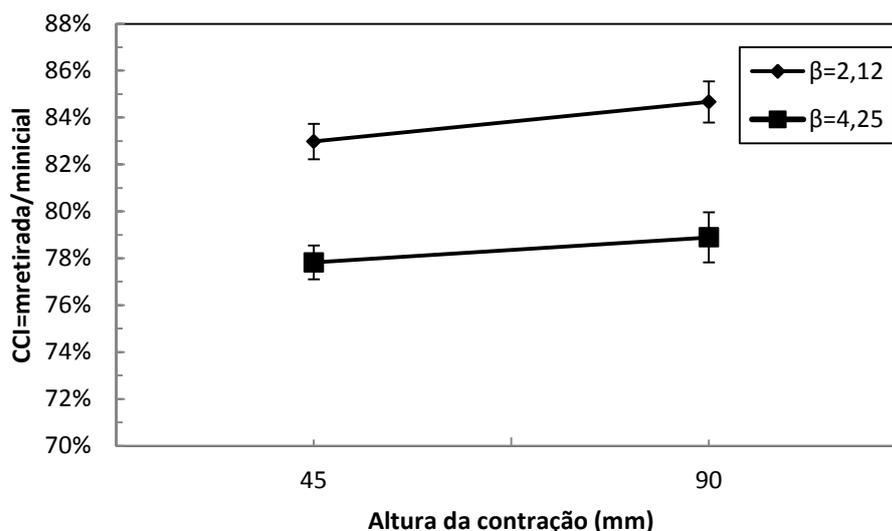
### 5.3 Consideração sobre a análise dimensional

Ressalta-se aqui que parte da similaridade geométrica foi atendida, garantindo o fator de escala para as partículas utilizando como base o diâmetro hidráulico, além da dinâmica, garantida pelos números adimensionais de Reynolds e Stokes. Com isso, não foi possível atender uma totalidade da semelhança geométrica, pois a unidade experimental já estava construída, inviabilizando sua adaptação para a análise em questão, pelo fato de não possuir uma broca efetivamente e pelo e da diferença de rugosidade apresentada. Além disso, a semelhança dinâmica não pôde ser confirmada pela deficiência em obter dados do poço em questão para comparar com os dados obtidos experimentalmente. Porém, buscou-se com o presente trabalho, agregar um pouco a mais para a validação da unidade experimental analisada.

### 5.4 Eficiência de limpeza

Os parâmetros de operação e a metodologia do experimento já foram apresentados na Seção 4 e a vazão de operação, baseado no  $Re$  definido, juntamente com a especificação da partícula já foram mencionados na Seção 5.1 e 5.2.

Inicialmente a discussão abordará os resultados obtidos utilizando da circulação direta. A Figura 5.2 apresenta os resultados obtidos do experimento.



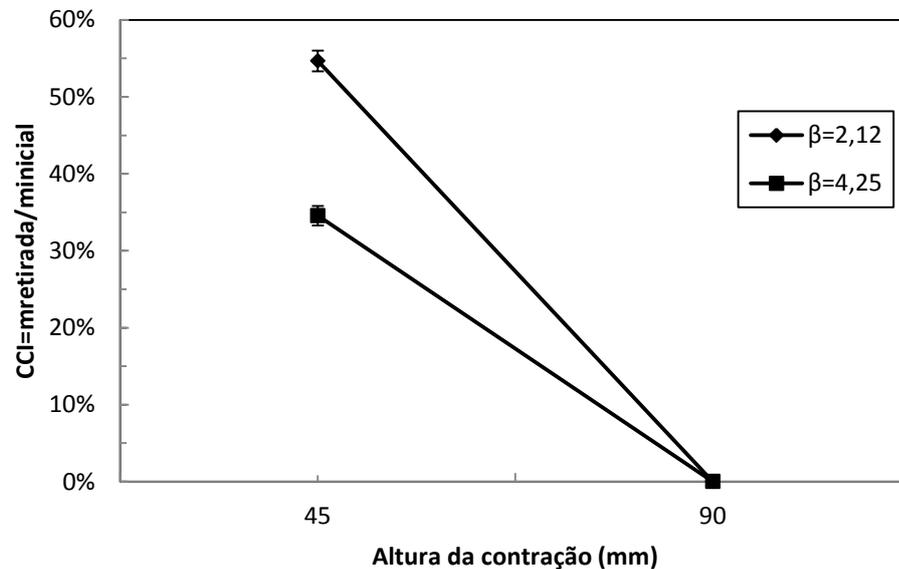
**Figura 5.2 - Resultado da eficiência de limpeza operando com circulação direta.**

Observando a Figura 5.2, os resultados mostram que para uma mesma altura da contração em relação ao fundo do leito, a contração menos abrupta obteve um resultado melhor de eficiência de limpeza. Segundo King *et al.* (1990), uma contração menos abrupta tem a capacidade de espalhar o jato mais amplamente que uma contração mais abrupta, assim atingindo um número maior de partículas e gerando uma melhor eficiência de limpeza. Observa-se também que para uma mesma contração a diferença de altura não influencia significativamente na eficiência de limpeza.

O resultado obtido para o experimento com a contração  $\beta=2,12$  e utilizando a altura de 45 mm resultou em 83% de CCI e para a altura de 90 mm tem-se 85% de CCI. Já para a contração de  $\beta=4,25$  operando na altura de 45 mm tem-se 78% de CCI, já com a altura de 90 mm 79%.

Quando se trata de mudanças de contração em circulação direta, observam-se mudanças significativas nos resultados da CCI. Segundo Peker e Helvacı (2011), em contrações mais abruptas a zona de vortice turbulento é maior, portanto a recirculação de fluido é mais intensa nessas regiões. Quanto maior a área da contração, menor é a velocidade com que o fluido chega ao fundo do poço, assim gerando menor turbulência e causando menor recirculação no fundo do leito. Porém essa área da contração não pode ser excessivamente grande, pois a velocidade do fluido será insuficiente para gerar a suspensão das partículas.

A Figura 5.3 apresenta os resultados obtidos para a circulação reversa.



**Figura 5.3 – Resultado da eficiência de limpeza operando com circulação reversa.**

A altura da contração em relação ao fundo do poço é um fator primordial no caso de circulação reversa, pois quanto mais próximo do leito maior a facilidade de carregamento de partículas, já que as partículas são forçadas a entrar na contração com maior facilidade. Segundo Daroz (2015), a dificuldade em carregar partículas na circulação reversa está associada à distância entre a contração e o fundo do poço, uma vez que a quantidade de movimento no anular é menor, evidenciando a influência da altura da contração.

Operando em circulação reversa com alturas de contração muito distantes do fundo do leito, o carregamento de partícula pode não ocorrer, pois a suspensão das partículas é prejudicada com o aumento dessa distância. No presente trabalho obteve-se CCI nulo utilizando de circulação reversa com a altura de 90 mm, para ambas as contrações.

Utilizando circulação reversa e operando a altura de 45 mm da contração em relação ao leito, para ambos as contrações, obtiveram-se resultados não nulo, ou seja, com a redução da altura é esperado um resultado de CCI maior, corroborando os resultados obtidos por Vieira (2017).

Realizando os experimentos de circulação reversa a 45 mm de altura da contração em relação ao leito, tem-se de resultado para a contração  $\beta=2,12$  de 55%

de CCI e para a contração  $\beta=4,25$  de 35%. Essa diferença de eficiência de limpeza que as contrações geraram pode ser justificada pelo fato da contração de maior área ter um alcance de partícula maior, assim sugando maior quantidade de partículas. Entretanto, essa área não pode ser demasiadamente grande, pois isso gera uma queda de velocidade, conseqüentemente dificultando a suspensão e sucção de partículas.

Apesar de algumas características do experimento terem variado em relação ao realizado por Vieira (2017), notam-se que alguns resultados foram mantidos. Operando com a circulação direta, Vieira (2017) observou que a altura não exerce grande influência no CCI. Em contraponto, operando com circulação reversa, a distância da contração em relação ao fundo do poço desempenha fator importante na quantificação do CCI.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na primeira parte do presente trabalho foi realizada a análise dimensional da bancada presente no CERNN, na UTFPR, adequando-a para melhor representar situações verificadas em operações de perfurações reais. O poço definido para a análise foi o apresentado no trabalho SPE 68436 operando com o fluido S9, presente na literatura. Após a determinação das condições que melhor representassem o poço, foi analisada a eficiência de limpeza da unidade experimental. Para tal, realizou-se a verificação alterando os tipos de circulações entre direta e reversa, altura da contração e razão de contração.

Para a análise da eficiência de limpeza, observou-se que a configuração apresentada pela contração com razão de contração de 2,12 a 90 mm do fundo do poço operando com circulação direta resultou na maior eficiência de limpeza para as condições analisadas. Para ambas as contrações operando com circulação direta, houve um leve aumento na eficiência quando distando 90 mm do fundo do poço em relação a 45 mm.

## REFERÊNCIAS

- ABDO, J. and Haneef, M. D., 2012. **Nano-Enhanced Drilling Fluids: Pioneering Approach to Overcome Uncompromising Drilling Problems**. Journal of Energy Resources Technology. 134 (1): pp. 014501-6.
- BARBOSA, M. V. **Análise paramétrica de escoamento particulado aplicado ao preenchimento de fraturas**. Dissertação de Mestrado: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.
- BELAVADI E CHUKUWU, M. N., CHUKWU, G. A., **Experimental Study of the Parameters Affecting Cutting Transportation in a Vertical Wellbore Annulus**, Western Regional Meeting, California, 1994
- BOURGOYNE, A. T., Cheever, M.E., Mulheim, K.K. . Young, F. S. 1991. **Applied Drilling Engineering**, SPE Textbook Series, Vol. 2 Society of Petroleum Engineers, Richardson, TX.
- BURBA J. L., TEHAN W. F., HAMILTON F. D., HOLMAN W. E., CHIRSTENSON C. P., MCKENZIE J., **Field evaluations confirm superior benefits of MMLHC fluid system on hole cleaning, borehole stability, and rate of penetration**, 19956 SPE/IADC, 1990.
- CAENN, R., Darley, H. C. H., and Gray, G. R. 2011. **Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids**. Sixth Edition, Gulf Professional Publishing, an imprint of Elsevier.
- ÇENGEL, Y.A.; CIMBALA, J.M. **Mecânica dos Fluidos – Fundamentos e Aplicações**, 1ª Edição, Editora McGrawHill, 2007.
- CHENG, Nian-Sheng, **Formula for the Viscosity of a Glycerol-Water Mixture**, 2008.
- CHO, H., SHAH, S. N., OSISANYA, S. O. **Selection of Optimum Coiled Tubing Parameters Through the Cutting Bed Characterization**. Paper SPE 68436 presented at the 2001 SPE/ICoTA Coiled Tubing Roundtable, Houston, 7-8 March.
- DARLEY, H. C. H.; GRAY, G. R. **Composition and properties of drilling and completion fluids**. Fifth ed. .Houston: Gulf Professional Publishing, 1988.
- DAROZ, V. **Investigação numérica da circulação direta e reversa no processo de perfuração de poços de petróleo**. Trabalho de Conclusão de Curso: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.
- DIAS, José Luciano de Mattos ; QUAGLINO, Maria Ana; **A questão do petróleo no Brasil: uma história da PETROBRAS**. Rio de Janeiro: CPDOC: PETROBRAS, 1993. 211p.

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 7o ed. LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2009.

FREIRE, I. S., **Dossiê técnico: Reologia escoamento e deformação da matéria**. Centro de apoio ao desenvolvimento tecnológico – CDT/UnB. Outubro 2012.

GREEN, M. D., THOMESSEN, C. R., WOLFSON, L., BERN, P. A., **An integrated solution of extended-reach drilling problems in the Niakuk field, Alaska: part II- hydraulics transport and PWD**, 56564 SPE, 1999.

HALL, H. N.; THOMPSON, Howard; NUSS, Frank. **ABILITY OF DRILLING MUD TO LIFT BIT CUTTINGS**, 1950.

HOSSAIN, M. E. and AL-MAJED, A. A. 2015. **Fundamentals of Sustainable Drilling Engineering**. Scrivener Publishing LLC.

HUSSAINI, S.; AZAR, J. **Experimental Study of Drilled Cuttings Transport Using Common Drilling Muds**. Society of Petroleum Engineers Journal, v. 23, 1983.

ISO GUM, **Avaliação de dados de medição – Guia para a expressão de incerteza de medição**, 2008.

KARA, D. T. *et al.* **Dynamically Overbalanced Coiled Tubing Drilling on the North Slope of Alaska**. Paper SPE 54496 presented at the 1999 SPE/ICoTA Coiled Tubing Roundtable, Houston, 25-26 May.

KELESSIDIS, V. C., MAGLIONE, R., TSAMANTAKI, C., ASPIRTAKIS, Y., **Optimal determination of rheological parameters for Herschel-Bulkley drilling fluids and impact on pressure drop, velocity profiles and penetration rates during drilling**, Journal of Petroleum Science and Engineering 53, 2006.

KELESSIDIS, V. C., BANDELIS, G. E., **Flow Patterns and Minimum Suspension Velocity for Efficient Cuttings Transport in Horizontal and Deviated Wells in Coiled-Tubing drilling**. SPE Drilling and Completion, December 2004.

KING, I., BRATU, C., DELBAST, B. *et al.* **Hydraulic Optimization of PDC Bits**. Society of Petroleum Engineers. European Petroleum Conference, 21-24 October, The Hague, Netherlands, 1990.

KIRK, A., SEMBIRING, T. **Application of CTD Offshore, Indonesia Phase One Pilot Project**. Paper SPE 54502 presented at the 1999 SPE/ICoTA Coiled Tubing Roundtable, Houston 25-26 May.

KLÖCKNER, W., GACEM, R., ANDERLEI, T. *et al.* **Correlation between mass transfer coefficient  $kLa$  and relevant operating parameters in cylindrical disposable shaken bioreactors on a bench-to-pilot scale**. J Biol Eng (2013) 7: 28. doi:10.1186/1754-1611-7-28.

KUMAR, P. S., AL-AMRI, B., KOULI, P., VAN GISBERGEN, S., SHIDI, S., Petroleum Development Oman, FERDIANSYAH, E., MOWAT, P. **Coiled-Tubing Reverse Circulation – An Efficient Method of Cleaning Horizontal Wells in a Mature, Pressure-Depleted Field**, 2005.

LOCKETT, T. J.; RICHARDSON, S. M.; WORRAKER, W. J. **The Importance of Rotation Effects for Efficient Cuttings Removal During Drilling**. SPE 25768, p. 861–869, 1993.

LOTH, E.. **Computational Fluid Dynamics of Bubbles, Drops and Particles**. Cambridge University Press (draft at [www.ae.uiuc.edu/~loth/CUP/Loth](http://www.ae.uiuc.edu/~loth/CUP/Loth)), 2010.

LUISING, L. J., NEWMAN, K. R., **Coiled Tubing Drilling**. Paper SPE24594 presented at the 1992 SPE Annual Technical Conference and Exhibition Washington, DC, 4-7 October.

LICHANG, L.; DAJUN, R.; KEFU, L.; YISHAN, W.; TECHNOLOGY, D. **Research and Application of Reverse Circulation Drilling Technology**. SPE International, p. 1–7, 2006.

LIM, K. M.; CHUKWU, G. A. **Bit Hydraulics Analysis for Efficient Hole Cleaning**. SPE Western Regional Meeting, 1996.

MACHADO, Roberto , LAGE, Janaina, **Folha de São Paulo Mercado**, São Paulo, ago. 2008. Custo do pré-sal pode passar de US\$1 tri. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/fsp/dinheiro/fi3008200804.htm>> Acesso em: 26 abr. 2017.

MARTINS, A. L.; SA, C. H. M.; LOUREN, A. M. F.; CAMPOS, W. **Optimizing Cuttings Circulation In Horizontal Well Drilling**. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 1996.

MCCOLLUM, F. L., KAMARUDDIN, A. W., LONGWELL, H. J., **Mud reformulation and solids control equipment upgrades improve hole cleaning and reduce environmental discharges – a case study**, 47827 IADC/SPE, 1998.

MENDES, P.R de Souza. **Dimensionless non-Newtonian fluid mechanics**. Department of Mechanical Engineering, Pontifícia Universidade Católica-RJ. Received 7 April 2007; received in revised form 24 July 2007; accepted 28 July 2017.

MICHEL, C., STEPHEN, R., SMITH, D., CROW, W., KING, G. E. **Reverse Circulation With Coiled Tubing – Results of 1600+ Jobs**, 2004.

MISHRA, R., SINGHT, S. N., SESHADRIT, V. **Velocity measurement in solid-liquid flows using an impact probe**. 12 Dec 1997.

NAZARI, T., HARELAND, G., University of Calgary and AZAR, J. J., University of Tulsa. **Review of Cuttings Transport in Directional Well Drilling: Systematic**

**Approach.** Paper SPE 132372 presented at the 2010 SPE Western Region Meeting, Anaheim, California, 27-29 May 2010.

NETO, J. B. O., & COSTA, A. J. D. (2007). A Petrobrás e a exploração de petróleo offshore no Brasil: um approach evolucionário. **Rev. Bras. Econ.** vol.61 no.1, Rio de Janeiro, mar. 2007. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0034-71402007000100006&script=sci\\_arttext&tlng=es](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0034-71402007000100006&script=sci_arttext&tlng=es)> Acesso em: 26 abr. 2017.

OKON, A. N.; AGWU, O. E. **Evaluation of the Cuttings Carrying Capacity of a Formulated Synthetic- Based Drilling Mud.** SPE International, , n. August, 2015.

PAREJO, Luiz Carlos, **Petróleo: A principal fonte de combustível do mundo contemporâneo,** mai. 2006. Disponível em: <<https://educacao.uol.com.br/disciplinas/geografia/petroleo-a-principal-fonte-de-combustivel-do-mundo-contemporaneo.htm>> Acesso em 11 mai. 17.

PEKER, S. M.; HELVACI, S. S. **Solid-Liquid Two Phase Flow.** 1º ed. Elsevier, 2011.

PETROBRAS, **Nossa produção de petróleo no pré-sal ultrapassa 1 milhão de barris por dia,** jun. 2016. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/nossa-producao-de-petroleo-no-pre-sal-ultrapassa-1-milhao-de-barris-por-dia.htm>> Acesso em: 24 abr. 2017.

PETROBRAS, **Pré Sal.** Disponível em: < <http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal/>> Acesso em: 24 abr. 2017.

PINTO, Helder Queiroz, **A Descoberta do Pré-Sal e as Mudanças do Marco Regulatório na Indústria Brasileira do Petróleo,** 2016. Disponível em: < <http://encyclopedie-energie.org/articles/descoberta-do-pr%C3%A9-sal-e-mudan%C3%A7as-do-marco-regulat%C3%B3rio-na-ind%C3%BAstria-brasileira-do-petr%C3%B3leo>> Acesso em: 11 mai. 17

PLÁCIDO, J., PINHO, R., **Brocas de Perfuração de Poços de Petróleo:** Virtual Book, 2009. Disponível em: <http://pt.scribd.com/doc/43815403/Apostila-de-Brocas>. Acesso em : 20 ago. 2011, 16:30:30

RAMOS, A. B. Jr. *et al.*, **Horizontal Slim-Hole Drilling With Coiled Tubing: Na Operator's Experience.** Paper IADC/SPE 23875 presented at the 1992 IADC/SPE Drilling Conference, New Orleans 18-21 February.

RASI, M., **Hole cleaning in large, high angle wellbores,** 27464 IADC/SPE, 1994.

SANSONI JÚNIOR, U. **Avaliação Por Simulação Computacional da Circulação Reversa na Perfuração de Poços de Petróleo.** Dissertação de Mestrado: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

SANTOS, V. T. S. **Estudo Experimental da Força de Impacto e do Coeficiente de Descarga de Bocais Ejetores Utilizados em Poços de Perfuração de Petróleo.** Trabalho de Conclusão de Curso: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

SIFFERMAN, Thomas R., Myers, George M., Haden, Elard L., Wahl, Harry A.: **Drill Cutting Transport in Full Scale Vertical Annuli**, 1973.

THOMAS, J. E.; TRIGGIA, A. A.; VEROTTI FILHO, C.; *et al.* **Fundamentos de Engenharia de Petróleo.** 1<sup>o</sup> ed. Editora Interciência Ltda., 2001

TRIPATHI, Manoj Kumar.; SAHU, Kirti Chandra.; GOVINDARAJAN, Rama. **Why a falling drop does not in general behave like a rising bubble.** Received 2014 Jan 9; Accepted 2014 Mar 24.

VIEIRA, Thiago. A. de M., **Avaliação experimental da força de impacto e eficiência de limpeza na perfuração de poços de petróleo utilizando circulação direta e reversa.** Trabalho de Conclusão de Curso: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

ZHANG, Feifei. *Et al.*, **Pressure Profile in Annulus: Solids Play a Significant Role.** Journal of Energy Resources Technology Copyright VC 2015 by ASME NOVEMBER 2015, Vol. 137 / 064502-1.

WALKER, S.; LI, J. **The Effects of Particle Size, Fluid Rheology, and Pipe Eccentricity on Cuttings Transport.** SPE 60755. SPE International, 2000.

WALTON, I. C., **Computer Simulator of Coiled Tubing Wellbore Cleanouts in Deviated Wells Recommends Optimum Pump Rate and Fluid Viscosity.** Paper SPE 29491 presented at the 1995 SPE Productions Operations Symposium, Oklahoma City, Oklahoma, 2-4 April.