

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

TIAGO AUGUSTO DE MOURA VIEIRA

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE LIMPEZA EM BACANDA  
EXPERIMENTAL UTILIZANDO CIRCULAÇÃO DIRETA E REVERSA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO  
(TCC2 – 38)

CURITIBA

2017

TIAGO AUGUSTO DE MOURA VIEIRA

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE LIMPEZA EM BANCADA  
EXPERIMENTAL UTILIZANDO 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. Admilson T. Franco

Coorientadores: Prof. Dr. Eduardo M. Germer

Eng. Rubens R. Fernandes, MsC

CURITIBA

2017

## TERMO DE ENCAMINHAMENTO

Venho por meio deste termo, encaminhar para apresentação a monografia do Projeto de Pesquisa "Avaliação da Eficiência de Limpeza em Bancada Experimental Utilizando Circulação Direta e Reversa", realizado pelo aluno Tiago Augusto de Moura Vieira, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica do Paraná.

Orientador: Prof. Dr Admilson T. Franco  
UTFPR - Damec

Coorientador: Prof. Dr Eduardo M. Germer  
UTFPR - Damec  
Eng. Rubens R. Fernandes, Msc

Curitiba, 12 de junho de 2017

## TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a “Avaliação da Eficiência de Limpeza em Bancada Experimental Utilizando Circulação Direta e Reversa”, realizado pelo aluno Tiago Augusto de Moura Vieira, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Tcc2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Eduardo M. Germer

DAMEC, UTFPR

Coorientador

Prof. Cezar O. R. Negrão, PhD

DAMEC, UTFPR

Avaliador

Prof. Dr. Giuseppe Pintaúde

DAMEC, UTFPR

Avaliador

Curitiba, 22 de Junho de 2017.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Aroldo Pereira Vieira e Katia Regina de Moura Vieira pelo suporte ao longo de todo o período de desenvolvimento do trabalho, proporcionando as condições para que fosse possível sua conclusão e períodos de descontração e descanso. Também, ao meu irmão André Felipe de Moura Vieira pelas risadas e momentos de descontração.

Agradeço aos amigos do *LabFlow* Diane Abe Ribeiro, Silvio Manenti Junior e Felipe Caetano pelos momentos de discussão e sugestões para o desenvolvimento do trabalho. Os momentos de descontração e conversas também foram extremamente importantes e gratificantes.

Aos amigos da Igreja Evangélica Menonita Nova Aliança sou grato pelos momentos de diversão fora da universidade. Em especial agradeço ao amigo Raul Hess pela ajuda no desenvolvimento de software utilizado no trabalho. Também agradeço a namorada Fernanda Perly por dividir comigo os momentos mais alegres e os mais difíceis.

Ao Prof. Dr. Admilson Teixeira Franco sou grato pela mentoria desde o período de iniciação científica, dando condições para o desenvolvimento tanto do trabalho, quanto desenvolvimento pessoal. Agradeço ao Prof. Dr. Eduardo Matos Germer por dispor-se a coorientar o projeto, proporcionando suporte e incentivo no desenvolvimento do trabalho. Ao Eng. Rubens Rosário Fernandes, Msc, agradeço pela mentoria e tempo investido em minha formação e por proporcionar momentos mais descontraídos.

Aos demais amigos do curso Fernando Machado Kroetz, Lucas Henrique de Oliveira, Giovanna Dranka e Luis Marcio agradeço pelos momentos de descontração e diversão. Também pelos momentos de discussão associados ao trabalho.

Por fim, agradeço à Petrobrás e PRH10 pelo suporte financeiro no desenvolvimento do trabalho.

## RESUMO

VIEIRA, Tiago Augusto de Moura. Avaliação da Eficiência de Limpeza em Bancada Experimental Utilizando Circulação Direta e Reversa. 2017. 102 f. Monografia (Engenharia Mecânica) – Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

No ramo petrolífero utilizam-se duas técnicas principais de bombeio de fluido de perfuração. A circulação direta, ou convencional, consiste na injeção do fluido através da coluna de perfuração, com seu retorno pelo anular. O bombeio do fluido na circulação reversa, por sua vez, é realizado através do anular e sua saída ocorre pela coluna de perfuração. Cada técnica apresenta peculiaridades quanto à hidrodinâmica do escoamento, afetando a capacidade de remoção de cascalhos do interior do poço. Dessa forma, foi conduzido um estudo experimental a fim de comparar as técnicas de bombeio de fluido. Os parâmetros analisados foram a eficiência de limpeza e a força média exercida pelo fluido no fundo do poço. A geometria da broca foi simplificada a uma contração abrupta com razão de contração  $\beta=2,7$ , e o fluido de trabalho utilizado foi água. Variações na vazão de bombeio do fluido apresentaram maiores alterações na força média determinada para a circulação reversa, quando comparada à direta. Isto ocorre, pois, na circulação reversa, a perda de carga devido à presença da contração ocorre somente após o impacto do fluido. A variação na altura da contração ocasionou alterações semelhantes na força média para ambas as técnicas. Quanto à eficiência de limpeza, a circulação direta se mostrou mais eficaz com a contração mais distante do fundo da bancada. Por outro lado, detectou-se que a circulação reversa pode se equiparar à direta, em termos de remoção de partículas, ao reduzir a distância da contração ao fundo do poço. Por fim, a visualização do escoamento permitiu concluir que, ao operar em circulação direta, partículas são aprisionadas em recirculações na região da contração. No contexto de perfuração isto representa partículas sendo retrabalhadas nas arestas cortantes da broca, causando possível desgaste precoce da ferramenta. Na circulação reversa, por outro lado, as partículas não são recirculadas ao redor da contração.

**Palavras-chave:** perfuração, circulação direta, circulação reversa, eficiência de limpeza, força média.

## ABSTRACT

VIEIRA, Tiago Augusto de Moura. Experimental Evaluation of Cuttings Removal Using Direct and Reverse Circulation. 2017. 102 f. Monografia (Engenharia Mecânica) – Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

In the oil and gas industry, two main techniques are used in drilling operations to pump the drilling mud. The direct circulation, or conventional circulation, consists of the injection of the fluid through the drilling pipe, and returning through the *annulus*. For the reverse circulation, however, the injection of the drilling mud is performed through the *annulus* and its outcome exits the drilling pipe. Each technique has its own specific traits, regarding the flow hydrodynamics, affecting the cuttings carrying capacity. Thus, an experimental study was conducted in order to compare the conventional and the reverse circulation. The analyzed parameters were the cuttings carrying capacity and the force exerted by the fluid at the bottom of the well. The geometry of the bit was simplified as a contraction ( $\beta=2,7$ ) and the fluid used was water. As the flow rate was increased, the reverse circulation showed greater variations in the mean force, when compared to the direct circulation. This occurs because energy losses due to the presence of the contraction, in reverse circulation, only happens after the fluid's impact. The variation of the distance from the contraction to the bottom of the well resulted in similar effects for both techniques. Regarding the cuttings carrying capacity, the conventional circulation showed to be more effective for greater contraction heights. On the other hand, it was detected that the reverse circulation can match the direct as the distance from the contraction to the bottom of the well is reduced. From the flow visualization, in the conventional circulation, it was noticed that particles are kept in recirculations close to the contraction. In field context this means that cuttings are reprocessed by the drilling bit, which may lead to reduction of the bit life. When the experimental *apparatus* is operating in reverse circulation, however, the particles are not recirculated close to the contraction.

**Keywords:** drilling, direct circulation, reverse circulation, cuttings carrying capacity, mean force.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação da circulação direta (a) e reversa (b) no processo de perfuração de poços de petróleo. FONTE: Autoria Própria.....	11
Figura 2 – Ilustração dos limites e referenciais para a determinação da pressão estática em uma coluna de fluido. FONTE: Adaptado de FOX et al. (2009). ....	16
Figura 3 – Curvas de tensão em função da taxa de deformação de dois fluidos newtonianos com diferentes viscosidades. ....	17
Figura 4 - Curvas de tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para fluidos pseudoplásticos, viscoplásticos e newtonianos .....	19
Figura 5 - Ilustração do volume de controle utilizado para a dedução da Equação (2.15).....	25
Figura 6 – Balanço de forças em uma partícula (a) em escoamento horizontal e (b) em escoamento vertical. ....	29
Figura 7 – Ilustração da formação de vórtices de Taylor em um anular. FONTE: Adaptado de Belavadi e Chukwu (1994).....	31
Figura 8 – Escoamento cruzado abaixo da região da broca. FONTE: Adaptado de Warren & Winters (1984).....	37
Figura 9 - Representação esquemática do circuito da bancada experimental. ....	43
Figura 10 – Ilustração da instrumentação da bancada.....	44
Figura 11 – Ilustração do posicionamento do leito de partículas.....	50
Figura 12 - (a) Imagens obtidas pela câmera de alta velocidade, e (b) Imagens binárias filtradas pelo <i>software ImageJ</i> . ....	52
Figura 13 – Representação do fundo do poço com os pontos de tomada de pressão ilustrados.....	53
Figura 14 -Comparação dos resultados experimentais com os obtidos por Santos (2014). $h = 100 \text{ mm} - \beta = 2,7$ .....	56
Figura 15 – Comparação com a literatura dos resultados de força média, para circulação direta, em função do número de Reynolds na contração. ....	57
Figura 16 – Resultados de pressão normalizada em função do raio normalizado para a circulação direta com $h=25\text{mm}$ e $\beta = 2,7$ – Influência da Vazão. ....	58
Figura 17– Resultados de pressão normalizada em função do raio normalizado para a circulação direta com $Re = 30.000$ e $\beta = 2,7$ – Influência da altura da contração ao fundo da bancada.....	59
Figura 18– Resultados de pressão normalizada em função do raio normalizado para a circulação reversa com $h=25\text{mm}$ e $\beta = 2,7$ – Influência da Vazão. ....	60
Figura 19 – Resultados de pressão normalizada em função do raio normalizado para a circulação reversa com $Re = 30.000$ e $\beta = 2,7$ – Influência da Altura da contração ao fundo da bancada.....	61
Figura 20 – Comparação entre os resultados de força média em função do número de Reynolds na contração para a circulação direta e reversa.....	62

Figura 21 – Resultados de eficiência de limpeza em função do número de Reynolds na contração comparando a circulação direta e reversa utilizando $h = 100$ mm e $\beta = 2,7$ – Influência da vazão. ....	63
Figura 22 – Resultados de eficiência de limpeza em função da altura da contração ao fundo da bancada comparando a circulação direta e reversa utilizando $Re = 30.000$ e $\beta = 2,7$ – Influência da altura da contração. ....	64
Figura 23 – Avaliação da remoção de partículas sólidas em função do tempo, a partir de técnica de visualização, para a circulação direta com $\beta = 2,7$ e $h = 100$ mm – Influência da vazão. ....	67
Figura 24– Avaliação da remoção de partículas sólidas em função do tempo, a partir de técnica de visualização, para a circulação direta com $\beta = 2,7$ e $Re = 30.000$ – Influência da altura da contração. ....	70
Figura 25 – Ampliação das imagens obtidas utilizando (a) $Re=30.000$ em $t = 0s$ , (b) $Re = 30.000$ em $t = 300s$ , (c) $Re = 50.000$ em $t = 0s$ e (d) $Re = 50.000$ em $t = 300s$ . ....	74
Figura 26 – Avaliação da remoção de partículas sólidas em função do tempo, a partir de técnica de visualização, para a circulação reversa com $\beta = 2,7$ e $h = 100$ mm – Influência da vazão. ....	75
Figura 27 – Ampliação das imagens obtidas utilizando (a) $h = 25mm$ em $t = 0s$ , (b) $h = 25mm$ em $t = 300s$ , (c) $h = 100mm$ em $t = 0s$ e (d) $h = 100mm$ em $t = 300s$ . ....	78
Figura 28 – Avaliação da remoção de partículas sólidas em função do tempo, a partir de técnica de visualização, para a circulação reversa com $\beta = 2,7$ e $Re = 30.000$ – Influência da altura da contração. ....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação da influência dos parâmetros abordados por Nazari <i>et al.</i> (2010) na eficiência de limpeza de poços .....	27
Tabela 2 – Principais estudos avaliando o transporte de sólidos em poços de petróleo. ....	35
Tabela 3 – Principais estudos avaliando a incidência de jatos líquidos em anteparos. ....	36
Tabela 4 - Principais estudos de operações de perfuração utilizando a circulação reversa. ....	40
Tabela 5 - Sensores utilizados na bancada experimental .....	45
Tabela 6 – Valores de vazão volumétrica em cada caso avaliado, com o valor de número de Reynolds equivalente na contração e na região anular. ....	47
Tabela 7 – Informações fornecidas pelo fabricante acerca do particulado utilizado..	48
Tabela 8 – Exemplo da conversão das imagens coletadas em imagens binárias.....	66
Tabela 9 – Imagens obtidas para teste conduzido em circulação direta utilizando $h = 100$ mm Influência da Vazão.....	69
Tabela 10 – Imagens obtidas para teste conduzido em circulação direta utilizando $Re = 30.000$ Influência da Altura da Contração. ....	72
Tabela 11 – Imagens obtidas para teste conduzido em circulação reversa utilizando $h = 100$ mm Influência da Vazão.....	73
Tabela 12 – Imagens obtidas para teste conduzido em circulação reversa utilizando $Re = 30.000$ – Análise da influência da altura da contração. ....	77
Tabela 13 – Relação de equipamentos utilizados e suas incertezas associadas .....	90
Tabela 14 - Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação direta, $Re = 30.000$ e $h = 25$ mm.....	91
Tabela 15 – Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação direta, $Re = 30.000$ e $h = 50$ mm.....	91
Tabela 16 – Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação direta, $Re = 30.000$ e $h = 100$ mm.....	92
Tabela 17 - Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação direta, $Re = 40.000$ e $h = 25$ mm.....	92
Tabela 18 - Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação direta, $Re = 40.000$ e $h = 50$ mm.....	92
Tabela 19 - Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação direta, $Re = 40.000$ e $h = 100$ mm.....	92
Tabela 20 - Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação direta, $Re = 50.000$ e $h = 25$ mm.....	93
Tabela 21 - Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação direta, $Re = 50.000$ e $h = 50$ mm.....	93

Tabela 22 - Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação direta, $Re = 50.000$ e $h = 100$ mm.....	93
Tabela 23 - Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação reversa, $Re = 30.000$ e $h = 25$ mm.....	93
Tabela 24 – Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação reversa, $Re = 30.000$ e $h = 50$ mm.....	94
Tabela 25 – Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação reversa, $Re = 30.000$ e $h = 100$ mm.....	94
Tabela 26 - Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação reversa, $Re = 40.000$ e $h = 25$ mm.....	94
Tabela 27 – Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação reversa, $Re = 40.000$ e $h = 50$ mm.....	94
Tabela 28 – Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação reversa, $Re = 40.000$ e $h = 100$ mm.....	95
Tabela 29 - Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação reversa, $Re = 50.000$ e $h = 25$ mm.....	95
Tabela 30 – Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação reversa, $Re = 50.000$ e $h = 50$ mm.....	95
Tabela 31 – Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação reversa, $Re = 50.000$ e $h = 100$ mm.....	95
Tabela 32 – Resultados de eficiência de limpeza e suas incertezas associadas utilizando a circulação direta e $h = 100$ mm .....	96
Tabela 33 – Resultados de eficiência de limpeza e suas incertezas associadas utilizando a circulação direta e $Re = 30.000$ .....	96
Tabela 34 – Resultados de eficiência de limpeza e suas incertezas associadas utilizando a circulação reversa e $h = 100$ mm .....	96
Tabela 35 – Resultados de eficiência de limpeza e suas incertezas associadas utilizando a circulação reversa e $Re = 30.000$ .....	96

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Símbolos Latinos

$p$	Pressão [Pa]
$g$	Aceleração da gravidade [m/s <sup>2</sup> ]
$h$	Altura da coluna d'água [m]
$D$	Diâmetro [m]
$Re$	Número de Reynolds [-]
$v$	Velocidade do Fluido [m/s]
$C_A$	Coefficiente de Arrasto [-]
$V$	Velocidade Relativa da partícula [m/s]
$F_A$	Força de Arrasto [N]
$St$	Número de Stokes [-]
$L$	Comprimento [m]
$A$	Área [m <sup>2</sup> ]
$\dot{m}$	Vazão mássica [kg/s]
$H_{lt}$	Perda de Carga [m]
$C_d$	Coefficiente de Descarga [-]
$Q$	Vazão volumétrica [m <sup>3</sup> /s]
$N$	Número de Pixels [-]

### Símbolos Gregos

$\rho$	Massa específica [kg/m <sup>3</sup> ]
$\mu$	Viscosidade [Pa.s]
$\tau$	Tensão de Cisalhamento [Pa]
$\dot{\gamma}$	Taxa de Deformação [s <sup>-1</sup> ]
$\beta$	Razão de Contração [-]
$\delta$	Incerteza de medição

### Subscritos

$p$	Referente à partícula
$f$	Referente ao fluido

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
1.1	Contextualização do Tema	10
1.2	Caracterização do Problema	12
1.3	Objetivos	13
1.4	Justificativa	14
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>15</b>
2.1	Pressão Estática	15
2.2	Classificação Reológica dos Fluidos	16
2.2.1	Fluidos Newtonianos	17
2.2.2	Fluidos Não-Newtonianos	18
2.3	Turbulência	20
2.4	Escoamento Bifásico Líquido-Sólido	21
2.4.1	Força de Arrasto	22
2.4.2	Número de Stokes	23
2.5	Força de Impacto de Jatos	24
2.6	Síntese do Capítulo	26
<b>3</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>27</b>
3.1	Eficiência de limpeza de poços de petróleo	27
3.2	Jatos em processos de perfuração	36
3.3	Comparação Entre Circulação Direta e Circulação Reversa	39
3.4	Síntese do Capítulo	41
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>43</b>
4.1	Descrição da Bancada Experimental	43
4.1.1	Instrumentação	44
4.1.2	Controle da Bancada	45
4.2	Condições Operacionais	46
4.2.1	Fluido de Trabalho	46
4.2.2	Número de Reynolds	47
4.2.3	Contração	47
4.2.4	Fase dispersa	48
4.3	Metodologia	49
4.3.1	Readequação da Bancada	49
4.3.2	Parâmetros Avaliados	49
4.4	Síntese do Capítulo	54
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>55</b>
5.1	Força Média	55
5.1.1	Validação da bancada	55
5.1.2	Perfis de Pressão	58
5.1.3	Força Média	62

5.2	Eficiência de Limpeza	63
5.3	Visualização	65
5.3.1	Circulação Direta	67
5.3.2	Circulação Reversa	71
5.4	Síntese do Capítulo	80
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
6.1	Sugestões Para Trabalhos Futuros	83
	REFERÊNCIAS	84
	APÊNDICE A – AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS EXPERIMENTAIS	89
	APÊNDICE B – INCERTEZAS EXPERIMENTAIS NOS DADOS COLETADOS	91

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização do Tema

Atividades de extração e produção de petróleo são importantes para o contexto industrial brasileiro, tanto no âmbito socioeconômico quanto no desenvolvimento tecnológico e científico (CANELAS, 2004). A relevância do setor, no contexto econômico, pode ser notada a partir do percentual que representa em relação ao Produto Interno Bruto (PIB) do país: no ano de 2014, o setor de petróleo e gás representava 13% do PIB brasileiro (WPC, 2014). Além disso, a Associação Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), estabelece que 1% da receita bruta das companhias deve ser investida em pesquisa, desenvolvimento e inovação (ANP, 2017).

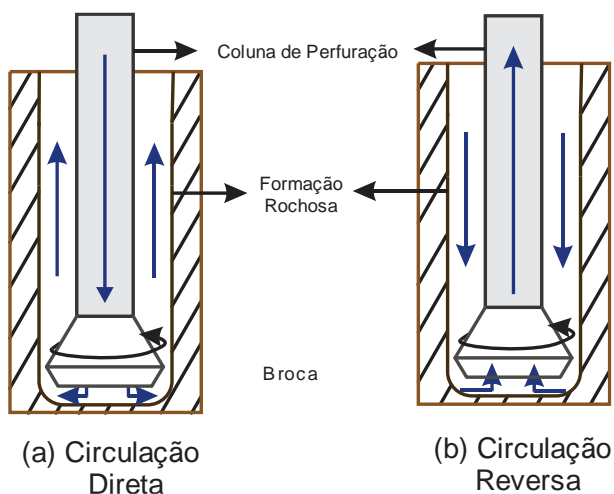
A exploração de poços de petróleo é tradicionalmente realizada através do processo de perfuração rotativa (BOURGOYNE et al., 1991), que utiliza uma broca presa à extremidade da coluna de perfuração. O movimento de rotação aplicado ao sistema possibilita que a broca cisalhe a formação rochosa, de forma a perfurar o poço de petróleo.

Durante a perfuração, o contato constante da broca com a formação rochosa e seus detritos provoca o desgaste da ferramenta (BOURGOYNE et al., 1991). Usualmente bombeia-se o fluido de perfuração em direção à formação rochosa, como ilustrado na Figura 1 (a), para reduzir o desgaste da broca ao lubrificá-la e refrigerá-la. Ainda, o fluido de perfuração é responsável por carrear os cascalhos (detritos) do fundo do poço para a superfície. Dessa forma, o uso do fluido de perfuração permite a continuidade da operação de perfuração, a avaliação geológica do local e redução da possibilidade de aprisionamento da coluna de perfuração (Okon & Agwu, 2015). Por fim, Thomas (2001) cita outras funções do fluido de perfuração, como:

- Evitar influxos indesejados de óleo e gás para o interior do poço durante a perfuração;
- Realizar o seu equilíbrio hidrostático;
- Estabilizar estruturalmente as paredes do poço de perfuração;



- Manter o poço aberto até que seja realizado seu revestimento e cimentação.



**Figura 1 – Representação da circulação direta (a) e reversa (b) no processo de perfuração de poços de petróleo.**  
**FONTE: Autoria Própria.<sup>1</sup>**

Na Figura 1 são ilustradas as duas formas de bombeio do fluido de perfuração para o interior do poço: a circulação direta, Figura 1 (a), e a circulação reversa, Figura 1 (b). Como ilustrado, a circulação direta, ou circulação convencional, consiste na injeção do fluido através da coluna de perfuração, seguido pela retirada do fluido através do espaço anular. Na circulação reversa, por sua vez, a entrada do fluido se dá pela região anular e sua saída pelo interior da coluna de perfuração (SANSONI JÚNIOR, 2013).

Cada técnica de bombeio do fluido de perfuração apresenta características próprias do escoamento, o que resulta em particularidades durante o processo de perfuração. A circulação convencional é tradicionalmente associada a uma maior capacidade de resfriamento da broca, explicada pela intensa recirculação que ocorre nas regiões adjacentes à broca (HOPKIN, 1967). Essa recirculação, por outro lado, é também associada à queda na vida útil da ferramenta, pois gera retrabalho dos detritos nas arestas cortantes da broca (DAROZ, 2015; BACELAR JUNIOR, 2016). Quanto à circulação reversa, defende-se que a técnica gera condições melhores para carrear os detritos até a superfície, uma vez que a velocidade média do fluido

na coluna de perfuração é maior do que a velocidade na região anular (SANSONI JÚNIOR, 2013).

## 1.2 Caracterização do Problema

De acordo com Thomas (2001), a perfuração rotativa tem sido usada para a perfuração de poços desde 1900 nos Estados Unidos, quando se perfuravam poços de aproximadamente 350 metros de profundidade. Desde então o desenvolvimento desta técnica, aliada à evolução tecnológica, permitiu a perfuração de poços cada vez mais profundos.

Para a viabilidade destas operações, é essencial que a limpeza dos detritos ocorra de forma eficiente e constante. Isso ocorre por que o acúmulo de cascalho no fundo do poço pode ocasionar uma série de inconvenientes, como a redução da taxa de penetração e da vida útil da broca, a prisão da coluna ou até mesmo a obstrução completa do anular (SANSONI JÚNIOR, 2013). Sansoni Júnior (2013) indica que operações utilizando circulação reversa favorecem o carreamento dos cascalhos suspensos. O autor argumenta que a circulação reversa tende a aumentar a velocidade média de transporte das partículas, uma vez que a velocidade do fluido no interior da coluna é mais elevada do que sua velocidade na região anular.

De acordo com informações apresentadas na literatura, a presença de jatos na circulação direta favorece a velocidade com que a broca desestrutura as rochas (taxa de penetração), devido à força gerada pela incidência dos jatos na formação rochosa (SANTOS, 2014), e o resfriamento da broca. Estes mesmos jatos geram padrões de escoamento que favorecem a suspensão de partículas presentes em um leito de sólidos (MCISAN, 1964). Por outro lado, a circulação direta dificulta a interpretação geológica da formação rochosa, pois a colisão do jato com os detritos facilita a quebra dos cascalhos, diminuindo suas dimensões (DAROZ, 2015).

Bisson (1988) afirma, ainda, que a distribuição do escoamento ao redor da broca é extremamente importante, pois deve favorecer o carreamento dos cascalhos para a superfície. Além disso, o padrão do escoamento deve evitar a colisão de

---

<sup>1</sup> Figuras e tabelas não referenciadas a partir deste ponto são de autoria própria.

detritos com as arestas cortantes da broca, reduzindo assim o desgaste da ferramenta.

A circulação direta é aplicada na indústria petrolífera desde o início do uso da perfuração rotativa. A circulação reversa, por outro lado, começou a ser empregada em testes no ramo de mineração somente nos anos 70 na Austrália (GRANT, 2014). No Brasil a técnica só foi testada na indústria petrolífera por volta de 2008 (DAROZ, 2015). Desta forma sua aplicação industrial é relativamente recente, quando comparada à circulação convencional, e a disponibilidade de informações a respeito da perfuração reversa é limitada.

Assim, o trabalho busca explorar as possibilidades e limitações desta forma alternativa de perfuração, através do estudo experimental comparativo entre as duas técnicas de injeção de fluido utilizando como parâmetros de avaliação a eficiência de limpeza do poço e a força média exercida pelo fluido sobre a formação rochosa.

### **1.3 Objetivos**

O objetivo principal do trabalho é a comparação da dinâmica de escoamento em operações que utilizam as técnicas de bombeio de fluido de perfuração em circulação direta e reversa.

Santos (2014) avaliou o perfil de pressão gerado pelo impacto do fluido com o fundo do poço, a força média obtida a partir dos perfis de pressão e o coeficiente de descarga na contração. Para isso, Santos (2014) utilizou uma bancada feita em acrílico que simula algumas condições de um poço vertical operando em circulação direta.

A fim de viabilizar o presente trabalho, o aparato experimental utilizado por Santos (2014) foi adaptado. Desta forma, tornou-se possível a avaliação de parâmetros que, posteriormente, serão utilizados para comparação entre as diferentes técnicas de bombeio de fluido de perfuração. Os parâmetros avaliados são:

- Eficiência de limpeza do poço;
- Perfil de pressão gerado pelo impacto do fluido com o fundo do poço;

- Visualização do escoamento.

É avaliada a influência da vazão e da altura da contração ao fundo do poço nos parâmetros citados acima. Compara-se, ainda, os comportamentos ao operar a bancada em circulação direta e circulação reversa.

Para viabilizar a execução do trabalho, o projeto foi desenvolvido sem a aplicação de rotação à coluna de perfuração e a geometria da broca é simplificada a uma contração abrupta. Com o mesmo intuito, definiu-se o fluido de trabalho como a água. A adoção dessas hipóteses simplificadoras, no entanto, não deve interferir no comportamento qualitativo do escoamento, uma vez que as principais características das operações de perfuração direta e reversa foram preservadas: escoamento vertical em tubos concêntricos com redução de área na região próxima à broca.

#### **1.4 Justificativa**

As despesas com brocas giram em torno de 4% dos gastos com perfuração (REGALLA, 2011). De acordo com os dados fornecidos pela API, em 2012 nos Estados Unidos foram gastos 153 bilhões de dólares com a perfuração de poços de petróleo (API, 2016). Desta forma, elevar a eficiência das brocas, ao estender sua vida útil ou ao elevar a taxa de penetração na formação rochosa, resultará em reduções de custo consideráveis. Há alguns autores que correlacionam ambos os parâmetros à eficiência de limpeza do poço (HOPKIN, 1967; BISSON et al., 1988; LOCKETT et al., 1993; LIM; CHUKWU, 1996). Assim, determinar em quais condições há melhor transporte de sólidos pelo fluido é extremamente relevante para a rentabilidade da operação de perfuração.

Por se tratar de uma técnica empregada industrialmente há um tempo significativamente menor do que a circulação convencional, existem poucos estudos experimentais que abordem a dinâmica do escoamento envolvida no processo de injeção do fluido através da circulação reversa. Desta forma, tem-se também uma oportunidade acadêmica, com a possibilidade de publicações relevantes na área.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo tem como objetivo definir os principais conceitos abordados nas seções subsequentes. Desta forma, deseja-se apresentar os fundamentos de perfuração de petróleo e os conceitos de mecânica dos fluidos mais relevantes para o trabalho.

### 2.1 Pressão Estática

Devido às condições encontradas em poços verticais, é estabelecida uma janela operacional da pressão estática exercida pelo fluido de perfuração. A pressão estática exercida pelo fluido deve ser capaz de conter os influxos provenientes da formação rochosa sem romper, no entanto, os poros da rocha (THOMAS et al., 2001). Dentro do presente trabalho, o conceito de pressão hidrostática é especialmente importante para a discussão acerca da força média e perfis de pressão medidos no fundo do aparato experimental.

A atuação de forças de superfície sobre um elemento de fluido estático se dá através de forças de pressão já que nesta condição o fluido não está submetido a tensões de cisalhamento. Desta forma, um elemento de fluido estático está sujeito apenas à ação da gravidade e o diferencial de pressão é expresso somente na direção de atuação da gravidade,  $z$ , como mostrado na Equação (2.1) (FOX et al., 2009).

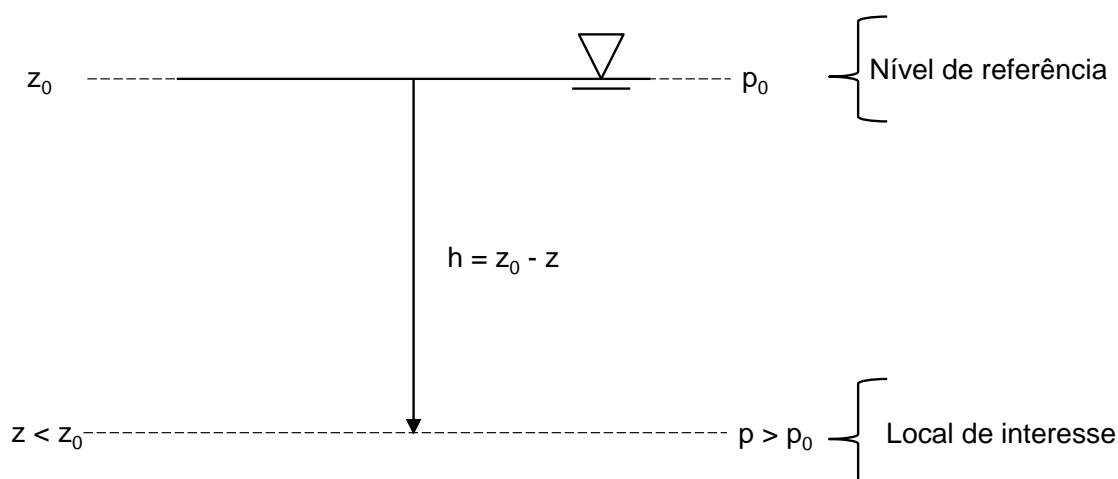
$$\frac{dp}{dz} = -\rho g \quad (2.1)$$

Na Equação (2.1)  $\frac{dp}{dz}$  é o diferencial de pressão na direção  $z$ ,  $\rho$  é a massa específica do fluido, em  $\text{kg/m}^3$ , e  $g$  é a aceleração da gravidade em  $\text{m/s}^2$ .

Ao definir os limites de integração, de acordo com a Figura 2, e integrar a Equação (2.1) obtém-se a Equação (2.2).

$$\Delta p = p - p_0 = \rho g (z_0 - z) = \rho gh \quad (2.2)$$

Sendo  $\Delta p$  a variação de pressão dada em Pa, ocasionada pela coluna de fluido com altura  $h$  dada em m, de acordo com a Figura 2. Destaca-se que a Equação (2.2) só é válida para  $\rho$  constante.



**Figura 2 – Ilustração dos limites e referenciais para a determinação da pressão estática em uma coluna de fluido.**

**FONTE: Adaptado de FOX et al. (2009).**

Como ilustrado a partir da Figura 2, a diferença de pressão  $\Delta p$  [Pa] pode ser determinada a partir da diferença de elevação  $h$  [m] entre os dois pontos. A partir da Equação (2.2) nota-se que a pressão estática é diretamente proporcional à massa específica do fluido e à altura da coluna de fluido. Uma prática comum para modificar a pressão hidrostática no fundo do poço em operações de perfuração é através da adição de compostos densos, como a barita, ao fluido de perfuração (THOMAS et al., 2001).

## 2.2 Classificação Reológica dos Fluidos

Os parâmetros reológicos influenciam diretamente a capacidade de remoção de partículas sólidas de dentro do poço de perfuração. O estudo do comportamento reológico de materiais baseia-se na avaliação da resposta que apresentam quando submetidos a deformações. Quantifica-se, geralmente, a resposta destes compostos baseado na tensão necessária para que a deformação seja notada (MORRISON,

2001). A classificação mais básica dos fluidos, de acordo com suas características reológicas, os divide entre fluidos newtonianos e fluidos não-newtonianos.

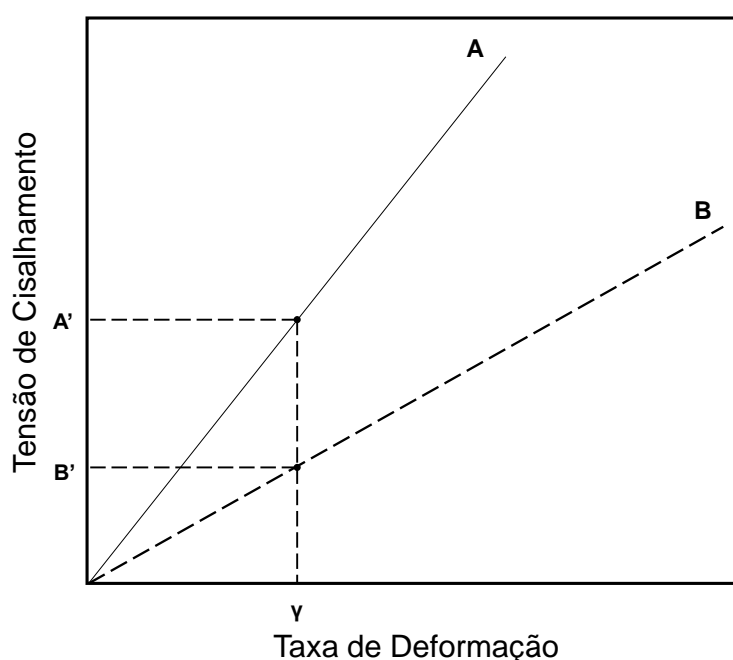
### 2.2.1 Fluidos Newtonianos

O comportamento de fluidos newtonianos pode ser descrito pela Equação (2.3), que representa a lei da viscosidade de Newton na forma unidimensional (FOX et al., 2009).

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (2.3)$$

Sendo  $\tau$  a tensão de cisalhamento dada em Pa,  $\mu$  a viscosidade dinâmica do fluido dada em Pa.s e  $\dot{\gamma}$  a taxa de deformação dada em  $s^{-1}$ .

A partir da Equação (2.3), é possível notar que a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação do fluido são relacionadas pela viscosidade dinâmica. Desta forma, quanto mais viscoso for o fluido, mais difícil será de deformá-lo ao aplicar uma mesma tensão de cisalhamento.



**Figura 3 – Curvas de tensão em função da taxa de deformação de dois fluidos newtonianos com diferentes viscosidades.**

A Figura 3 apresenta a curva de escoamento de dois materiais newtonianos com diferentes viscosidades. O mais viscoso é representado pela reta A e o menos

viscoso pela reta  $B$ . Nota-se que em ambos os casos a relação entre a tensão e a taxa de deformação é linear, caracterizada pelo comportamento newtoniano dos materiais. Ainda, salienta-se que no material mais viscoso, para atingir uma mesma taxa de deformação  $\dot{\gamma}$ , é necessária uma tensão maior ( $A'$ ) do que a tensão necessária ( $B$ ) para que o material menos viscoso atinja a mesma taxa de deformação.

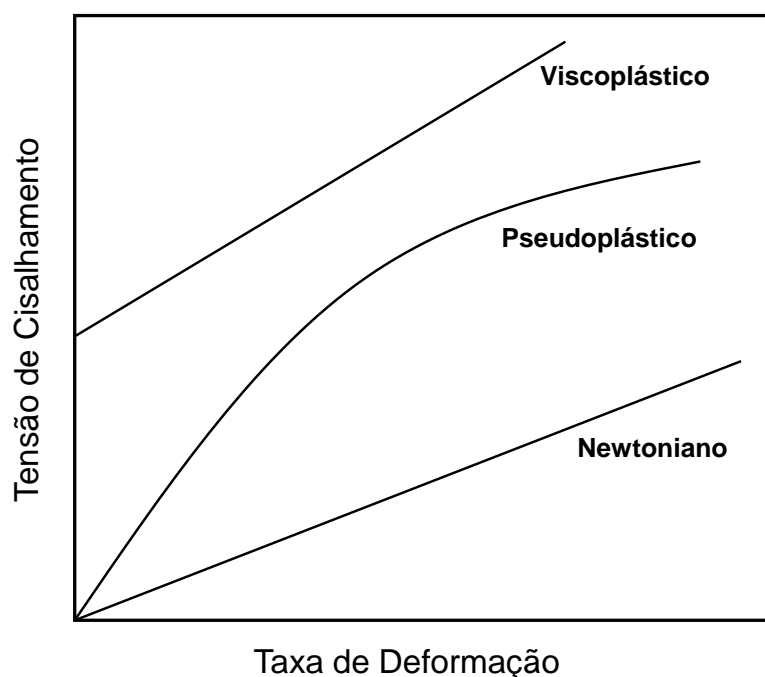
### 2.2.2 Fluidos Não-Newtonianos

Materiais não-newtonianos apresentam comportamento que não pode ser descrito somente pela lei da viscosidade de Newton (MORRISON, 2001). Quando se descreve o comportamento dos fluidos não newtonianos, é comum que se denomine a razão entre tensão de cisalhamento e a taxa de deformação de viscosidade aparente  $\eta$ , conforme a Equação (2.4).

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (2.4)$$

Quando a viscosidade aparente dos materiais é descrita em função apenas da taxa de deformação imposta, utiliza-se a nomenclatura *fluidos newtonianos generalizados* (DESHPANDE et al., 2010). A relação entre tensão e taxa de deformação nestes materiais é não-linear, podendo ou não apresentar tensão limite de escoamento. A tensão limite de escoamento pode ser definida como a tensão mínima necessária para que o fluido comece a escoar (BALMFORTH et al., 2014) de acordo com o mostrado na Figura 4.





**Figura 4 - Curvas de tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para fluidos pseudoplásticos, viscoplásticos e newtonianos**

Os materiais que apresentam tensão limite de escoamento são usualmente conhecidos como *materiais viscoplásticos*. A relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação de materiais viscoplásticos pode se adequar a diversas equações de ajuste. Dentre essas equações, têm destaque as equações de Herschel-Bulkley e de Bingham (MACOSKO, 1996; BIRD et al., 2006). A Figura 4 apresenta o comportamento qualitativo das curvas de tensão em função da taxa de deformação de materiais viscoplásticos. É importante lembrar que os materiais que apresentam tensão limite de escoamento se deformam elasticamente até que se ultrapasse um valor crítico de tensão, a partir do qual deformações irreversíveis passam a ser observadas (BALMFORTH et al., 2014; BONN et al., 2015).

Materiais que apresentam características viscosas e elásticas simultaneamente são usualmente denominados de materiais viscoelásticos (MACOSKO, 1996). Finalmente, a viscosidade aparente de fluidos não newtonianos pode ser função não apenas da taxa de deformação, mas também do tempo de aplicação do cisalhamento. Esses materiais são tradicionalmente denominados *materiais dependentes do tempo*. Um caso específico de materiais dependentes do tempo são

os materiais tixotrópicos, que são aqueles que apresentam um decréscimo reversível da viscosidade quando submetidos ao cisalhamento (Mewis e Wagner, 2012). Fluidos de perfuração são materiais com comportamento reológico complexo, apresentando características viscoelásticas, viscoplásticas e tixotrópicas simultaneamente. Por esse motivo, esses materiais podem ser classificados como materiais elastoviscopoplásticos e dependentes do tempo (FERNANDES et al., 2016).

### 2.3 Turbulência

Escoamentos de fluidos podem ser classificados entre escoamentos laminares ou turbulentos, de acordo com a relação entre a intensidade das forças inerciais e viscosas. Escoamentos laminares ocorrem em camadas bem definidas, em que o movimento das partículas fluidas ocorre em lâminas e os campos de velocidade do escoamento são constantes com o tempo (FOX et al., 2009). Escoamentos turbulentos, por outro lado, apresentam movimentos caóticos e imprevisíveis, o que leva a alterações irregulares de seus campos de velocidade tanto no tempo, quanto no espaço (POPE, 2000). De acordo com Davidson (2015), a ocorrência de fenômenos caóticos está relacionada à forte influência de elementos não lineares de suas equações governantes. Enquanto os termos não lineares se apresentam pouco relevantes, as soluções são bem comportadas. À medida que os termos não lineares se tornam mais relevantes, as soluções se tornam, também, mais complexas até que as soluções se tornem tão complexas que possam ser consideradas imprevisíveis (DAVIDSON, 2015). Além disso, a turbulência é associada à prevalência dos efeitos inerciais do escoamento sobre os efeitos viscosos.

Assim, utiliza-se o número adimensional de Reynolds, mostrado na Equação (2.5) para determinar o regime de escoamento. Assume-se, geralmente, o valor de 2300 para definir o estágio de transição entre escoamento laminar e turbulento (FOX, 2014) em tubos circulares.

$$\text{Re} = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2.5)$$

Sendo  $v$  a velocidade média do fluido na seção [m/s],  $\rho$  a massa específica do fluido [kg/m<sup>3</sup>],  $D$  o diâmetro do tubo na seção [m] e  $\mu$  [Pa.s].

O número de Reynolds representa a razão de magnitudes dos efeitos inerciais e viscosos atuando sobre o fluido (FOX et al., 2009). Desta maneira, quanto menor for o valor do número de Reynolds, maiores são os efeitos viscosos, e quanto maior for o valor do número de Reynolds, maiores serão os efeitos inerciais. É comum relacionar o aumento do número de Reynolds com o aumento da turbulência e instabilidade do escoamento, já que a turbulência é atingida mais facilmente em fluidos com viscosidade mais baixa (DAVIDSON, 2015). No caso estudado, o fluido e os diâmetros das tubulações utilizados são os mesmos nos diferentes testes. Desta forma, variações no número de Reynolds são ocasionadas somente devido a variações na velocidade do fluido. Assim, ao longo do presente trabalho as variações no número de Reynolds caracterizam alterações na vazão de bombeamento do fluido.

#### **2.4 Escoamento Bifásico Líquido-Sólido**

O escoamento bifásico líquido-sólido, também conhecido como transporte hidráulico, pode ser encontrado em uma série de diferentes setores da indústria, como o de mineração ou geração de energia. Escoamentos com suspensões sólidas, como é o caso estudado, estão sujeitos à possibilidade de bloqueio da tubulação, logo a garantia do escoamento é essencial para a continuidade e viabilidade das operações (CHHABRA; RICHARDSON, 1999).

Escoamentos bifásicos líquido-sólido são constituídos por uma fase contínua responsável pela suspensão de uma fase dispersa sólida. As propriedades de cada uma das fases, assim como as interações entre elas influenciam o comportamento do escoamento como um todo (PEKER; HELVACI, 2011).

Classifica-se, ainda, estes escoamentos como diluídos ou densos, de acordo com a distribuição da fase dispersa na fase contínua (BARBOSA, 2015). Os dispersos são aqueles cuja distância entre as partículas sólidas é suficiente para que os efeitos das interações entre elas possam ser desprezados. No escoamento denso, por outro lado, há uma redução da distância entre as partículas devido à maior densidade de elementos dispersos, o que faz com que as colisões entre as partículas tenham efeitos relevantes para a modelagem do escoamento (PEKER; HELVACI, 2011)

### 2.4.1 Força de Arrasto

A força de arrasto pode ser definida como a resistência de uma das partículas sólidas ao movimento do fluido em que está inserida. Sua magnitude é função da velocidade relativa de deslocamento da partícula em relação ao fluido, da viscosidade e massa específica da fase líquida e da área transversal do corpo submerso. Para uma partícula esférica, a força de arrasto pode ser calculada a partir da Equação (2.6) (PEKER; HELVACI, 2011).

$$F_A = \frac{C_A \pi D_p^2 \rho_f V^2}{8} \quad (2.6)$$

Na Equação (2.6)  $C_A$  é o coeficiente de arrasto [-],  $D_p$  é o diâmetro da partícula [m],  $\rho_f$  é a massa específica do fluido [kg/m<sup>3</sup>] e  $V$  é a velocidade relativa entre a partícula e o fluido [m/s].

Para um escoamento em regime laminar, tem-se o cálculo do coeficiente de arrasto desenvolvido a partir da Equação (2.7) (PEKER; HELVACI, 2011).

$$C_A = \frac{24}{\text{Re}_p} \quad (2.7)$$

$$\text{Re}_p = \frac{\rho_c V_t D_p}{\mu_f} \quad (2.8)$$

Em que  $\mu_f$  é a viscosidade do fluido [Pa.s] e  $V_t$  a velocidade terminal da partícula, dada em m/s.

Substituindo a Equação (2.6) na (2.7), obtém-se a Equação (2.9).

$$F_A = 3\pi \frac{\mu D_p V^2}{V_t} \quad (2.9)$$

A Equação (2.9) representa a força de arrasto em função das características do escoamento. Nota-se que a velocidade relativa da partícula em relação ao fluido, no numerador, é elevada à segunda potência. Dessa forma, a velocidade da partícula é um fator relevante para a determinação da força de arrasto em escoamentos bifásicos líquido-sólido.

### 2.4.2 Número de Stokes

O número adimensional de Stokes caracteriza a relação entre o tempo de resposta de uma partícula suspensa e o tempo característico do fluido em que se encontra. A Equação (2.10) define o número de Stokes, em que  $\lambda_p$  é o tempo de relaxação da partícula sólida e  $\lambda_f$  o tempo característico do fluido (PEKER; HELVACI, 2011).

$$S_t = \frac{\lambda_p}{\lambda_f} \quad (2.10)$$

O tempo de relaxação é descrito por Barbosa (2015), para uma partícula esférica, pela Equação (2.11).

$$\lambda_p = \frac{\rho_p D_p^2}{18\mu_f} \quad (2.11)$$

Na Equação (2.11)  $\rho_p$  é a massa específica da partícula [kg/m<sup>3</sup>].

O tempo característico do fluido ( $\lambda_f$ ) é função de sua velocidade ( $v_f$ ) e do comprimento característico do escoamento ( $L_f$ ), podendo ser calculado a partir da Equação (2.12).

$$\lambda_f = \frac{L_f}{v_f} \quad (2.12)$$

Ao reduzir o número de Stokes, tendendo-o a zero, o tempo de resposta da partícula a mudanças de ação do fluido se reduz, o que possibilita a aproximação de sua velocidade à do fluido. Tal condição é favorável para trabalhos envolvendo a visualização de escoamentos particulados (BARBOSA, 2015). Para números de Stokes mais elevados, a resposta da partícula ao movimento do fluido se dá de forma mais lenta já que esta apresenta inércia suficiente para resistir ao movimento do fluido (PEKER; HELVACI, 2011).

## 2.5 Força de Impacto de Jatos

Na circulação convencional o fluido de perfuração deixa a coluna através dos bocais ejetores presentes na broca, colidindo com a formação rochosa (BOURGOYNE et al., 1991). A incidência do jato do fluido de perfuração sobre as rochas resulta em uma força de impacto aplicada sobre o substrato marinho, o que facilita o processo de erosão das rochas e aumenta a taxa de penetração da broca (SANTOS, 2014).

Para o escoamento de um jato vertical colidindo ortogonalmente com um anteparo é possível determinar analiticamente a força de impacto do fluido a partir da formulação integral do princípio da conservação da quantidade de movimento aplicada a um volume de controle inercial (FOX et al., 2009). A formulação em questão é mostrada na Equação (2.13), sob a hipótese de escoamento uniforme na entrada e saída do volume de controle.

$$\vec{F} = \vec{F}_s + \vec{F}_B = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho \vec{V} dV + \sum_{SC} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (2.13)$$

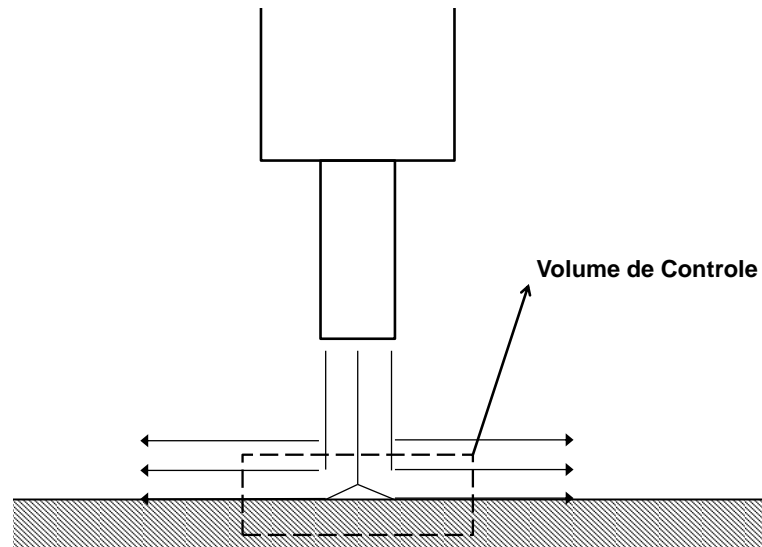
Considerando a atuação do jato somente na vertical e o escoamento permanente tem-se a Equação (2.14).

$$F_y = \sum_{SC} v \rho V \cdot A \quad (2.14)$$

Considerando o volume de controle na interface entre o fluido e a superfície do anteparo, como mostrado na Figura 5, a expressão pode ser reduzida à Equação (2.15).

$$F_{\text{impacto}} = v_f \rho Q \quad (2.15)$$

Sendo  $v_f$  a velocidade de saída do fluido da contração [m/s] e  $Q$  a vazão volumétrica [m<sup>3</sup>/s].



**Figura 5 - Ilustração do volume de controle utilizado para a dedução da Equação (2.15).**

Se manipularmos algebricamente a Equação (2.15), é possível obtê-la apenas em função de parâmetros operacionais da bancada, como mostrado na Equação (2.16).

$$F_{\text{impacto}} = \frac{4}{\pi} \frac{\rho Q^2}{d^2} \quad (2.16)$$

Sendo  $d$  o diâmetro [m] referente à seção em que o fluido colide com o anteparo. Para a circulação direta, o anteparo é atingido pelo fluido proveniente do jato, enquanto para a circulação reversa a colisão é causada pelo fluido vindo do anular. É importante salientar que esta correlação representa uma estimativa da força de impacto, já que não leva em conta fatores importantes como as perdas de carga do fluido ou a parcela da força gerada pela pressão hidrostática.

Para que seja considerada a parcela de força ocasionada pela coluna d'água existente na bancada, adiciona-se uma parcela de força referente à pressão hidrostática atuante no fundo do poço. Desta forma, a força total atuante no fundo do poço pode ser descrita pela Equação (2.17).

$$F_{\text{total}} = F_{\text{impacto}} + F_{\text{Peso}} = \frac{4\rho Q^2}{\pi d^2} + \rho gh(\pi R^2) \quad (2.17)$$

Na Equação (2.17)  $h$  é a altura da coluna de líquido formada, dada em [m] e  $R$  é o raio do poço, dado em [m].

## 2.6 Síntese do Capítulo

No Capítulo 2 foram introduzidos conceitos e definições de mecânica dos fluidos e processos de perfuração de poços de petróleo fundamentais para o desenvolvimento do presente trabalho. Primeiramente foram introduzidos alguns conceitos de perfuração de poços de petróleo. Destacou-se que, entre outras funções, a presença do fluido de perfuração é de extrema relevância para a manutenção da broca e do poço ao remover os detritos residentes no interior do poço. A seguir, o conceito de pressão hidrostática foi apresentado, juntamente com a equação da pressão hidrostática em função da altura da coluna de fluido e sua massa específica. Um escoamento é caracterizado entre laminar ou turbulento a partir do número de Reynolds que é função do diâmetro da tubulação, da massa específica e viscosidade do fluido e da velocidade do fluido. Da mesma forma, o número de Reynolds apresenta uma razão entre efeitos inerciais e efeitos viscosos. Ainda, foram introduzidos conceitos de escoamentos bifásicos líquido-sólido. A partir do equacionamento apresentado, é possível concluir que tanto propriedades do fluido, como da fase sólida são relevantes para a análise deste tipo de escoamento. Por fim, foi definido que o número adimensional que caracteriza a interação fluido – partícula é o número de Stokes. No Capítulo 3 a seguir, serão apresentados trabalhos da literatura que se relacionam com o tema do presente trabalho.



### 3 REVISÃO DA LITERATURA

Em processos de perfuração de poços de petróleo, é comum associar a qualidade da operação com a eficiência de retirada de sólidos do interior do poço (LOCKETT et al., 1993). A presente seção tem por objetivo apresentar trabalhos que tratam da eficiência da limpeza de poços de perfuração, da comparação de operações de perfuração direta e reversa e da força de impacto de jatos, expondo suas principais contribuições para o desenvolvimento desse trabalho.

#### 3.1 Eficiência de limpeza de poços de petróleo

Diversos trabalhos da literatura relatam que o número de variáveis envolvidas na remoção de sólidos em operações de perfuração é muito elevado, o que dificulta a proposição de modelos generalizados que sejam capazes de prever condições reais de perfuração (BELAVADI; CHUKWU, 1994; NAZARI et al., 2010). Por isso, cada parâmetro é avaliado separadamente por vários autores. Esta subseção tem o objetivo de estabelecer os principais parâmetros a serem considerados para avaliar experimentalmente o transporte de sólidos durante a perfuração de poços de petróleo.

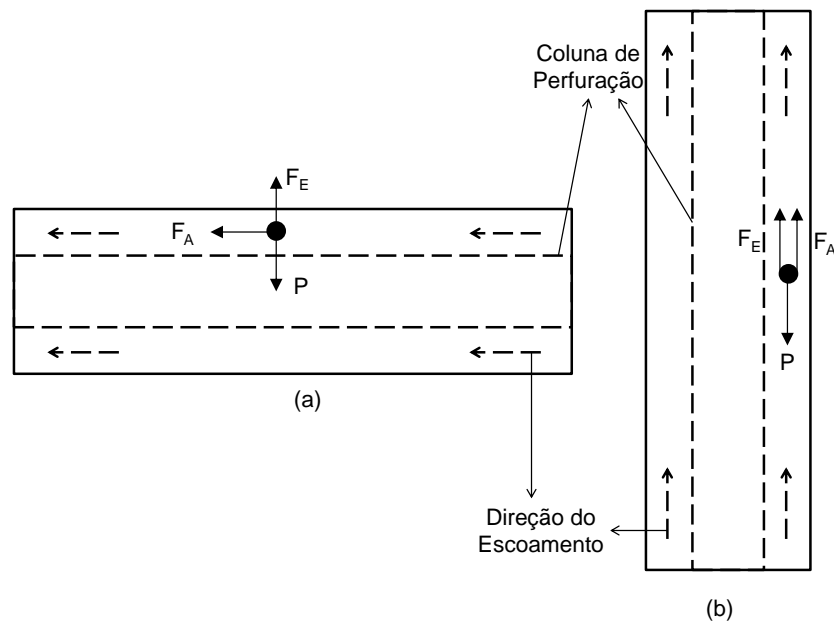
Nazari *et al.* (2010) avaliaram os principais fatores que afetam o transporte de sólidos em operações de perfuração, categorizando-os de acordo com a influência que cada um exerce sobre a capacidade de limpeza do poço, como apresentado na Tabela 1. Destaca-se que as outras variáveis categorizadas no trabalho são estudadas, também, por outros autores.

**Tabela 1 – Relação da influência dos parâmetros abordados por Nazari *et al.* (2010) na eficiência de limpeza de poços**

<b>Parâmetro</b>	<b>Influência dos Parâmetros na Eficiência de Limpeza de Poços</b>
Vazão volumétrica	Alta
Reologia (viscosidade e tensão limite de escoamento)	Moderada
Ângulo do poço	Alta
Massa específica do fluido de perfuração	Baixa
Tipo de fluido de perfuração	Baixa/Moderada
Diâmetro do poço	Baixa
Rotação da coluna	Alta
Excentricidade	Alta
Tamanho dos cascalhos	Baixa

Nota-se na Tabela 1, a presença de mais de um parâmetro categorizado como possuindo alta relevância. Destes, no entanto, apenas a vazão será avaliada, uma vez que é a única variável relevante que se encaixa no escopo do projeto e atende às limitações do aparato experimental. O ângulo do poço, a rotação da coluna e a excentricidade, apesar de serem parâmetros importantes, não serão avaliados devido à complexidade envolvida na adaptação da bancada para considerar essas variações. A vazão contribui significativamente para a retirada do leito de sólidos que se forma no fundo do poço (NAZARI et al., 2010), atuando de forma ainda mais significativa em poços verticais (HUSSAINI; AZAR, 1983).

Hussaini e Azar (1983) discorrem acerca dos efeitos benéficos na elevação da velocidade do fluido no anular, através do aumento na vazão volumétrica. De acordo com os autores, conforme a velocidade do fluido no anular é elevada, há uma redução na velocidade de sedimentação das partículas até que estas sejam suspensas e carregadas. Isto é possível já que há a oposição entre as forças do escoamento e o peso da partícula. Em poços inclinados e horizontais, por outro lado, as propriedades do fluido se tornam mais relevantes, uma vez que a direção e sentido da velocidade do fluido nem sempre se opõe ao peso da partícula. Assim, as propriedades do fluido como sua viscosidade, massa específica e características reológicas têm a função de reduzir a sedimentação das partículas até que estas sejam retiradas (LOCKETT et al., 1993), como mostrado na Figura 6.



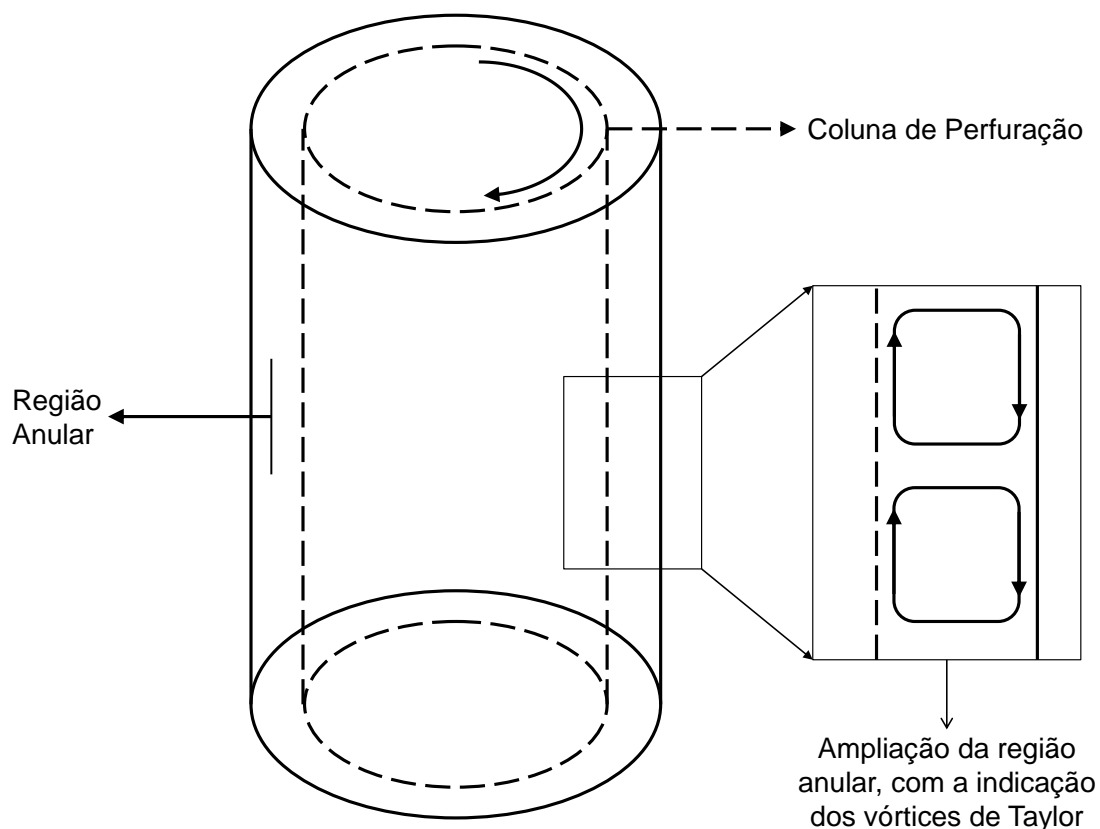
**Figura 6 – Balanço de forças em uma partícula (a) em escoamento horizontal e (b) em escoamento vertical.**

Na Figura 6, tem-se o balanço de forças em uma partícula sujeita a um escoamento na região anular, em que  $P$  representa a força peso,  $F_E$  é a força devido ao empuxo e  $F_A$  é a força de arrasto. Para escoamentos horizontais, como ilustrado na Figura 6 (a), a parcela de força devido ao arrasto do fluido não impede a partícula de sedimentar, uma vez que a sedimentação ocorre devido à gravidade. Assim, a única força oposta ao peso da partícula é o empuxo. Em escoamentos verticais como o mostrado na Figura 6 (b), por outro lado, tanto a força de arrasto, quanto a força de empuxo são opostas ao peso da partícula. Por este motivo, a redução da sedimentação dos elementos sólidos por meio da atuação nas propriedades do fluido é muito mais relevante para escoamentos horizontais.

Há um aprofundamento na discussão proporcionada por Locket *et al.* (1993) acerca dos efeitos do aumento da velocidade do fluido na suspensão de partículas. Os autores defendem que, com o aumento da velocidade do fluido, não somente a energia do escoamento se intensifica, como também a formação de vórtices turbulentos promove forças contrárias ao peso do cascalho. Apesar disso, Locket *et al.* (1993) destacam a presença de limitações tecnológicas no processo de perfuração que devem ser consideradas. Neste sentido, escoamentos turbulentos e

com altas velocidades são favoráveis para a remoção de sólidos. Da mesma forma, a alta viscosidade e massa específica do fluido reduzem a sedimentação das partículas, o que é conveniente para a remoção do leito. No entanto, fluidos altamente viscosos são difíceis de bombear em altas velocidades, o que impossibilita o uso de um fluido que satisfaça ambas as condições: que apresentem ao mesmo tempo elevada viscosidade e permitam escoamentos turbulentos com altas velocidades. Para a seleção do fluido e das condições de circulação, deve-se avaliar individualmente cada poço e o estágio da perfuração (LOCKETT et al., 1993).

Além dos impactos decorrentes do aumento da vazão, Belavadi e Chukwu (1994) discutem os efeitos das propriedades e características do fluido e das partículas na retirada de sólidos do fundo do poço. De acordo com os autores, um aumento na vazão é altamente positivo para a remoção de cascalhos, especialmente para fluidos de perfuração com massa específica elevada. Ainda, Belavadi e Chukwu (1994) discutem que a remoção de sólidos com diâmetro pequeno é favorecida quando a coluna de perfuração é rotacionada. De acordo com os autores, esta condição ocorre devido à presença dos vórtices de Taylor gerados pela rotação da coluna. Os vórtices são capazes de gerar forças que contribuem na suspensão dos elementos sólidos, como ilustrado na Figura 7.



**Figura 7 – Ilustração da formação de vórtices de Taylor em um anular.**

**FONTE: Adaptado de Belavadi e Chukwu (1994).**

A velocidade de sedimentação das partículas como função da viscosidade e massa específica do fluido de perfuração já havia sido discutida por Hopkin (1967). Neste aspecto, os resultados de Hopkin (1967) demonstram as mesmas tendências discutidas por Sifferman *et al.* (1973), Hussaini e Azar (1983), Locket *et al.* (1993) e Belavadi e Chukwu (1994).

Martins *et al.* (1996) avaliam o transporte de sólidos em poços horizontais, considerando a excentricidade entre a coluna e o poço. De acordo com os autores, a tensão limite de escoamento se mostrou um fator relevante no transporte de sólidos, especialmente em poços excêntricos, já que nestas condições há a tendência de formar perfis de velocidade não uniformes. Dependendo da característica reológica do fluido, é possível que se forme uma região de estagnação na porção inferior do anular, facilitando a sedimentação dos detritos.

Dentre os trabalhos avaliados, o primeiro estudo a citar o termo *velocidade de transporte crítica do fluido* (CTFV)<sup>2</sup> foi conduzido por Larsen *et al.* (1997). Os autores definem a CTFV como a velocidade média mínima que o fluido deve atingir na região anular para que os sólidos sejam suspensos e carreados. No trabalho, foi desenvolvido um modelo capaz de prever a CTFV considerando uma faixa de inclinações e excentricidades do poço, bem como as propriedades do fluido e dos sólidos. Assim como Martins *et al.* (1996), os autores constataam que a excentricidade é especialmente prejudicial para poços horizontais, podendo exigir vazões muito mais elevadas para realizar a retirada do leito (WALKER; LI, 2000). Por fim, Larsen *et al.* (1997) sugerem que fluidos de perfuração com baixa viscosidade são mais eficientes para a remoção de sólidos em poços verticais, ou com altas inclinações. Isso ocorre, pois desta forma o fluido é capaz de atingir altas velocidades no fundo do poço, havendo a prevalência de efeitos inerciais sobre os viscosos.

Para que fosse possível quantificar a capacidade de limpeza de um poço experimentalmente, Okon e Agwu (2015) utilizam o indicador de remoção de cascalhos (CCI)<sup>3</sup> para avaliar a retirada de cascalhos em uma bancada que representa um poço horizontal. De forma simplificada, os autores definem o CCI como o percentual de partículas removidas de seu aparato experimental. Para a determinação experimental do indicador, há a inserção de um leito de partículas, com altura constante, ao longo de todo o anular. O escoamento é iniciado e mantido constante a uma baixa vazão por dois minutos. Então, os autores ajustam o escoamento para a vazão de teste, condição em que é mantido por cinco minutos. O CCI é determinado com base na quantidade de partículas retiradas ao longo dos cinco minutos de teste, já que a quantidade de partículas inseridas é conhecida. É importante ressaltar que o CCI é uma grandeza avaliada após um período pré-determinado, e por isso representa o comportamento global da retirada de partículas na escala de tempo avaliada por Okon e Agwu (2015). Além disso, os autores utilizam uma formulação para o CCI, mostrada na Equação (3.1),

---

<sup>2</sup> CTFV – Do inglês *Critical Transport Fluid Velocity*

<sup>3</sup> CCI – Do inglês *Cuttings Carrying Index*

$$CCI = \frac{qk\rho_f}{694,44\pi D^2} \quad (3.1)$$

em que o CCI é dependente da vazão (q), da massa específica do fluido de perfuração ( $\rho_f$ ), do diâmetro interno do poço (D) e do índice de consistência do fluido (k), que é uma função das propriedades reológicas do fluido avaliadas em um viscosímetro Fann 35A: a viscosidade plástica e o ponto de escoamento (*yield point*), definidos com base no Instituto Americano de Petróleo (2005). Interpreta-se que, quanto maior for o valor do CCI calculado, melhor é a retirada de sólidos pelo anular. Ao analisar a Equação (3.1) é possível, ainda, notar que a vazão volumétrica é diretamente proporcional à capacidade de limpeza, sendo coerente com os resultados experimentais obtidos por Okon e Agwu (2015) e com os estudos de Hussaini e Azar (1983), Locket et al. (1993), Belavadi e Chulwu (1994) e Nazari et al. (2010).

Para facilitar a organização deste estudo, os trabalhos discutidos são sintetizados na Tabela 2, em ordem cronológica, citando os autores, a natureza do estudo e suas principais contribuições para o assunto discutido. Observa-se, a partir da análise da Tabela 2, que os diversos autores avaliaram a influência de vários parâmetros na eficiência de limpeza de poços de petróleo.

Além disso, as conclusões obtidas por esses autores sobre os parâmetros que mais influenciam a retirada de cascalhos estão em concordância com a classificação apresentada por Nazari et al. (2010). Por exemplo, Nazari et al. (2010) relataram que a vazão volumétrica é um parâmetro importante para a retirada de cascalhos dos poços, bem como Walker e Li (2000) e Sifferman et al. (1973). Ainda, Nazari et al. (2010) relataram que as propriedades reológicas dos fluidos de perfuração são relevantes na eficiência de limpeza, de forma semelhante a Hussaini e Azar (1983) e Hopkin (1967). A rotação da coluna (Locket et al, 1993), a excentricidade do poço (Martins et al., 1996; Walker e Li, 2000) e a massa específica do cascalho (Belavadi e Chukwu, 1994) também foram relatados como sendo parâmetros importantes para a retirada de cascalhos, de forma semelhante ao relatado por Nazari et al. (2010). Dessa forma, pode-se concluir que a avaliação da influência da vazão na retirada de cascalhos do poço é um estudo relevante de acordo com a revisão da literatura

apresentada, e por isso esse parâmetro foi selecionado para ser avaliado no presente estudo.



Tabela 2 – Principais estudos avaliando o transporte de sólidos em poços de petróleo.

Autores	Natureza do Estudo	Principais Contribuições
Hopkin (1967)	Experimental	O autor propõe a influência de propriedades da fase dispersa e do fluido na capacidade de limpeza do poço. As propriedades do fluido avaliadas foram a massa específica e tensão limite de escoamento. Quanto às partículas, avalia a influência do tamanho dos cascalhos no transporte de sólidos.
Sifferman <i>et al.</i> (1973)	Experimental	Os autores avaliam a influência de propriedades reológicas do fluido, velocidade no anular, rotação da coluna de perfuração, tamanho dos cascalhos e tamanho do anular na remoção de sólidos de um poço vertical. Concluem, ao final, que os parâmetros mais relevantes na remoção de sólidos são a velocidade no anular e as propriedades reológicas do fluido.
Hussaini e Azar (1983)	Experimental	Hussaini e Azar (1983) observaram a importância de parâmetros reológicos da fase contínua na eficiência de limpeza do poço. Os autores concluíram que a tensão limite de escoamento e viscosidade aparente exercem maior influência sobre escoamentos com menores velocidades no anular, reduzindo a velocidade de sedimentação das partículas.
Lockett <i>et al.</i> (1993)	Numérico e Experimental	O estudo conduzido procurou avaliar não somente propriedades do fluido e das partículas, mas considerar efeitos do escoamento que favoreçam o transporte das partículas. Os autores concluíram que efeitos rotativos favorecem o transporte de sólidos em poços horizontais, sugerindo que isto ocorra devido à presença de vórtices de Taylor capazes de suspender as partículas.
Belavadi e Chukwu (1994)	Experimental	Os autores constataram a influência da diferença entre a massa específica do particulado e do fluido na eficiência de limpeza. Foi constatado que menores razões de massa específica resultam em maiores taxas de transporte, uma vez que partículas mais densas tendem a sedimentar mais rápido do que partículas com a massa específica próxima à do fluido.
Martins <i>et al.</i> (1996)	Numérico	Os autores desenvolveram um simulador numérico para prever a velocidade crítica do fluido de perfuração para realizar a limpeza do poço, baseado na espessura do leito de detritos formado. Ainda, notaram a relevância da excentricidade da coluna de perfuração na limpeza do poço, uma vez que a reologia do fluido passa a ser relevante nestas condições. Os autores concluem que poços excêntricos tendem a formar perfis de velocidade não uniformes, condição que pode dificultar a limpeza do poço caso fluidos com características reológicas inadequadas sejam selecionados.
Larsen <i>et al.</i> (1997)	Numérico	Larsen <i>et al.</i> (1997) geraram um modelo capaz de determinar a velocidade crítica do escoamento, considerando os efeitos da inclinação da coluna de perfuração e sua excentricidade. Os autores concluem que para fluidos mais viscosos, maiores vazões são necessárias para que a CTFV seja atingida. Ainda, concluem que fluidos menos viscosos são mais eficientes em poços verticais.
Walker & Li (2000)	Experimental	Os autores avaliaram o diâmetro das partículas, reologia do fluido de perfuração e excentricidade do poço. Walker & Li (2000) estudaram um poço totalmente excêntrico nas duas extremidades da tubulação, concluindo que a excentricidade diminui a capacidade de limpeza em poços pouco inclinados ou horizontais. Nestas condições vazões consideravelmente mais altas são necessárias para manter a limpeza do poço.
Nazari <i>et al.</i> (2010)	Revisão e Sensibilidade	Os autores realizaram uma revisão da literatura considerando os principais fatores afetando o transporte de sólidos em poços. Com base na revisão, Nazari <i>et al.</i> (2010) desenvolveram um estudo de sensibilidade para que fosse possível avaliar os parâmetros mais relevantes na remoção de cascalhos dos poços.
Okon & Agwu (2015)	Experimental	Okon e Agwu (2015) desenvolveram um estudo experimental avaliando a capacidade de remoção de sólidos, em um anular inclinado, de diferentes fluidos de perfuração. Os autores quantificaram a eficiência de limpeza através do indicador denominado CCI.

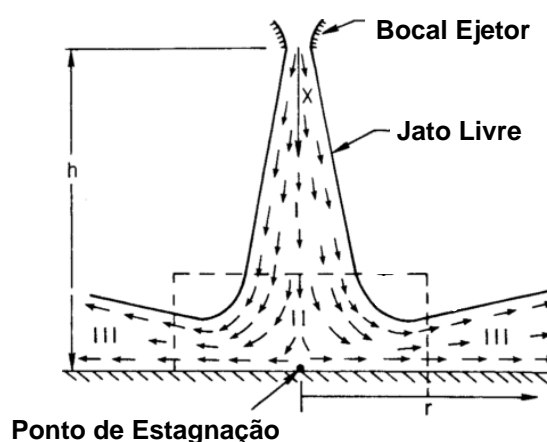
### 3.2 Jatos em processos de perfuração

Escoamentos nos quais existe a colisão de jatos com superfícies planas são recorrentes em diversos ramos industriais. Uma das características importantes desse tipo de escoamento é a força de impacto do jato com a superfície sólida. Desta forma, alguns estudos envolvendo a avaliação de jatos líquidos incidindo em vários tipos de anteparos, assim como jatos aplicados a operações de perfuração são listados e resumidos na Tabela 3.

**Tabela 3 – Principais estudos avaliando a incidência de jatos líquidos em anteparos.**

<b>Autores</b>	<b>Natureza do Estudo</b>	<b>Principais Contribuições</b>
Van Lingen (1962)	Experimental	Propõe que a extensão dos bocais ejetores, em direção à formação rochosa, aumenta a taxa de penetração durante a operação. Isto ocorre uma vez que a proximidade do jato ao fundo garante maior velocidade do fluido na seção mais baixa do poço, o que possibilita melhor acesso do fluido aos detritos gerados pela perfuração.
Mcisan (1964)	Analítico e Experimental	O autor afirma que no fundo de poços de petróleo no processo de perfuração há a presença de um escoamento cruzado gerado pela incidência do fluido de perfuração na formação rochosa. Esta condição é caracterizada por escoamento perpendicular ao jato do fluido de perfuração. Ainda, afirma que esse escoamento perpendicular ao jato facilita a limpeza do poço já que é capaz de retirar os detritos aprisionados no fundo do poço.
Sutko & Myers (1971)	Experimental	Avaliam a influência do número de bocais na capacidade de limpeza do poço, concluindo que a limpeza é mais eficiente quando um menor número de bocais é utilizado. Por fim, o autor detecta maiores pressões do fluido sobre a formação conforme os bocais são aproximados da formação.
Warren & Winters (1984)	Experimental	Utilizando broca tricônica avaliaram a influência da quantidade de bocais ejetores e seu diâmetro na pressão exercida sobre a formação rochosa. Constataram que maiores energias hidrodinâmicas atingem o fundo do poço utilizando-se menos bocais ejetores, com menores diâmetros.
Wells & Pessier (1993)	Experimental	Os autores propuseram a disposição assimétrica de bocais ejetores em brocas tricônicas. Tal disposição possibilita a intensificação do escoamento cruzado e, também, aumenta a pressão ocasionada pela incidência do fluido no fundo do poço. De forma semelhante a Mcisan (1964), associam o aumento da eficiência de limpeza ao escoamento cruzado paralelo à superfície do poço.
Zhang <i>et al.</i> (2016)	Experimental	Os autores utilizam a técnica de visualização <i>PIV</i> para avaliação do efeito do número de Reynolds e da relação entre a distância do jato e seu diâmetro sobre as características do escoamento. Constataram que aumento no número de Reynolds afeta de forma muito relevante as características do escoamento. As altas velocidades do fluido promovem a turbulência, a deformação do fluido e conseqüente o processo de mistura do líquido.

Baseado nos trabalhos relatados, é importante lembrar que os estudos podem ser realizados avaliando jatos livres ou submersos. Jatos livres são aqueles nos quais o fluido não é confinado após atingir o anteparo, enquanto jatos submersos são aqueles nos quais o jato é envolto pelo fluido. Embora jatos em operações de perfuração sejam submersos, há questões interessantes em estudos de jatos livres que merecem ser discutidas. Dentre essas características, tem destaque o escoamento cruzado no fundo do poço, como é ilustrado na Figura 8.



**Figura 8 – Escoamento cruzado abaixo da região da broca.**  
**FONTE: Adaptado de Warren & Winters (1984).**

Como mostrado na Figura 8, nota-se que há a presença de um escoamento aproximadamente perpendicular ao emitido pelo jato que sai do bocal ejetor, denominado escoamento cruzado (MCISAN, 1964; WARREN; WINTERS, 1984; WELLS; PESSIER, 1993). Tal fenômeno facilita a limpeza do poço pela presença de correntes de fluido próximas ao fundo (MCISAN, 1964; WARREN; WINTERS, 1984; WELLS; PESSIER, 1993). Esta região também é conhecida como zona de escoamento radial (BHAGAT; WILSON, 2016). Isto ocorre pois o escoamento radial na região é capaz de gerar forças de cisalhamento sobre os detritos depositados no fundo e retirá-los do local (MCISAN, 1964). Dessa forma, esse escoamento cruzado é bastante desejável em operações de perfuração, uma vez que facilita a retirada de cascalho do fundo do poço.

Associa-se a taxa de penetração nas rochas durante a operação de perfuração a características dos jatos. Bocais ejetores mais próximos à formação são capazes de melhorar a taxa de penetração gerando maior força de impacto na formação rochosa (LINGEN, 1962; SUTKO; MYERS, 1971). Discute-se, ainda, a influência do diâmetro dos bocais no impacto do fluido e, conseqüentemente, na taxa de penetração da broca na formação rochosa. Menores diâmetros dos bocais são capazes de melhorar a taxa de penetração, uma vez que são garantidas maiores velocidades do fluido na região abaixo da broca (WARREN; WINTERS, 1984; WELLS; PESSIER, 1993). Bocais ejetores com menor diâmetro garantem, ainda, maiores pressões de impacto do fluido com a formação rochosa localizadas nas regiões dos jatos (WARREN; WINTERS, 1984). A magnitude da pressão, no entanto, é notada em pequenas áreas localizadas nos pontos de impacto de cada um dos jatos (BACELAR JUNIOR, 2016). Os pontos centrais dos jatos tendem a apresentar pressões mais elevadas e conforme se afasta, radialmente, do centro os valores de pressão tendem a se reduzir (SANTOS, 2014).

Por fim, discute-se a influência do número de bocais ejetores na energia hidrodinâmica que atinge a formação rochosa. Warren e Winters (1984) concluem que, com uma menor quantidade de bocais ejetores, a energia com que o fluido atinge o fundo do poço é maior. Além disso, o mecanismo de remoção da rocha através do jato de fluido pode variar de acordo com as características do escoamento formado pelos jatos, e dois efeitos concorrentes acontecem no escoamento do fluido nos jatos. Por um lado, escoamentos cruzados geram tensões de cisalhamento, que facilitam a remoção partículas sólidas de leitos estagnados (Mcisan, 1964). Por outro lado, estes padrões de escoamento, ocasionados pela presença de jatos geram um grande número de recirculações quando confinados em poços de perfuração (Bacelar Junior, 2016). Estas recirculações dissipam a energia do escoamento e diminuem a circulação do fluido no restante do poço, o que pode prejudicar o transporte de sólidos. Assim, de acordo com Warren e Winters (1984), um menor número de bocais ejetores minimiza os escoamentos cruzados, o que diminui a eficiência de retirada de cascalho por cisalhamento da formação rochosa. Entretanto, esse menor número de bocais também reduz a turbulência e a perda de

energia na região da broca (WARREN; WINTERS, 1984), o que acaba se tornando benéfico para a eficiência de limpeza do poço.

Ao longo da Seção 3.2, é possível notar que diversos autores estudam a presença de jatos em operações de perfuração de poços de petróleo. Mcisan (1964) conclui que a presença de escoamentos cruzados, ou zona de escoamento radial, facilita a remoção de detritos do fundo do poço de petróleo já que gera correntes de fluido e tensões de cisalhamento capazes de carrear os sólidos. Tal fenômeno também é discutido por Warrens e Winters (1984) e Wells e Pessier (1993). Além disso, Warrens e Winters (1984), Santos (2014) e Bacelar Junior (2016) notam picos de pressão localizadas nas regiões de impacto do jato. Por fim, Van Lingen (1962) e Sutko e Myers (1971) sugerem que a aproximação dos bocais ejetores do fundo do poço elevam o impacto do fluido com a formação rochosa, facilitando a remoção dos cascalhos. Com base nos trabalhos avaliados durante a revisão da literatura, tem-se o impacto do fluido com a formação rochosa como um parâmetro relevante a ser estudado, já que está diretamente associado à taxa de penetração e eficiência de retirada de partículas sólidas, justificando a seleção do parâmetro para comparação entre a circulação direta e reversa.

### **3.3 Comparação Entre Circulação Direta e Circulação Reversa**

Com o objetivo de melhorar a vida útil e taxa de penetração da broca, foi desenvolvida a técnica de circulação reversa. A circulação reversa, definida no Capítulo 1, consiste na injeção do fluido através da região anular em direção à formação rochosa (LICHANG et al., 2006; DAROZ, 2015) para que retorne por dentro da coluna de perfuração.

A presente seção visa expor as principais diferenças entre as duas técnicas de bombeio de fluido de perfuração, abordando os fenômenos envolvidos e suas contribuições para o processo de perfuração. Desta forma, os principais trabalhos estudados são expostos na Tabela 4. Destaca-se, no entanto, que o uso de tal técnica é relativamente recente (GRANT, 2014; DAROZ, 2015), o que limita o número de publicações na área.

**Tabela 4 - Principais estudos de operações de perfuração utilizando a circulação reversa.**

<b>Autores</b>	<b>Natureza do Estudo</b>	<b>Principais Contribuições</b>
Kumar <i>et al.</i> (2005)	Aplicação em Campo	Conduziu-se o estudo utilizando a circulação reversa com <i>tubos corrugados</i> em poço horizontal. A circulação reversa se mostrou eficiente para a retirada de detritos sólidos do interior do poço. A circulação convencional não foi capaz de limpar o poço estudado.
Lichang <i>et al.</i> (2006)	Aplicação em Campo	Os autores afirmam que a limpeza do poço estudado através da circulação reversa ocorre de maneira mais eficaz do que a convencional. Ainda, sugere-se que a técnica favorece a interpretação geológica da formação rochosa, apresentando menores quedas de pressão ao longo da tubulação e maiores diâmetros do cascalho.
Sansoni Junior (2013)	Numérico	Associa-se a eficiência de limpeza da circulação reversa à velocidade do fluido no interior da coluna de perfuração. Por fim, o autor destaca que turbulência em excesso na região da broca pode aprisionar as partículas sólidas na região da broca.
Daroz (2015)	Numérico	O autor concluiu que para a geometria de brocas tricônicas a circulação direta é mais eficiente na limpeza do poço, uma vez que há dificuldade das partículas adentrarem a coluna de perfuração devido ao diâmetro reduzido dos bocais ejetores.
Bacelar Junior, (2016)	Numérico	Para a geometria de uma broca do tipo PDC, destacou-se que a circulação reversa se mostra superior à convencional na força de impacto média gerada pela colisão do fluido com o fundo do poço. Na região da broca, destacou que a circulação direta apresenta muitas recirculações, enquanto a circulação reversa apresenta perfis de velocidade mais uniformes.

Maiores velocidades proporcionam forças do escoamento mais elevadas para contrabalancear o peso das partículas sólidas, reduzindo a sedimentação, conforme descrito por Hussaini e Azar (1983). Uma vez que a velocidade média do fluido no interior da coluna de perfuração tende a ser maior do que sua velocidade na região anular (SANSONI JÚNIOR, 2013; DAROZ, 2015), a circulação reversa apresenta maior capacidade de carregamento das partículas já suspensas, quando comparada à circulação convencional. Pelo princípio da conservação da massa, é possível deduzir que, para uma mesma vazão, velocidades no interior da coluna de perfuração são mais elevadas do que na região anular, já que usualmente a área da coluna é menor do que a área do espaço anular. Seguindo esta lógica é possível, ainda, concluir que menores vazões volumétricas são exigidas para que a mesma CTFV seja atingida utilizando a técnica de circulação reversa.

Por outro lado, estudos numéricos conduzidos por Daroz (2015) e por Bacelar Junior (2016) sugerem que a circulação reversa apresenta maior dificuldade na suspensão das partículas do leito, uma vez que há baixa quantidade de movimento

na região dificultando a entrada dos detritos nos bocais ejetores. A baixa quantidade de movimento é decorrente da baixa velocidade do fluido no anular, antes de adentrar os bocais ejetores. Este comportamento foi detectado tanto para as brocas tricônicas (DARÓZ, 2015), como para as do tipo PDC (BACELAR JUNIOR, 2016). Daróz (2015), no entanto, sugere uma relação entre esta condição e a distância dos bocais ejetores ao fundo do poço, uma vez que a geometria avaliada foi desenvolvida para operar em circulação direta. Dessa forma, a distância entre os bocais ejetores e o fundo do poço aparenta ser um parâmetro relevante para a eficiência de limpeza de poços em operações de circulação reversa. Por este motivo, optou-se por avaliar a influência da distância do jato ao fundo do poço.

Como visto na Seção 3.2 a presença dos jatos é altamente benéfica para a remoção de leitos de sólidos, uma vez que provoca escoamentos cruzados, cuja tensão de cisalhamento gerada é capaz de remover os sólidos do leito. Esta condição, no entanto, não é presente na circulação reversa dificultando a remoção das partículas do leito e para dentro dos bocais ejetores.

Apesar da baixa quantidade de movimento na circulação reversa ser um fator negativo para a técnica, o escoamento ocorre com menor intensidade de recirculações na região da broca (BACELAR JUNIOR, 2016). Por isso, infere-se a possibilidade de aumento na vida útil da ferramenta, já que há menor retrabalho dos detritos em suas arestas cortantes (DARÓZ, 2015; BACELAR JUNIOR, 2016).

### **3.4 Síntese do Capítulo**

No Capítulo 3, foram apresentados os principais conceitos envolvendo o transporte de sólidos em operações de perfuração e a presença de jatos durante as operações de perfuração. Da mesma forma, a circulação reversa foi apresentada juntamente com suas principais características e diferenças mais marcantes quando comparada à circulação direta.

É estudada a influência de diversos parâmetros na limpeza de poços de petróleo. Sifferman et al. (1973) concluem que os fatores mais relevantes no transporte de sólidos seriam a velocidade e as propriedades reológicas do fluido, conclusão que está de acordo com os trabalhos apresentados por Nazari (2010), Locket (1993), Hussaini e Azar (1983) e Belavadi e Chukwu (1994). Hussaini e Azar

(1983), no entanto, afirmam que para poços verticais, a elevação da vazão do fluido é mais relevante do que as propriedades do fluido, justificando a avaliação da influência do parâmetro no presente trabalho.

Nota-se um consenso entre os trabalhos estudados de que a presença de jatos é benéfica para a remoção dos detritos presentes em leitos estagnados, devido à presença de escoamentos cruzados. No entanto, Warren e Winters (1984) ressaltam que os mesmos jatos geram recirculações na região da broca, o que resulta em uma dissipação da energia do escoamento e pode reduzir a vida útil da ferramenta.

Sansoni Júnior (2013) e Daroz (2015) defendem que a circulação direta tem maior facilidade na remoção das partículas do leito estagnado, devido à maior quantidade de movimento do fluido e à presença da zona de escoamento radial. A circulação reversa, por sua vez, apresenta baixa quantidade de movimento, dificultando o transporte da partícula do leito estagnado até o interior dos bocais ejetores. Entretanto, os autores afirmam que o fluido apresenta baixa velocidade no anular, para a circulação direta, dificultando o transporte das partículas até a superfície, à medida que o fluido possui altas velocidades no interior da coluna para a circulação reversa.

Por fim, é possível notar que o número de trabalhos experimentais caracterizando a circulação reversa em operações de perfuração é bastante limitado. Desta forma, entende-se que o desenvolvimento do presente estudo é relevante, dado o estado da arte.

A partir dos trabalhos apresentados no Capítulo 3, constatou-se que a vazão, altura da contração e técnica de bombeio do fluido são parâmetros relevantes e que influenciam na força média exercida pelo fluido e eficiência de limpeza. Por isso, o efeito desses três parâmetros será investigado no presente trabalho. A metodologia empregada para avaliar tais parâmetros é apresentada no Capítulo 4.



## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A obtenção de resultados experimentais é útil para avaliar condições difíceis de modelar, para validar ou mesmo gerar dados que possibilitem a melhoria de modelos previamente desenvolvidos. Por esse motivo, este capítulo apresenta a descrição dos métodos experimentais utilizados, bem como uma descrição da bancada e dos materiais empregados.

### 4.1 Descrição da Bancada Experimental

Santos (2014) desenvolveu uma bancada experimental no laboratório *LabFlow*, pertencente ao Centro de Pesquisas em Reologia e Fluidos não Newtonianos (CERNN) da UTFPR, que permite simular algumas condições da dinâmica do escoamento em poços de petróleo. A descrição da bancada experimental, mostrada na Figura 9, é realizada a seguir.

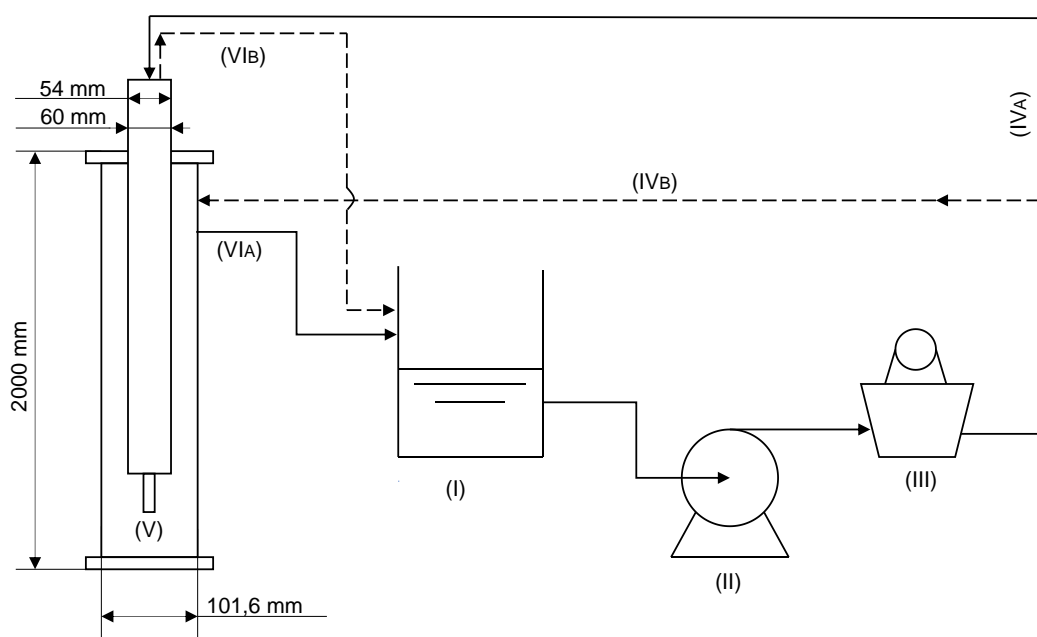


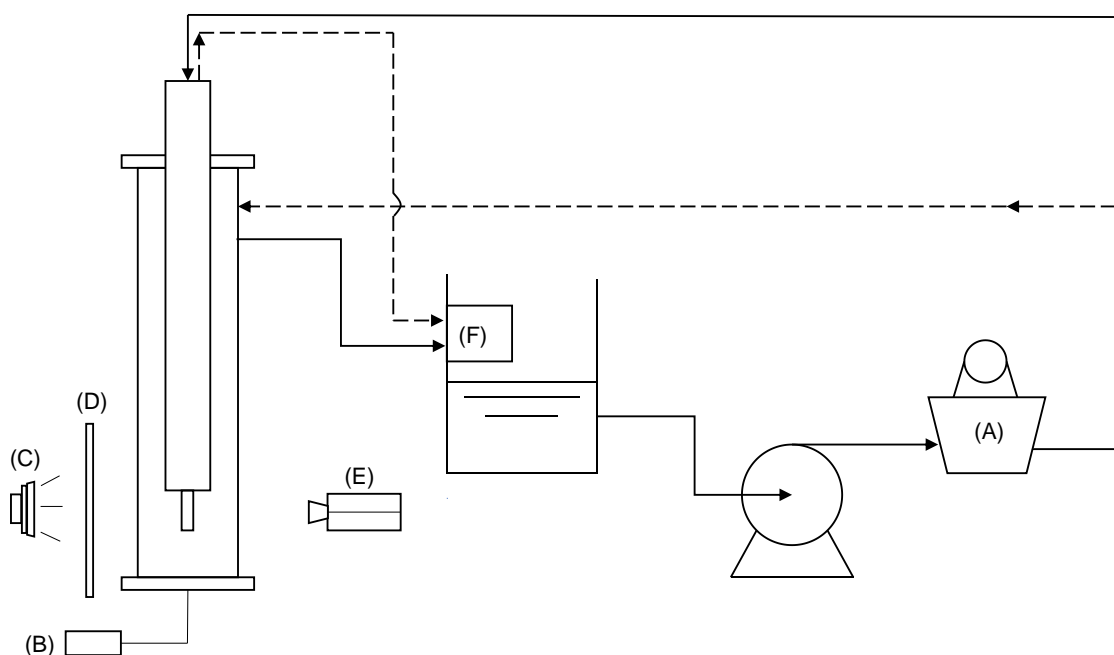
Figura 9 - Representação esquemática do circuito da bancada experimental.

O fluido de trabalho é armazenado à temperatura ambiente em um tanque misturador com volume de 100 L (I). O fluido escoar devido a ação de uma bomba centrífuga (II), passando por um medidor de vazão mássica do tipo *Coriolis* (III), até

a tubulação de acrílico. Na tubulação de acrílico a injeção do fluido ocorre de acordo com a técnica de circulação utilizada: para a circulação convencional, a entrada ocorre pela coluna de perfuração ( $IV_A$ ), e para a circulação reversa a entrada é feita pela região anular ( $IV_B$ ). O fluido passa pela contração ( $V$ ) e, então, retorna ao reservatório, também de acordo com o tipo de circulação: para a circulação direta o retorno é realizado pelo anular ( $VI_A$ ) e para a circulação reversa é realizado por dentro da coluna ( $VI_B$ ).

#### 4.1.1 Instrumentação

Os diversos sensores e equipamentos instalados na bancada são mostrados na Figura 10, representados através das letras de *A* a *F*.



**Figura 10 – Ilustração da instrumentação da bancada.**

O medidor de vazão do tipo *Coriolis* (representado na Figura 10 pela letra *A*) é uma parte importante do circuito experimental, especialmente para o sistema de controle (que é discutido mais profundamente na Seção 4.1.2), permitindo medir a vazão mássica do escoamento, a massa específica do fluido e a temperatura média do escoamento. É importante salientar que a temperatura média do escoamento é

essencial para a aproximação da viscosidade do fluido, conforme é descrito na seção 4.1.2.

Na Figura 10, o sensor representado pela letra *B* é um transdutor de pressão diferencial. Para medir a pressão no fundo do poço, a entrada de baixa pressão do transdutor está à pressão atmosférica, enquanto a de alta pressão avalia os valores provenientes da bancada. Esse procedimento foi empregado uma vez que não se dispunha de um transdutor de pressão manométrica para o uso na bancada

Na Tabela 5 têm-se, resumidamente, os sensores utilizados na bancada apresentando os parâmetros medidos por cada um, assim como sua faixa de medição e sua precisão.

**Tabela 5 - Sensores utilizados na bancada experimental**

<b>Indicador (referente à Figura 10)</b>	<b>Sensor</b>	<b>Parâmetros Medidos</b>	<b>Incerteza</b>
<b>A</b>	Medidor Coriolis	$\dot{m}$ [kg / s], $\rho$ [kg / m <sup>3</sup> ] e $T$ [K]	±0,5%
<b>B</b>	Sensor de Pressão	$p$ [Pa]	±0,41%

Ainda, têm-se outros equipamentos relevantes para o desenvolvimento do trabalho, tal qual o holofote (*C*), o tecido difusor (*D*) e a câmera de alta velocidade (*E*). Estes equipamentos foram utilizados para os testes de visualização, de forma que o holofote ilumina a tubulação na região de interesse através do tecido difusor, que distribui a luz, possibilitando a aquisição de imagens com melhor definição.

Por fim, há a presença de uma peneira (*F*) na saída das tubulações para o tanque. A finalidade deste equipamento é promover a separação das partículas presentes no fluido, sem que retornem ao circuito experimental.

#### **4.1.2 Controle da Bancada**

O controle da bancada é realizado utilizando a interface de programação *LabView*. O programa centraliza todas as informações através de sinal digital transmitidos pelos sensores. Por meio dele, ainda, é possível controlar parâmetros

da bancada, realizar cálculos de outras grandezas relacionadas àquelas medidas, como o número de Reynolds, e armazená-las em planilhas.

O controle da bancada é realizado com base em um valor fixado para o número de Reynolds na contração. A partir da vazão mássica e massa específica, medidos pelo medidor *Coriolis*, é possível calcular a vazão volumétrica do escoamento. Ainda, o medidor mássico informa a temperatura do escoamento que, utilizando a relação empírica mostrada na Equação (4.1), permite aproximar o valor da viscosidade do fluido.

$$\mu = A.10^{B/(T-C)} \quad (4.1)$$

A equação do tipo Arrhenius, apresentada na Equação (4.1), é função da temperatura do fluido,  $T$ , dada em  $K$  e das constantes experimentais  $A$ ,  $B$  e  $C$ . As constantes são definidas para a água como  $A = 2,414 \times 10^{-5} \text{ N.s/m}^2$ ,  $B = 247,8 \text{ K}$  e  $C = 140 \text{ K}$  (FOX et al., 2014).

Com tais grandezas, aliadas ao diâmetro do tubo, o *software* é capaz de determinar o número de Reynolds para a contração. A partir do valor de Reynolds fixado, a vazão bombeada é controlada através de um inversor de frequência que controla a rotação do motor da bomba centrífuga.

## 4.2 Condições Operacionais

A presente seção visa expor sob quais condições os testes foram realizados, para que então possa se desenvolver o restante do trabalho.

### 4.2.1 Fluido de Trabalho

Sabe-se que fluidos de perfuração apresentam comportamento não-Newtoniano ou, mais especificamente, comportamento viscoplástico (OLIVEIRA, 2011). No entanto o fluido adotado para o desenvolvimento do trabalho foi a água.

Foi utilizada a água como fluido de trabalho já que seu comportamento newtoniano simplifica os fenômenos envolvidos. Ainda, o uso da água é justificado visto que uma das etapas do projeto envolve a visualização do escoamento particulado. Para tal, é necessário o uso de fluido transparente com índice de refração aproximado ao do acrílico utilizado na tubulação. Sabe-se que o índice de

refração da água pode ser adotado como  $\eta_{\text{água}} = 1,33$  (SÁNCHEZ, 2011) e do acrílico como  $\eta_{\text{acrílico}} = 1,49$  (HALLIDAY, 2012).

Por fim, há um grande interesse em utilizar a água como fluido de trabalho já que se trata de um fluido isento de riscos de contaminação ambiental, e de fácil descarte e substituição na bancada. Por esse motivo, a água é tradicionalmente utilizada como referência para estudos realizados em bancadas experimentais, e assim pode ser usada para posteriores comparações com fluidos que representem melhor as condições de campo.

#### 4.2.2 Número de Reynolds

Os limites de vazão utilizados foram baseados em restrições operacionais da bancada e em resultados obtidos para a eficiência de limpeza.

Como visto na Seção 4.1.2, o controle da bancada é realizado em função do número de Reynolds na contração, cujos valores utilizados para o estudo foram  $Re = 30.000$ ,  $40.000$  e  $50.000$ . A Tabela 1 apresenta os valores do número de Reynolds avaliados na contração, com a vazão volumétrica equivalente a cada caso e o Reynolds correspondente no anular.

**Tabela 6 – Valores de vazão volumétrica em cada caso avaliado, com o valor de número de Reynolds equivalente na contração e na região anular.**

Vazão Volumétrica (L/s)	$Re_{\text{contração}}$	$Re_{\text{anular}}$
0,476	30.000	2738
0,651	40.000	3745
0,802	50.000	4612

#### 4.2.3 Contração

Para melhor refrigeração e limpeza do poço a geometria das brocas, assim como a disposição dos seus bocais ejetores, tende a ser muito complexa (BISSON et al., 1988). Por isso, no presente trabalho, simplifica-se a geometria da broca a uma contração abrupta, fazendo com que os padrões de escoamento se tornem relativamente mais simples. Ainda, o uso da contração possibilita a incidência de um

jato axissimétrico, o que não ocorre com o uso de uma broca. O jato axissimétrico permite a avaliação mais precisa do perfil de pressões no fundo do poço, conforme será discutido na Seção 4.3.2.3.

Desta forma, para o trabalho é utilizada uma contração abrupta com razão de contração  $\beta = 2,7$ . Essa razão de contração foi selecionada devido à sua disponibilidade no laboratório do CERNN, uma vez que foi utilizada por Santos (2014).

Sabe-se que a distância dos bocais ejetores até a formação rochosa é muito pequena, uma vez que a incidência dos jatos ocorre enquanto a broca perfura o poço. Para o desenvolvimento deste estudo, no entanto, será avaliada a influência da altura da contração ao fundo do poço, tanto na eficiência de limpeza, quanto na força gerada pelo fluido. As alturas estudadas foram  $h = 25, 50$  e  $100$  mm.

#### 4.2.4 Fase dispersa

Dentre as características desejadas para o particulado a ser utilizado, pode-se citar: (a) não ser transparente, para que seja possível detectá-lo, em meio ao escoamento, através da visualização; (b) possuir massa específica tal que não ocorra sua suspensão ou deposição excessiva e (c) possuir granulometria compatível com a capacidade de aquisição de imagens da câmera e com o diâmetro da contração. Desta forma, a avaliação da eficiência de limpeza do poço é realizada utilizando particulado de Ureia, cujas informações do fabricante são apresentadas na Tabela 7. Tal escolha também é explicada por testes experimentais realizados com diferentes particulados e pela disponibilidade do material nas dependências do CERNN.

**Tabela 7 – Informações fornecidas pelo fabricante acerca do particulado utilizado.**

<b>Diâmetro Médio (<math>\bar{D}_p</math>)</b>	$0,8 \text{ mm} < \bar{D}_p < 1,2 \text{ mm}$
<b>Massa Específica à 25°C</b>	$1,5 - 1,6 \text{ g/cm}^3$

A seleção do particulado com o diâmetro indicado na Tabela 7 está associada a dois fatores principais: (i) a disponibilidade das partículas nas dependências do CERNN, o que não trouxe custos adicionais ao projeto e (ii) o fato de a água

apresentar baixa viscosidade e baixa massa específica reduz sua capacidade de suspensão de partículas sólidas. Desta forma, o uso de partículas com esta faixa de diâmetros possibilitou manter a água como fluido de trabalho.

### **4.3 Metodologia**

#### **4.3.1 Readequação da Bancada**

Santos (2014) projetou e construiu uma bancada experimental que simulasse algumas condições da dinâmica de escoamento de um poço. A bancada possibilitava avaliar a força de impacto do fluido e o coeficiente de descarga em uma contração abrupta utilizando a circulação convencional. Para o desenvolvimento do presente trabalho, foi necessário readequar a bancada de forma a possibilitar a avaliação da limpeza do poço utilizando circulação direta e circulação reversa.

Alterações no circuito hidráulico foram realizadas para que fosse possível inverter o sentido de bombeio do fluido. Para a avaliação da eficiência de limpeza, foi desenvolvida uma metodologia que possibilitasse a inserção do particulado no escoamento e sua separação do fluido de trabalho. Por fim, a bancada foi alterada para que fosse possível avaliar o escoamento a partir da visualização da região de impacto do fluido no fundo do poço.

#### **4.3.2 Parâmetros Avaliados**

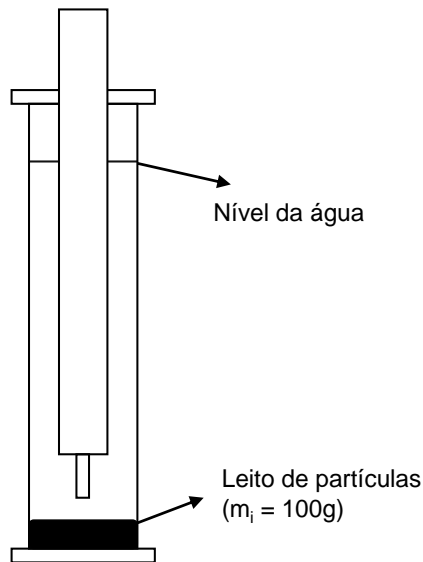
Deseja-se comparar a circulação direta com a circulação reversa. Para isso são comparadas (i) a eficiência de limpeza, (ii) a força média exercida pelo fluido no fundo do poço e (iii) as imagens obtidas para cada técnica de bombeio do fluido.

A seguir será descrita a metodologia desenvolvida para a obtenção de cada parâmetro.

##### **4.3.2.1 Eficiência de limpeza**

A metodologia desenvolvida para a avaliação da eficiência de limpeza foi adaptada a partir da utilizada por Okon e Agwu (2015). Assim, foi inserido um leito de partículas no fundo da bancada, já preenchida com o fluido de trabalho, como

ilustrado na Figura 11. A massa desse leito foi avaliada com uma balança de precisão, e em todos os experimentos correspondente a  $m_i = 100$  g.



**Figura 11 – Ilustração do posicionamento do leito de partículas.**

O escoamento foi mantido 2 minutos com  $Re_{contração} = 5.000$ , enquanto o leito é posicionado. Essa vazão não é suficiente para iniciar a suspensão das partículas. Finalizados os 2 minutos, a vazão de teste (correspondente a  $Re = 30.000$ ,  $40.000$  ou  $50.000$  na contração) foi inserida no controle da bancada e, a partir deste instante, o escoamento foi mantido por 5 minutos. Ao final dos 5 minutos o a bomba foi completamente desligada, interrompendo o escoamento. Desta forma foi possível a retirada da peneira que continha o particulado removido ao longo do tempo de teste. Entre cada teste a bancada foi parcialmente desmontada e completamente limpa, para que resquícios de partículas de testes anteriores não interferissem na coleta de partículas. Este processo de limpeza consiste na remoção do flange inferior, possibilitando a retirada das partículas residuais.

As partículas retiradas de cada teste foram secadas separadamente e, então, tiveram sua massa medida. A secagem foi realizada à temperatura ambiente, por



dois dias. Após este período, as amostras de partículas foram pesadas por gravimetria, utilizando uma balança com precisão de 0,1g.

Desta forma, foi possível determinar o indicador de remoção de sólidos da bancada com base no CCI, Equação (4.2). O indicador foi definido com base no CCI determinado experimentalmente por Okon e Agwu (2015). Destaca-se que os autores propuseram a formulação do indicador, mostrada na Equação (3.1), no entanto a correlação não foi utilizada, pois leva em consideração as propriedades reológicas do fluido de perfuração. Uma vez que no presente trabalho a água é utilizada, a correlação não é aplicável.

$$\eta_1 = CCI = \left( \frac{m_{retirada}}{m_{inicial}} \right) \quad (4.2)$$

Nota-se que a determinação do CCI proposta, corresponde à razão da massa retirada pelo fluido ( $m_{retirada}$ ) pela massa posicionada inicialmente no leito ( $m_{inicial}$ ).

Foi avaliada a influência da vazão, através da variação do número de Reynolds, e da altura da contração na eficiência de limpeza.

#### 4.3.2.2 Visualização do Escoamento

Com o objetivo de avaliar alguns dos efeitos transientes presentes no problema de eficiência de limpeza, foram conduzidos testes de visualização do escoamento. Desta forma, a mesma metodologia utilizada na Seção 4.3.2.1 foi adotada, desta vez adquirindo imagens da região que contempla da contração ao fundo da bancada.

A partir das imagens obtidas, torna-se possível avaliar a influência de cada parâmetro na remoção de sólidos ao longo do tempo, assim como avaliar a retirada das partículas da região da contração. Ao fazer uma analogia com as condições de campo, a janela de visualização representa a região da broca de perfuração.

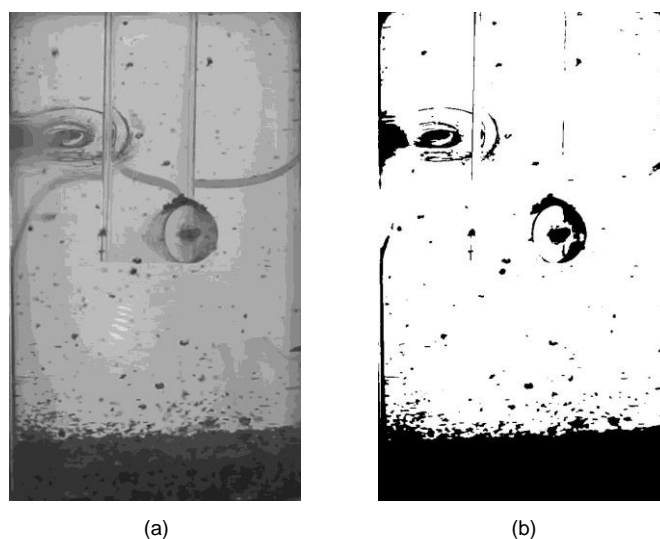
Com o objetivo de avaliar qualitativamente o comportamento na remoção das partículas em função do tempo, as imagens obtidas pela câmera, Figura 12 (a), foram tratadas através dos softwares *ImageJ* e *DynamicStudio*, sendo convertidas em imagens binárias, Figura 12 (b). A partir das imagens binárias, foi determinado o percentual de pixels correspondentes às partículas, na seção de visualização.

Devido à maneira com que é feita a captura das imagens, a janela de visualização permite a avaliação do volume da seção, e não somente um plano como seria através da iluminação com um laser, por exemplo. Desta forma, o percentual de pixels correspondentes às partículas será relacionado à fração volumétrica avaliada pelas imagens  $\phi_{im}$ , conforme a Equação (4.3).

$$\phi_{im} = \left( \frac{N_{particula}}{N_{total}} \right) \quad (4.3)$$

Na Equação (4.3),  $N_{particula}$  corresponde ao número de pixels correspondentes às partículas e  $N_{total}$  é o número total de pixels de cada imagem. É importante salientar que a Equação (4.3) fornece uma estimativa da fração volumétrica, mas que não necessariamente representa a fração volumétrica real de sólidos presentes no fluido. Dessa forma,  $\phi_{im}$  atua como um parâmetro qualitativo para avaliar a quantidade de sólidos dispersos. Para os casos estudados, tem-se que os pixels pretos correspondem às partículas, enquanto os pixels brancos correspondem ao restante da imagem.

Cada imagem tratada pelo *software* corresponde a um instante de tempo, tornando possível gerar gráficos apresentando a fração volumétrica em função do tempo.

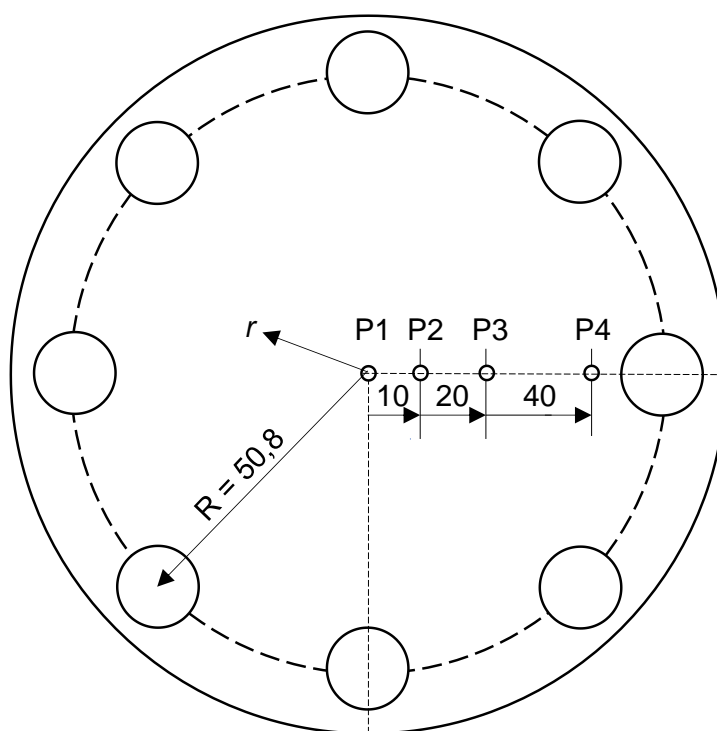


**Figura 12 - (a) Imagens obtidas pela câmera de alta velocidade, e (b) Imagens binárias filtradas pelo *software ImageJ*.**

### 4.3.2.3 Força Média Exercida pelo Fluido

Para a determinação da força média exercida pelo fluido no fundo do poço, optou-se por medir as pressões na porção inferior da bancada, para que fosse discutida a distribuição de pressão no fundo do poço, bem como a força média exercida no fundo da bancada.

Há quatro tomadas de pressão posicionadas no fundo do poço, sendo uma concêntrica à tubulação e as outras posicionadas, radialmente, em  $r = 10, 20$  e  $40$  mm, como mostrado na Figura 13.



**Figura 13 – Representação do fundo do poço com os pontos de tomada de pressão ilustrados.**

Na Figura 13 são apresentados os pontos de tomada de pressão representados por P1, P2, P3 e P4. A partir das medidas de pressão foi possível ajustar um polinômio que representa a pressão em função do raio, para cada caso estudado. Os ajustes foram realizados através do método dos mínimos quadrados. A

partir dos ajustes, é possível determinar a força média exercida pelo fluido através da integração simples mostrada na Equação (4.4).

$$F_{\text{impacto}} = \int_0^R P(r) \cdot 2\pi r dr \quad (4.4)$$

Na Equação (4.4)  $R$  é o raio do poço, dado em metros,  $r$  refere-se aos pontos no eixo radial e  $p(r)$  é descrito pela curva que aproxima os pontos de pressão medidos no fundo do poço. Desta forma, como realizado no trabalho de Santos (2014), é possível aproximar a força média no fundo do poço.

#### 4.4 Síntese do Capítulo

No Capítulo 4 foram descritas as questões mais relevantes da metodologia adotada para o desenvolvimento do trabalho. Primeiramente, o circuito experimental foi descrito, juntamente com os equipamentos e sensores utilizados para a coleta de dados na bancada experimental. As condições de operação da bancada e parâmetros variados foram listados em seguida. A força média no fundo do poço foi determinada a partir da integração de uma curva levantada através do mapeamento da pressão no fundo da bancada. A pressão é medida em quatro pontos distribuídos radialmente em um anteparo, posicionado na porção inferior da bancada. A eficiência de limpeza é avaliada a partir de dois métodos diferentes: (i) determinação do percentual de massa retirada de um leito com  $m_i = 100$  g e (ii) visualização do escoamento. A primeira tem como objetivo avaliar de forma global o transporte de sólidos no poço vertical, enquanto a segunda tem a finalidade de avaliar o padrão de escoamento na região da contração e os efeitos transientes envolvidos na remoção do leito de sólidos. Para a visualização, a análise é realizada com base na contagem de pixels correspondentes às partículas, através do software *ImageJ* e na avaliação das imagens.

Os resultados obtidos a partir das técnicas descritas no Capítulo 4 são apresentados e discutidos no Capítulo 5 a seguir.

## 5 RESULTADOS

A metodologia experimental descrita no Capítulo 4 é empregada para determinar a força média e eficiência de limpeza, utilizando tanto a circulação direta como a reversa. A primeira seção do Capítulo 5 apresenta os resultados de força média e os perfis de pressão determinados no fundo do poço. A avaliação deste parâmetro é justificada pelo aumento da taxa de penetração na formação rochosa, associado ao impacto do fluido por Lingen (1962), Sutko e Myers (1971), Warren e Winters (1984) e Wells e Pessier (1993). A Seção 5.2, por sua vez, descreve os resultados de eficiência de limpeza, determinados a partir do CCI. É avaliada a influência do número de Reynolds e da distância da contração ao fundo da bancada na remoção dos sólidos presentes no leito. Por fim, a Seção 5.3 apresenta os resultados da visualização do escoamento. A partir desta metodologia a remoção de sólidos foi avaliada ao longo do tempo de forma qualitativa.

### 5.1 Força Média

Para o estudo da força média, foram realizadas três etapas que são discutidas nas seções subsequentes. A primeira consiste na validação dos resultados para a circulação direta, ao compará-los com os apresentados por Santos (2014) e Figueiredo (2014). A seguir foram apresentados os perfis de pressão, avaliados em casos diferentes dos estudados por Santos (2014), incluindo a operação em circulação reversa. Por fim, há a comparação entre a força média determinada experimentalmente para a circulação convencional e para a reversa.

#### 5.1.1 Validação da bancada

A primeira etapa para o desenvolvimento do trabalho consistiu na reprodução dos resultados obtidos por Santos (2014), com o objetivo de validar os resultados para a circulação direta.

Os perfis de pressão apresentados ao longo de toda a seção são normalizados de acordo com as equações apresentadas nas Equações (5.1) e (5.2).

$$p^* = \frac{P}{P_{máx}} \quad (5.1)$$

$$r^* = \frac{r}{r_{m\acute{a}x}} \quad (5.2)$$

Na equação (5.1)  $p^*$  é a pressão normalizada adimensional [-],  $p$  é a pressão medida em cada ponto em Pa e  $p_{m\acute{a}x}$  é a pressão máxima medida em cada caso apresentado, também em Pa. Na Equação (5.2)  $r^*$  é o raio normalizado [-],  $r$  é a posição radial em mm e  $r_{m\acute{a}x}$  é o raio do poço, em mm.

O objetivo de normalizar os dados é permitir a comparação entre diferentes condições experimentais de forma qualitativa, já que se deseja apresentar os comportamentos e tendências notadas. As medidas de pressão são apresentadas, com suas incertezas, no Apêndice B.1.

As medidas de pressão apresentadas no trabalho de Santos (2014) foram comparadas com as obtidas experimentalmente, de acordo com a Figura 14. Os erros relativos, determinados a partir da comparação com os resultados apresentados na literatura, são calculados partir da Equação (5.3).

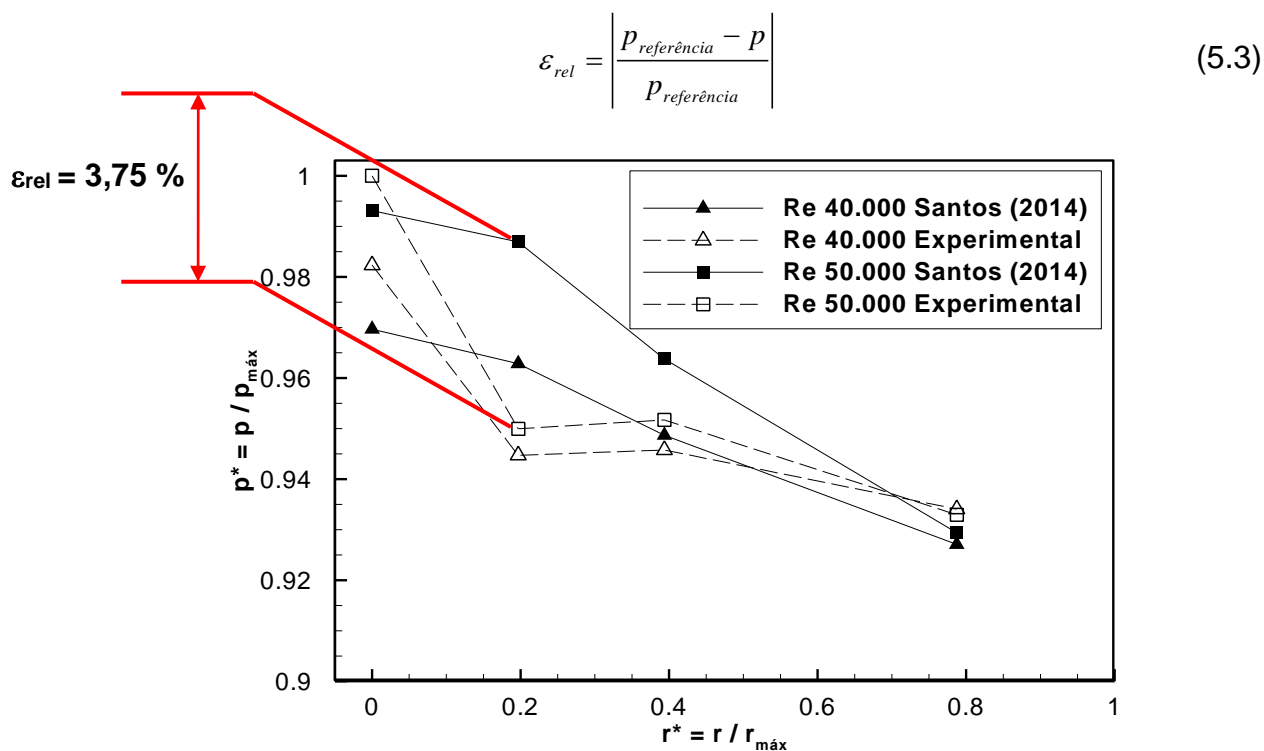
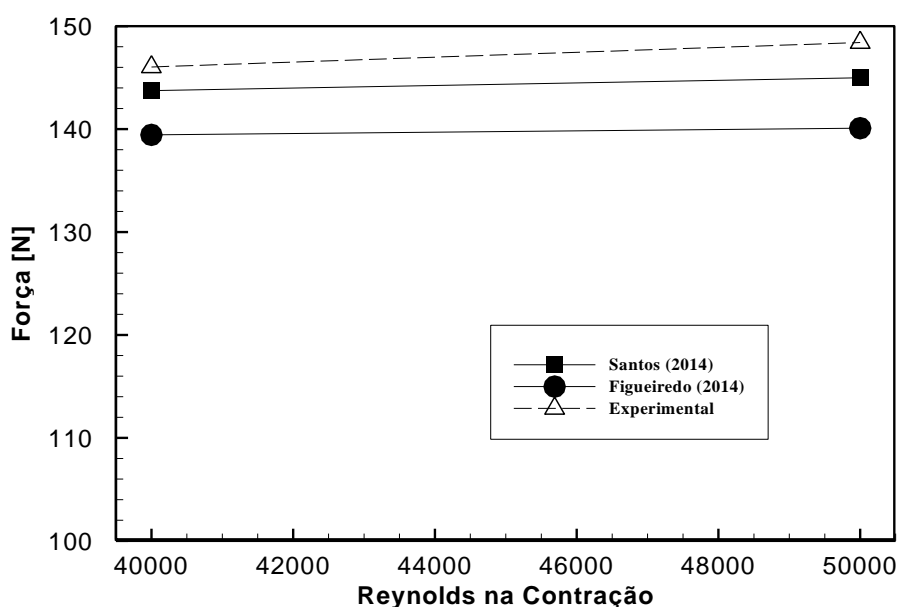


Figura 14 -Comparação dos resultados experimentais com os obtidos por Santos (2014).  
 $h = 100 \text{ mm} - \beta = 2,7$

Nota-se a partir da Figura 14, que os pontos de pressão medidos estão muito próximos aos apresentados por Santos (2014). Ainda, a medida de pressão que mais divergiu da apresentada pela literatura tem erro relativo inferior a 5%. Por isso, assume-se que a metodologia e instrumentação utilizadas são adequadas para a avaliação da pressão no fundo da bancada.

A partir dos dados de pressão, foi realizado um ajuste polinomial da pressão em função do raio, possibilitando determinar a força média exercida pelo fluido no fundo da bancada, com base na Equação (4.4). A força foi comparada com os resultados apresentados por Santos (2014) e Figueiredo (2014), de acordo com a Figura 15.

Na Figura 15, tem-se valores de força muito próximos dos obtidos por Santos (2014) e por Figueiredo (2014). A partir disso, assume-se que a metodologia é adequada, também para a determinação da força média exercida no fundo da bancada. No entanto, deve-se destacar que o resultado para a força está sujeito a erros provenientes do método de ajuste e de integração utilizado.



**Figura 15 – Comparação com a literatura dos resultados de força média, para circulação direta, em função do número de Reynolds na contração.**

### 5.1.2 Perfis de Pressão

Uma vez validados os perfis de pressão nas condições avaliadas por Santos (2014), a pressão no fundo da bancada foi mapeada para as condições estudadas no presente trabalho. Dessa forma, foram avaliados os perfis de pressão para circulação direta com os números de Reynolds avaliados na contração de 30.000, 40.000 e 50.000. A influência da vazão nos perfis de pressão, para a circulação direta, é apresentada na Figura 16. Para que a condição pudesse ser avaliada, fixou-se a altura da contração ao fundo da bancada em 25 mm.

O aumento na vazão, caracterizado por uma elevação no valor do número de Reynolds, gera variações de pressão mais significativas para os pontos que tendem ao centro da tubulação ( $r^* = 0$ ), como é possível notar na Figura 16. Assim, conforme se afasta radialmente do centro do tubo, o valor da pressão medida tende ao valor da pressão hidrostática. Uma vez que a pressão medida no fundo da bancada consiste em uma parcela hidrodinâmica e uma hidrostática, é possível afirmar que há menor influência da parcela dinâmica nos pontos radialmente mais distantes. Assim, a diferença de pressão ocasionada por uma variação na vazão só é notada nos pontos mais centrais, já que estão na área de impacto do jato.

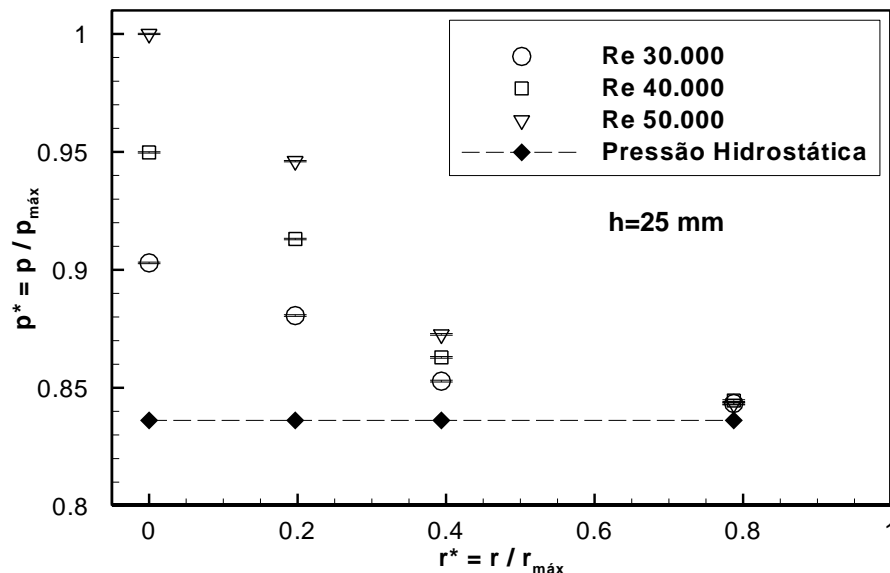


Figura 16 – Resultados de pressão normalizada em função do raio normalizado para a circulação direta com  $h=25\text{mm}$  e  $\beta = 2,7$  – Influência da Vazão.



A influência da altura da contração ao fundo da bancada também foi estudada, sendo apresentada graficamente na Figura 17. Para tal, o valor de número de Reynolds na contração foi fixado em 30.000.

A variação da distância da contração ao fundo da bancada resulta em alterações significativas nas medidas de pressão posicionadas no centro do poço, como é mostrado na Figura 17. Assim como discutido anteriormente, a diferença entre a pressão avaliada nos pontos mais centrais e nos mais próximos à parede da tubulação é ocasionada pela variação na magnitude da parcela dinâmica da pressão.

Conforme a contração é afastada do fundo do poço, nota-se que a pressão medida em  $r^* = 0$  tende a se reduzir, indicando menor relevância da porção dinâmica mesmo nos pontos mais centrais. Por isso, assume-se que o líquido atinge o fundo da bancada com menor velocidade nos casos em que a contração está mais distante dos pontos de tomada de pressão, já que a pressão dinâmica é função da velocidade do fluido. Atribui-se esta desaceleração do fluido à maior área de contato com as camadas adjacentes de fluido já desacelerado, que se encaminha para o anular.

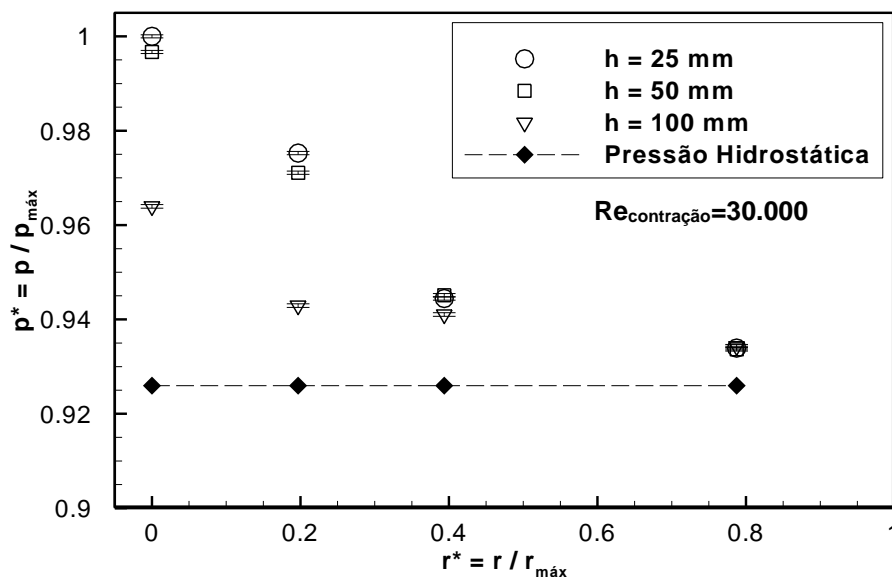
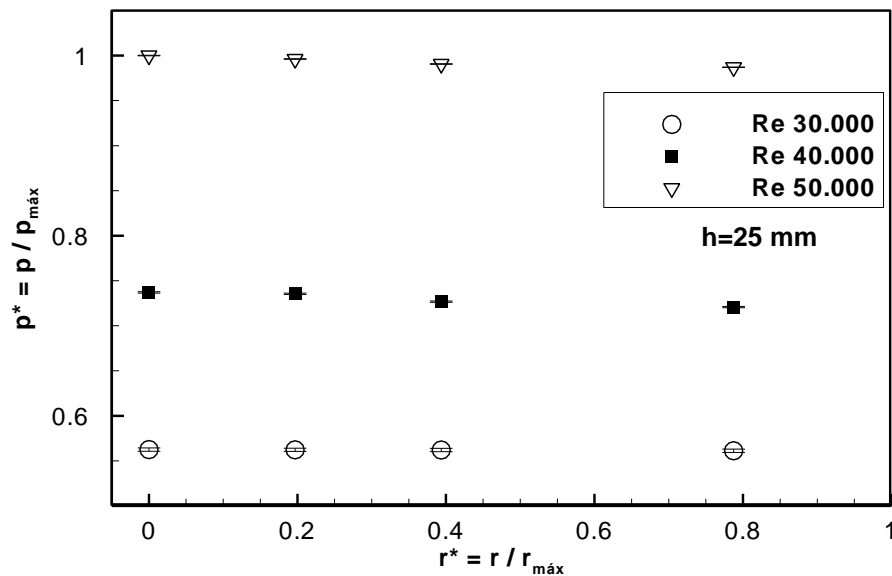


Figura 17– Resultados de pressão normalizada em função do raio normalizado para a circulação direta com  $Re = 30.000$  e  $\beta = 2,7$  – Influência da altura da contração ao fundo da bancada.

Os resultados analisados na Figura 17 são coerentes com o que se encontra na literatura. Santos (2014) observou os mesmos comportamentos nos perfis de pressão analisados em seu trabalho, tanto para a variação no número de Reynolds quanto para a variação da altura. Ainda, Bacelar (2016) observou pontos de pressão máxima para a circulação direta. Os pontos de pressão máxima foram notados em pequenas áreas na direção de bocais ejetores, o que é coerente com o comportamento fluidodinâmico de um jato submerso. Assim como para a circulação convencional, a influência da vazão nos perfis de pressão no fundo da bancada foi estudada para a circulação reversa. Os resultados, fixando a altura da contração em  $h = 25 \text{ mm}$ , são expressos graficamente na Figura 18.



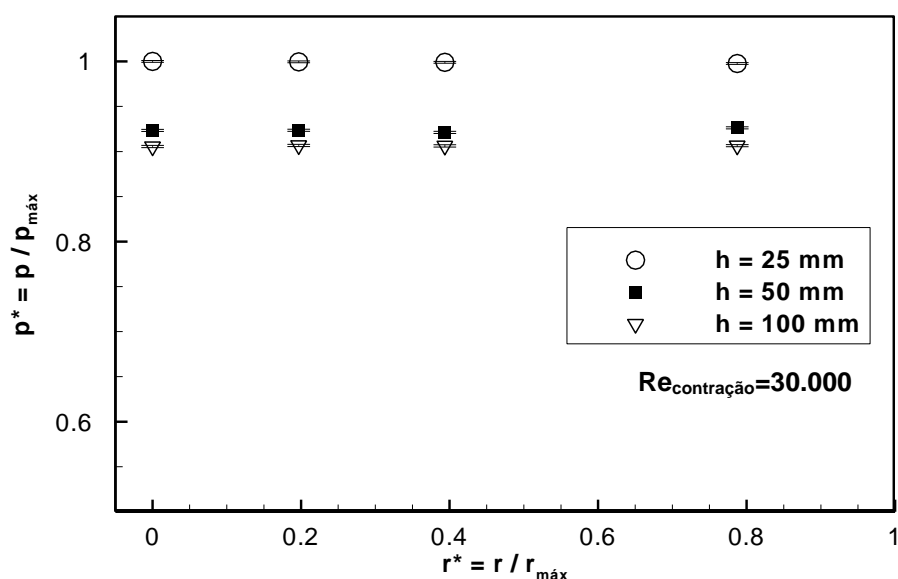
**Figura 18– Resultados de pressão normalizada em função do raio normalizado para a circulação reversa com  $h=25\text{mm}$  e  $\beta = 2,7$  – Influência da Vazão.**

Nota-se, a partir da Figura 18, que a circulação reversa apresenta um perfil de pressões mais uniforme do que a circulação direta. Esta condição é explicada pela ausência do jato incidindo no fundo do poço, uma vez que o fluido bombeado pela região anular só é acelerado após colidir com o fundo da bancada.

Para a circulação reversa, a elevação no número de Reynolds atua de forma mais significativa sobre o perfil de pressões do que para a circulação direta. Como é possível observar a partir da Figura 18, o incremento na vazão gera uma diferença percentual substancial para os resultados de pressão, quando comparado à

circulação direta (Figura 16). Daroz (2015) associa tal fenômeno à perda de carga na contração. Para a circulação direta, a contração está à montante do escoamento fazendo com que a perda de energia ocorra antes do impacto do fluido com o fundo do poço, afetando a pressão medida. Dessa forma, a perda de carga imposta pela contração atua no sentido de amortecer a pressão total no fundo do poço. Por outro lado, na circulação reversa os bocais ejetores encontram-se à jusante, e a perda de carga ocorre após o impacto do fluido. Isso faz com que o fundo do poço receba a carga de pressão dinâmica sem o amortecimento imposto pelas perdas de pressão na contração, o que resulta em uma influência muito mais significativa da vazão na pressão no fundo do poço.

Na Figura 19, avalia-se a influência da altura da contração ao fundo da bancada experimental, quando operada em circulação reversa. Para que a relevância deste parâmetro pudesse ser quantificada, o número de Reynolds foi fixado em 30.000.



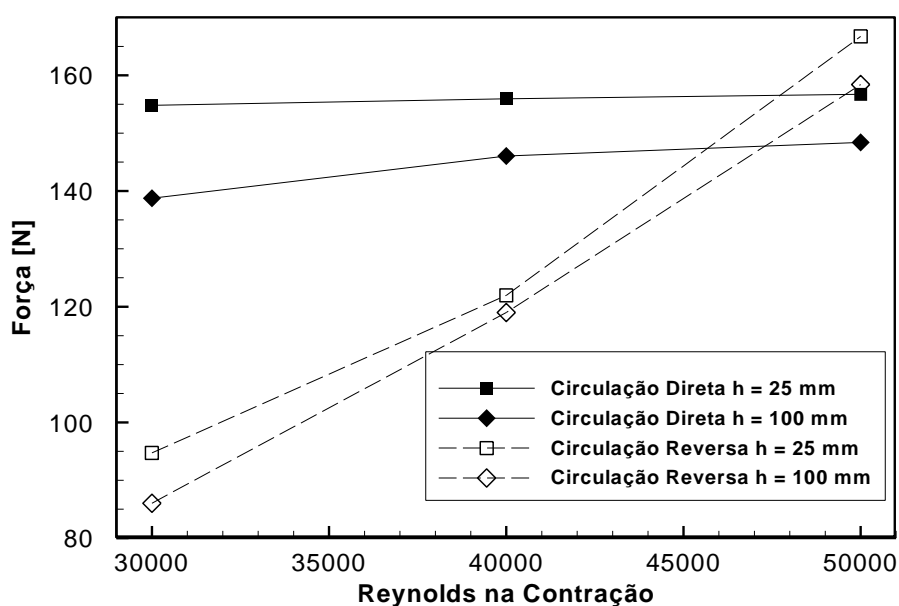
**Figura 19 – Resultados de pressão normalizada em função do raio normalizado para a circulação reversa com  $Re = 30.000$  e  $\beta = 2,7$  – Influência da Altura da contração ao fundo da bancada.**

Na Figura 19, é possível observar que ao reduzir a altura da contração até o fundo da bancada, para a circulação reversa, ocorre um aumento na pressão medida. Esta condição é verificada pois, ao aproximar a contração do fundo da bancada, o fluido atinge a região das tomadas de pressão com maior velocidade, possibilitando perceber de forma mais significativa a parcela dinâmica da pressão.

### 5.1.3 Força Média

Com base nos resultados de pressão apresentados na Seção 5.1.2 foram ajustadas curvas, a partir das quais foi possível determinar a força média gerada pelo fluido no fundo da bancada.

A comparação entre as forças médias avaliadas para circulação direta e reversa é apresentada na Figura 20.



**Figura 20 – Comparação entre os resultados de força média em função do número de Reynolds na contração para a circulação direta e reversa.**

Na Figura 20 é possível avaliar a influência do número de Reynolds, da distância da contração até o fundo do poço e do tipo de técnica de circulação nos resultados de força média. Nota-se que a altura da contração é um fator que afeta a força gerada no fundo da bancada em ambas as técnicas de circulação. Observa-se, ainda, que nas condições avaliadas a altura do jato é um fator predominante de influência na força média para a circulação direta.

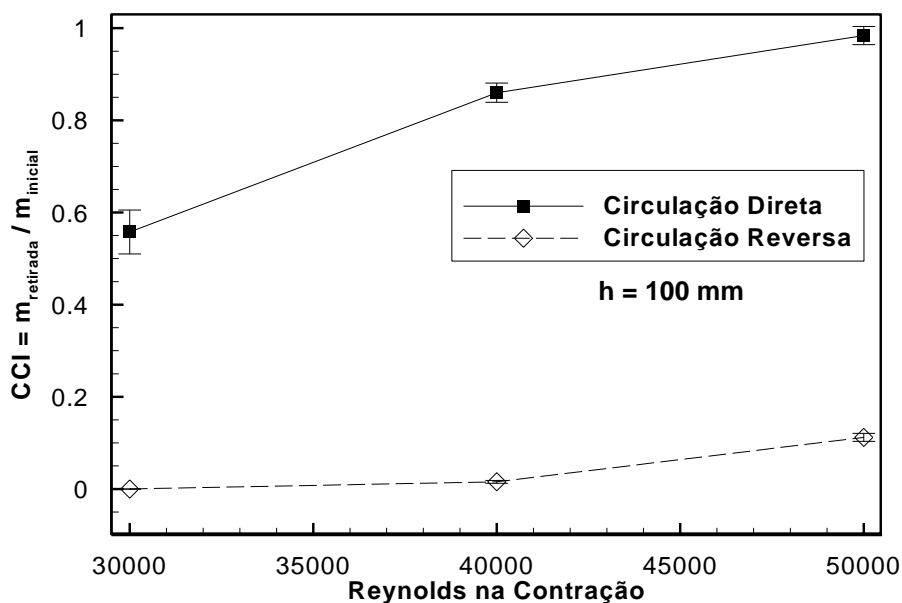
Para os casos testados, observa-se que a vazão exerce uma influência muito mais significativa sobre a força média, determinada no fundo do poço, quando a bancada opera em circulação reversa. Assim como na Seção 5.1.2, associa-se esta condição à perda de carga ocasionada pela presença da contração abrupta. Ainda, o

formato dos perfis de pressão explica os resultados obtidos para a força: as alterações observadas nos perfis de pressão para a circulação direta ocorrem somente nos pontos centrais, enquanto para a circulação reversa ocorre em todos os pontos. Desta forma, a variação na força média para a circulação direta, ao variar a vazão, é mais sutil do que para a circulação reversa.

## 5.2 Eficiência de Limpeza

Os testes conduzidos para avaliar a eficiência de limpeza na bancada utilizaram um leito com massa inicial de 100 g, conforme descrito na Seção 4.3.2.1.

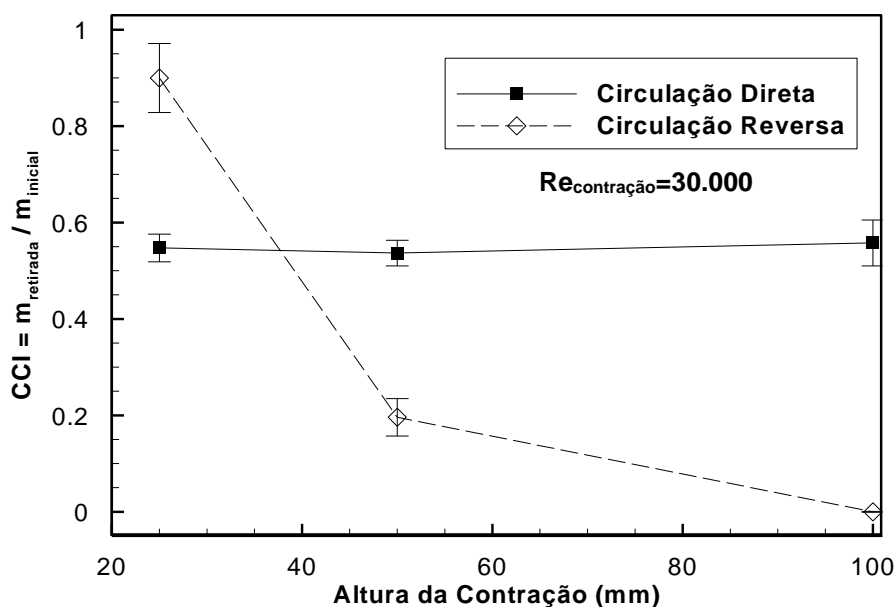
A Figura 21 apresenta a influência do aumento da vazão, caracterizada pelo aumento do número de Reynolds na contração, no CCI para a circulação direta e reversa. Os testes foram conduzidos fixando a altura da contração ao fundo da bancada em 100 mm.



**Figura 21 – Resultados de eficiência de limpeza em função do número de Reynolds na contração comparando a circulação direta e reversa utilizando  $h = 100$  mm e  $\beta = 2,7$  – Influência da vazão.**

A partir do resultado apresentado na Figura 21, é possível observar que a circulação direta se apresentou significativamente mais eficaz na remoção dos sólidos. Daroz (2015) conclui em seu trabalho que a dificuldade em retirar sólidos a

partir da circulação reversa pode estar associada à distância dos bocais ejetores ao fundo do poço, já que o fluido apresenta baixa quantidade de movimento no anular, dificultando o transporte das partículas até a contração. Para verificar esta hipótese, a altura da contração ao fundo da bancada foi variada, tendo o número de Reynolds fixado em 30.000. Os resultados destes testes são apresentados na Figura 22.



**Figura 22 – Resultados de eficiência de limpeza em função da altura da contração ao fundo da bancada comparando a circulação direta e reversa utilizando  $Re = 30.000$  e  $\beta = 2,7$  – Influência da altura da contração.**

A partir da Figura 22, é possível observar que para a vazão testada, a remoção dos sólidos na circulação direta é constante com a variação na distância da contração ao fundo da bancada. Uma vez que a aproximação do jato ao fundo do poço afeta somente o padrão de escoamento na região, assume-se que a velocidade crítica não foi atingida no anular. Assim, o fator limitante para a circulação convencional é a baixa velocidade do fluido na região anular, e não a ressuspensão das partículas presentes no leito.

Para a circulação reversa, por outro lado, a redução na distância da contração foi benéfica para a limpeza das partículas. Explica-se esta condição, pois a limitação da circulação reversa se encontra na suspensão das partículas estáticas no leito e no posterior transporte até o interior da contração. Ao aproximar a contração do fundo da bancada, o fluido é forçado através do leito de partículas, removendo-as.

Ainda, a aproximação permite que o escoamento, mesmo com baixa velocidade transporte os sólidos até a contração.





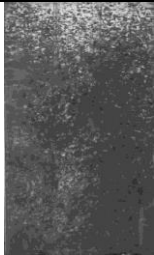
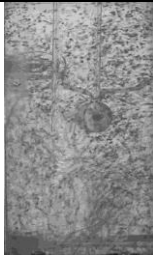
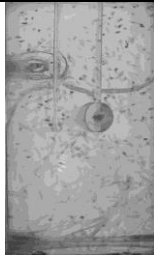
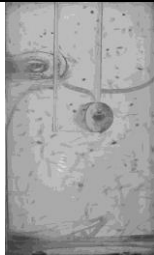
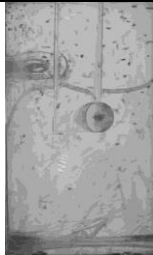
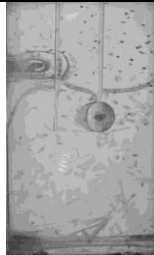










Por fim, ao observar os resultados exibidos na Figura 22, conclui-se que a circulação reversa pode ser equiparada à convencional, em termos de remoção de sólidos, para os casos avaliados. Para isso é necessário que se tenham as condições adequadas de altura da contração e vazão do fluido de trabalho.

### 5.3 Visualização

Os testes de visualização foram conduzidos para que os efeitos transientes, presentes na remoção do leite, pudessem ser avaliados de forma qualitativa. Ainda, tem-se o objetivo de avaliar a região da contração, já que representa o domínio da broca.

Sabe-se que a taxa de aquisição de imagens da câmera utilizada (*Cannon T2i*) é de 30 Hz. Assim, é possível determinar o instante de tempo correspondente a cada imagem. Para a avaliação através da visualização, as imagens foram coletadas ao longo de 5 minutos, assim como nos testes de eficiência de limpeza avaliando a massa de partículas retiradas. As imagens referentes aos instantes de tempo equivalentes a 0, 5, 10, 15, 30, 60, 120, 180, 240 e 300 segundos foram utilizadas. Com o objetivo de avaliar o percentual de partículas residentes no domínio da contração, as imagens foram convertidas em imagens binárias através do uso do *software ImageJ*. Nesta condição, as imagens contêm apenas pixels completamente brancos ou completamente pretos. A fração volumétrica  $\phi_m$  foi determinada a partir das imagens com base nos pixels pretos, já que correspondem às partículas. Esta metodologia é exemplificada a partir da Tabela 8, que apresenta as imagens obtidas com a câmera, sem tratamento, e as imagens binarizadas através do *software ImageJ*.

Tabela 8 – Exemplo da conversão das imagens coletadas em imagens binárias.

Instante de Tempo (s)	0	5	10	15	30	60	120	180	240	300
Imagem sem tratamento										
Imagem Binária										
$\phi_{im}$	0,2360	0,9950	0,9994	0,9959	0,7310	0,5180	0,1310	0,1327	0,1527	0,1107



A partir das imagens apresentadas na Tabela 8, é possível notar que a metodologia desenvolvida está sujeita a distorções presentes nas imagens, originadas por falhas na iluminação, por elementos da bancada e sombras. Apesar disso, é possível traçar comportamentos e tendências de forma fiel ao que ocorre ao longo dos testes. Ainda, destaca-se que a taxa de aquisição das imagens avaliadas é refinada até 60s. Esta decisão foi tomada já que a porção mais relevante da remoção das partículas sólidas acontece antes desse instante de tempo. Os resultados desta análise são expressos ao longo da seção em forma gráfica, exibindo o percentual de pixels pretos em função do tempo.

### 5.3.1 Circulação Direta

A influência da vazão, para a circulação direta, foi avaliada utilizando o método de visualização e a análise a partir da contagem de pixels é apresentada na Figura 23. Para que a condição fosse avaliada, a altura da contração foi fixada em  $h = 100$  mm.

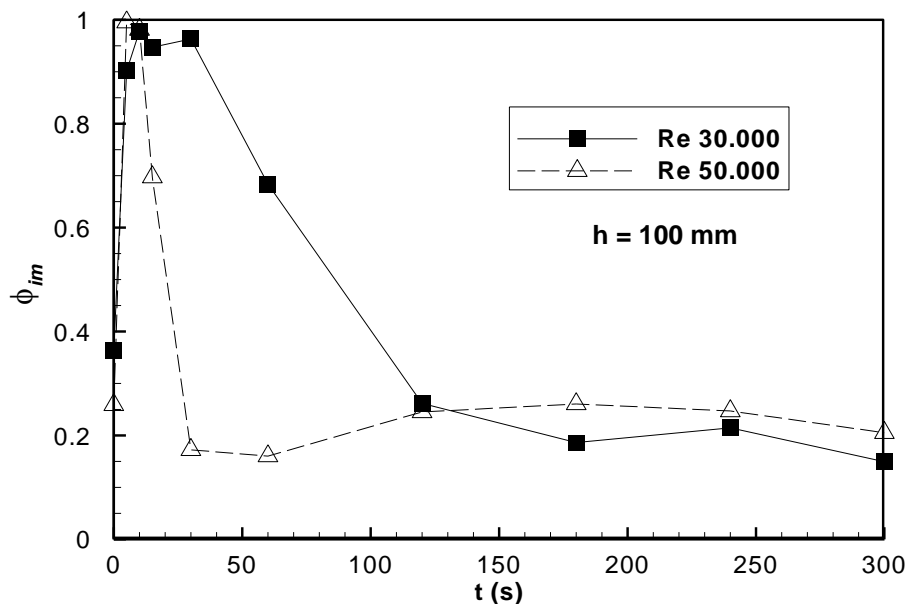


Figura 23 – Avaliação da remoção de partículas sólidas em função do tempo, a partir de técnica de visualização, para a circulação direta com  $\beta = 2,7$  e  $h = 100$  mm – Influência da vazão.

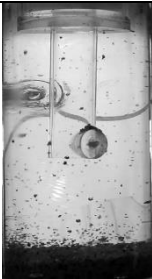
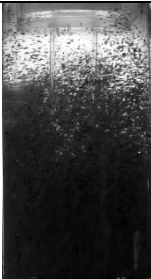








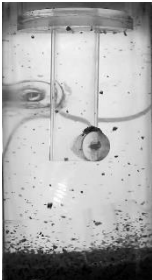

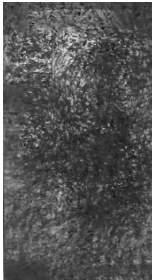
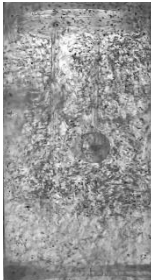

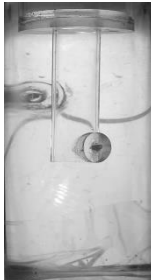
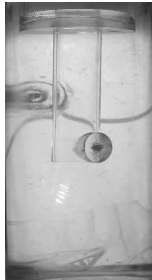

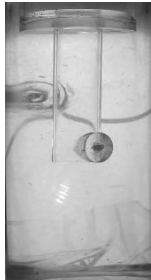
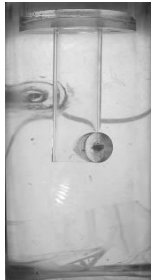
É possível observar, na Figura 23, uma elevação nos valores de fração volumétrica para os primeiros instantes de tempo. Isto ocorre, pois o leito de

partículas está sedimentado e com o passar do tempo, todas as partículas são suspensas. Conforme isso acontece, a janela de visualização vai sendo preenchida e, conseqüentemente, o valor da fração volumétrica se eleva consideravelmente, o que pode ser notado a partir dos picos apresentados na Figura 23. Por fim, há um decaimento no valor de  $\phi_{im}$ , até que se atinja um valor aproximadamente constante. Isto se dá pois as partículas vão sendo retiradas da região da contração, reduzindo o número de pixels correspondentes, até que se atinja um valor mínimo. Este valor mínimo não é nulo devido à presença de partículas residentes na janela de visualização, elementos da bancada e distorções presentes nas imagens. A presença destas distorções justifica as oscilações verificadas a partir de  $t = 120$  s para  $Re = 30.000$ .

A partir da Figura 23, nota-se que elevar a vazão do fluido, possibilita que mais partículas sejam removidas, conforme discutido na Seção 5.2, assim como viabiliza que isto ocorra de forma mais rápida. É possível notar, que tanto a suspensão das partículas, representada pelo pico no gráfico, quanto a sua retirada, representada pelo decaimento da curva, ocorrem em um menor tempo para  $Re=50.000$  do que para  $Re=30.000$ . Isto ocorre pois a velocidade do fluido quando  $Re=50.000$  é maior do que quando  $Re=30.000$ . Isso gera escoamentos cruzados, conforme apresentado na revisão da literatura, com maior quantidade de movimento. Desta forma, o fluido é capaz de suspender as partículas, removendo-as do leito de forma mais eficiente. A maior velocidade do fluido gera, também, maiores forças de arrasto conforme discutido na Seção 5.2.

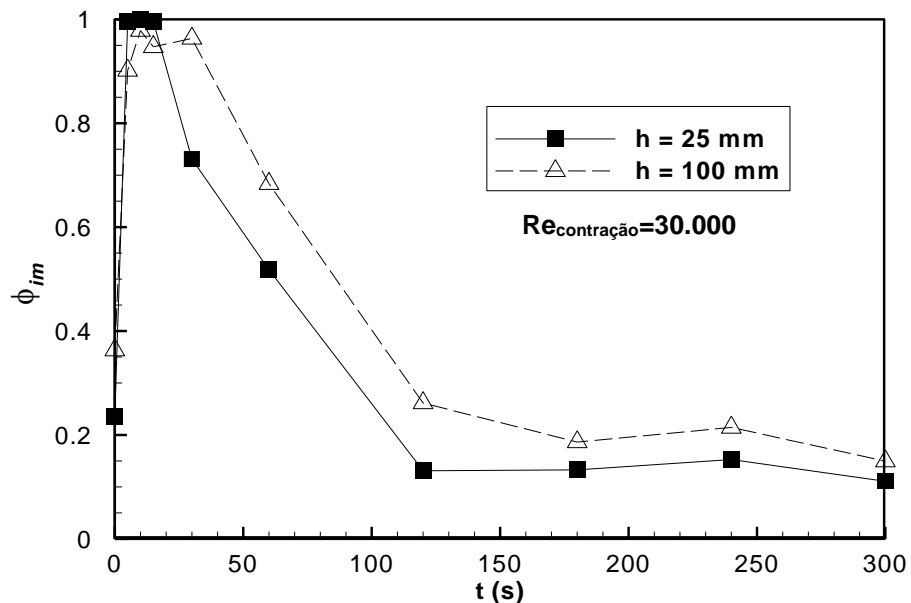
As imagens, sem tratamento, correspondentes à Figura 23 são apresentadas na Tabela 9.

**Tabela 9 – Imagens obtidas para teste conduzido em circulação direta utilizando  $h = 100$  mm  
Influência da Vazão**

<b>Instante de Tempo (s)</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>30</b>	<b>60</b>	<b>120</b>	<b>180</b>	<b>240</b>	<b>300</b>
<b>Re=30.000</b>										
<b>Re=50.000</b>										

A partir das imagens apresentadas na Tabela 9, nota-se que a suspensão das partículas ocorre mais rápido para  $Re=50.000$ . Nos últimos instantes de tempo, quando  $Re = 30.000$ , ainda existem partículas aprisionadas na região próxima à contração. Esta condição está de acordo com a hipótese de que a velocidade crítica não foi atingida na região anular, levantada na Seção 5.2. Uma vez que a velocidade crítica não foi atingida, as partículas aprisionadas no anular retornam para a região da contração fazendo com que a concentração de partículas seja aproximadamente constante desde  $t = 120$  s até  $t = 300$ s.

A influência da altura da contração até o fundo da bancada também foi avaliada para a circulação direta, e é apresentada na Figura 24. Para isto, foi fixado  $Re = 30.000$ .



**Figura 24– Avaliação da remoção de partículas sólidas em função do tempo, a partir de técnica de visualização, para a circulação direta com  $\beta = 2,7$  e  $Re = 30.000$  – Influência da altura da contração.**

A mesma tendência para o comportamento na remoção de partículas observada anteriormente é verificada na Figura 24. Nota-se, ainda, que apesar de na Figura 22 a altura do jato não exercer influência sobre a remoção de partículas sólidas, reduzir a distância da contração ao fundo da bancada permite que as partículas sejam retiradas de forma mais rápida da janela de visualização. Esta condição corrobora a hipótese levantada de que a velocidade crítica no anular não

foi atingida satisfatoriamente. Uma vez que as partículas foram removidas da janela de visualização, mas não foram retiradas da bancada, assume-se que estejam aprisionadas na região anular.

A avaliação das imagens obtidas para avaliar a influência da distância da contração ao fundo da bancada na fração volumétrica, Tabela 10, permite as mesmas conclusões verificadas no gráfico gerado a partir da contagem dos pixels: a redução na distância da contração ao fundo da bancada permite que o leito seja suspenso de forma mais rápida e as partículas sejam retiradas da janela de visualização em um intervalo de tempo menor.

### **5.3.2 Circulação Reversa**

A influência da vazão para a circulação reversa foi avaliada fixando a altura da contração em  $h = 100$  mm. As imagens correspondentes são apresentadas na Tabela 11.

A análise das imagens apresentadas na Tabela 11 permite concluir, apesar das distorções ocasionadas pelas bolhas, que nas vazões mais baixas o fluido não atinge o leito posicionado no fundo da bancada com velocidade suficiente para carrear as partículas sólidas. Tal conclusão é sustentada pelo fato de o leito presente em  $t = 0$  s e em  $t = 300$  s estar intacto para  $Re = 30.000$ , enquanto que para  $Re = 50.000$  é possível notar alterações no formato do leito. Esta condição é ilustrada na Figura 25.

**Tabela 10 – Imagens obtidas para teste conduzido em circulação direta utilizando  $Re = 30.000$   
Influência da Altura da Contração.**





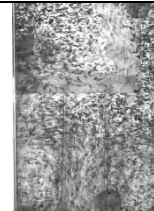


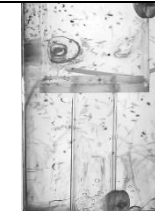
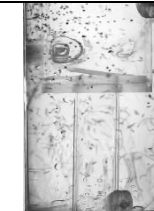




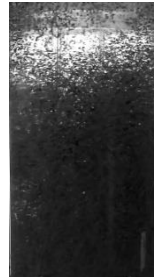




















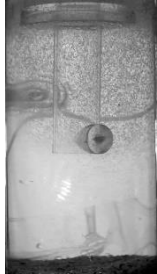





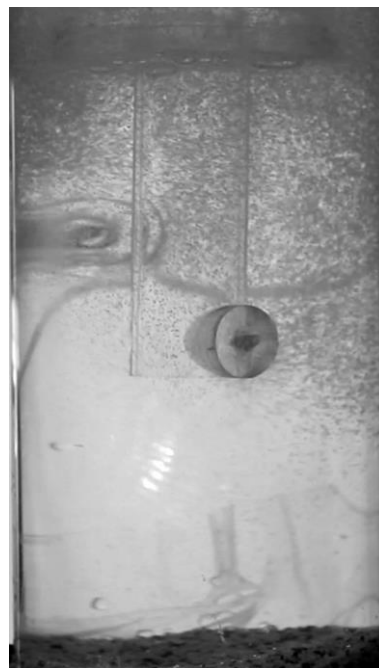
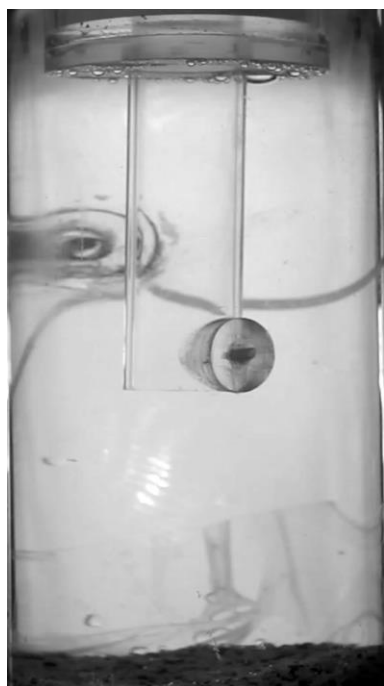
Instante de Tempo (s)	0	5	10	15	30	60	120	180	240	300
<b>h=25 mm</b>										
<b>h=100 mm</b>										

Tabela 11 – Imagens obtidas para teste conduzido em circulação reversa utilizando  $h = 100$  mm  
Influência da Vazão

Instante de Tempo (s)	0	5	10	15	30	60	120	180	240	300
$h=25$ mm										
$h=100$ mm										

(a)  $Re = 30.000 - h = 100\text{mm} - t = 0\text{ s}$ (b)  $Re = 30.000 - h = 100\text{mm} - t = 300\text{s}$ (c)  $Re = 50.000 - h = 100\text{ mm} - t = 0\text{ s}$ (d)  $Re = 50.000 - h = 100\text{ mm} - t = 300\text{s}$ 

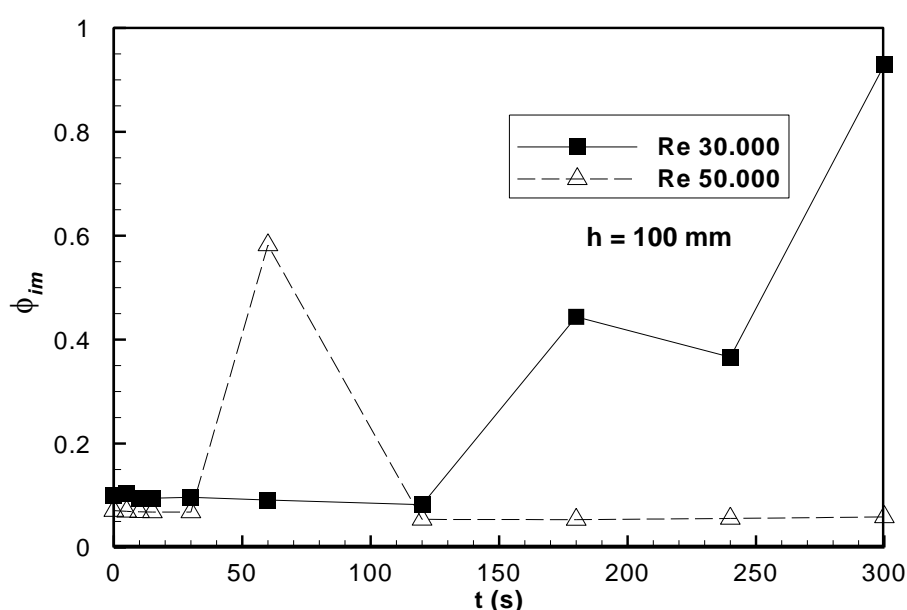
**Figura 25 – Ampliação das imagens obtidas utilizando (a)  $Re=30.000$  em  $t = 0\text{s}$ , (b)  $Re = 30.000$  em  $t = 300\text{s}$ , (c)  $Re = 50.000$  em  $t = 0\text{s}$  e (d)  $Re = 50.000$  em  $t = 300\text{s}$ .**

A Figura 25 apresenta a ampliação imagens obtidas nos instantes  $t = 0\text{ s}$  e  $t = 300\text{ s}$ , disponibilizadas na Tabela 11. Desta forma, é possível visualizar o leito posicionado no fundo da bancada. Nota-se que para  $Re = 30.000$ , o leito se encontra



nas mesmas condições entre  $t = 0s$ , Figura 25 (a) e  $t = 300s$ , Figura 25 (b). Quando  $Re = 50.000$ , por outro lado, o leito aparenta ter sido movimentado pelo fluido, já que na Figura 25 (d) o leito se encontra levemente deslocado para a direita, quando comparado à Figura 25 (c). Desta forma, assume-se que para  $Re=30.000$  o fluido não atinge o leito de sólidos com velocidade suficiente para movimentar as partículas, enquanto para  $Re=50.000$  o fluido consegue movimentar, mesmo que pouco, as partículas estagnadas.

A avaliação através da contagem de pixels foi realizada para a circulação reversa e é apresentada na Figura 26.



**Figura 26 – Avaliação da remoção de partículas sólidas em função do tempo, a partir de técnica de visualização, para a circulação reversa com  $\beta = 2,7$  e  $h = 100$  mm – Influência da vazão.**

A partir da Figura 26, nota-se que a avaliação da remoção de sólidos para a circulação reversa, através da técnica de contagem dos pixels, não se mostrou representativa. Como analisado na Figura 21, a quantidade de partículas retiradas através da circulação reversa, com a contração posicionada a 100 mm do fundo da bancada, é muito baixa e não pode ser verificada a partir da metodologia utilizada. Ainda, a presença de bolhas no escoamento gera distorções e imprecisões na aplicação da técnica. Estas distorções são notadas pelas elevações súbitas na







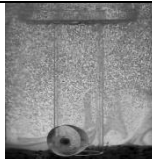
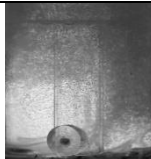
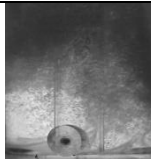








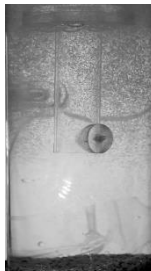
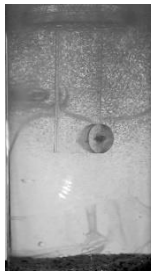
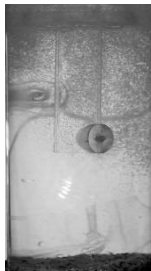
fração volumétrica, apresentadas na Figura 26, a partir de  $t = 120$  s para  $Re = 30.000$  e em  $t = 60$  s para  $Re = 50.000$ .

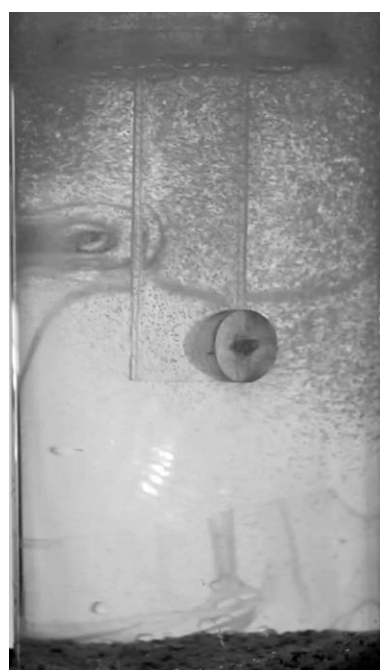
A influência da altura da contração foi avaliada, em circulação reversa, com  $Re = 30.000$ . As imagens obtidas são apresentadas na Tabela 12. A partir da análise das imagens exibidas na Tabela 12, é possível notar que ao reduzir a distância da contração até o fundo da bancada, a capacidade de remoção de partículas se intensifica significativamente. Ao observar as imagens referentes a  $t = 0$  s e  $t = 300$  s, apresentadas na Tabela 12, foi possível notar uma remoção completa do leito quando  $h = 25$  mm, enquanto para  $h = 100$  mm o leito se mantém intacto. Estas imagens são ampliadas e apresentadas na Figura 27.

A Figura 27 apresenta a ampliação das imagens apresentadas na Tabela 12 para  $t = 0$  s e  $t = 300$  s. É possível notar que, para  $h=25$ mm, o leito presente em  $t=0$ s, Figura 27 (a) foi completamente removido em  $t=300$ s, Figura 27 (b). Por outro lado, quando a contração se encontra em  $h=100$ mm, não há alterações aparentes do leito em  $t=0$ s, Figura 27 (c), para o leito em  $t=300$ s, Figura 27 (d). Isto ocorre, pois, ao aproximar a contração do fundo da bancada, o fluido é forçado a passar pelas partículas, transportando-as para o interior da contração.

A partir da Tabela 12 nota-se, ainda, que durante o processo de remoção de partículas do leito na circulação reversa não há a recirculação dos sólidos na região da contração. Esta condição é relevante, pois significa que os cascalhos não estão sendo retrabalhados na região da contração. Em uma operação real de perfuração, a consequência disso seria a redução do desgaste dos cortadores da broca devido à recirculação de partículas. Assim, é possível que a vida útil do equipamento seja estendida e os detritos cheguem à superfície com maiores diâmetros, facilitando a avaliação geológica da formação rochosa quando se usa a circulação reversa.

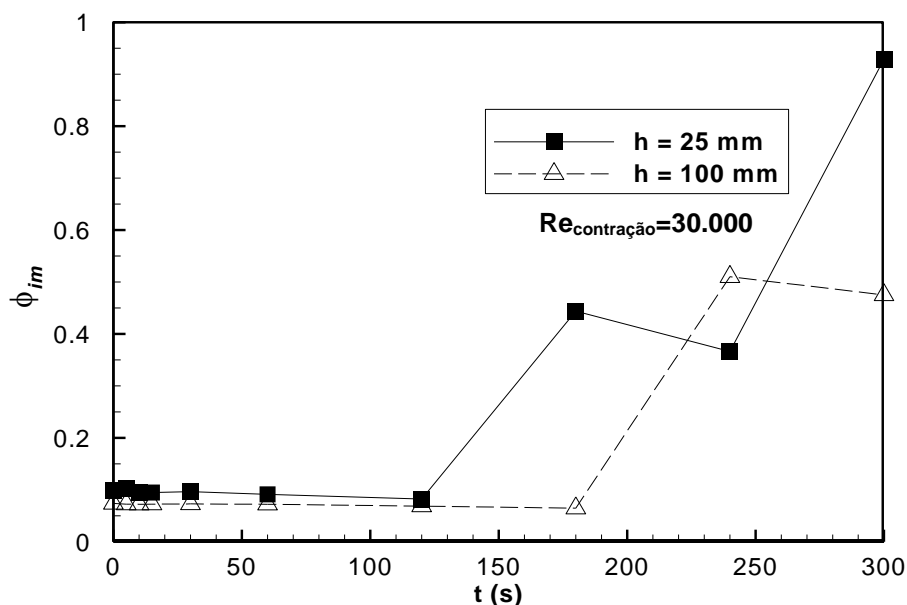
Tabela 12 – Imagens obtidas para teste conduzido em circulação reversa utilizando  $Re = 30.000$  – Análise da influência da altura da contração.

Instante de Tempo (s)	0	5	10	15	30	60	120	180	240	300
<b>h=25 mm</b>										
<b>h=100 mm</b>										

(a)  $Re = 30.000 - h = 25 \text{ mm} - t = 0 \text{ s}$ (b)  $Re = 30.000 - h = 25 \text{ mm} - t = 300 \text{ s}$ (c)  $Re = 30.000 - h = 100 \text{ mm} - t = 0 \text{ s}$ (d)  $Re = 30.000 - h = 100 \text{ mm} - t = 300 \text{ s}$ 

**Figura 27 – Ampliação das imagens obtidas utilizando (a)  $h = 25 \text{ mm}$  em  $t = 0 \text{ s}$ , (b)  $h = 25 \text{ mm}$  em  $t = 300 \text{ s}$ , (c)  $h = 100 \text{ mm}$  em  $t = 0 \text{ s}$  e (d)  $h = 100 \text{ mm}$  em  $t = 300 \text{ s}$ .**

A partir das imagens binárias correspondentes às apresentadas na Tabela 12, foi levantado o gráfico gerado a partir da contagem de pixels na janela de visualização, conforme apresentado na Figura 28.



**Figura 28 – Avaliação da remoção de partículas sólidas em função do tempo, a partir de técnica de visualização, para a circulação reversa com  $\beta = 2,7$  e  $Re = 30.000$  – Influência da altura da contração.**

Da mesma forma que os casos avaliados na Figura 26, a contagem de pixels apresentada na Figura 28 não se mostrou uma técnica representativa para a avaliação do transporte das partículas na circulação reversa. As elevações repentinas no valor da fração volumétrica, apresentados na Figura 28, são referentes à presença de bolhas no escoamento, conforme as imagens apresentadas na Tabela 12.

Para a circulação direta, o leito é suspenso de forma rápida devido à presença dos escoamentos cruzados gerados pelo jato. Tal padrão de escoamento gera tensões de cisalhamento que possibilitam até mesmo a suspensão das partículas presentes nas camadas inferiores do leito. Há, no entanto, uma quantidade significativa de recirculações na região da contração, que mantém as partículas na região abaixo do jato. A maior limitação desta técnica está na baixa velocidade do fluido na região anular, o que dificulta o transporte das partículas para fora da tubulação. Apesar de não ser possível avaliar pelas imagens obtidas, ao longo dos testes foi possível notar o acúmulo das partículas na região anular. Essa condição pode ser explicada por não ter sido atingida a velocidade mínima de transporte das partículas na região.

A retirada do leito através da circulação reversa, por outro lado, é caracterizada por altas velocidades do fluido no interior da coluna, o que possibilita que o transporte dos sólidos para fora da tubulação seja realizado de forma mais eficiente. Por outro lado, a baixa velocidade do fluido proveniente do anular dificulta a suspensão das partículas presentes no leito. Ao diminuir a distância da contração ao fundo do poço, obriga-se o fluido a passar através do leito com quantidade de movimento suficiente para carrear as partículas para dentro da contração, onde serão aceleradas e transportadas para fora do circuito.

#### **5.4 Síntese do Capítulo**

No Capítulo 5 foram apresentados os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento do trabalho, sendo subdivididos entre força média, eficiência de limpeza e visualização. Os resultados de força média foram comparados com a literatura e se mostraram próximos aos valores adotados como referência. Notou-se que para ambas as técnicas de bombeio do fluido, uma elevação no número de Reynolds ocasiona um aumento na pressão medida. Para a circulação direta, no entanto, só é possível perceber a parcela dinâmica da pressão nos pontos centrais. Essa condição está de acordo com a fluidodinâmica de jatos descrita por Santos (2014), Figueiredo (2014), e Sutko e Myers (1971).

Com relação à eficiência de limpeza, constatou-se que elevar a vazão do fluido aumenta o transporte de sólidos. Nos testes com  $h=100\text{mm}$ , a circulação reversa se mostrou menos eficaz na remoção das partículas sólidas do leito estagnado, pois o fluido não atinge o leito com velocidade suficiente para transportar as partículas estáticas. Nestas condições, a presença do jato é benéfica para o transporte dos sólidos devido à presença da zona de escoamento radial, ou escoamentos cruzados, conforme discutido por Mcisan (1964), Warren e Winters (1984) e Wells e Pessier (1993). No entanto, ao aproximar a contração do fundo do poço,  $h=25\text{mm}$ , a circulação reversa se mostrou mais eficaz no transporte das partículas, pois o fluido é forçado a passar pelo leito, transportando-as para o interior da contração.

Através dos testes de visualização, foi possível concluir que a baixa velocidade do fluido no anular é o fator limitante na remoção das partículas para a circulação

direta. Os testes de visualização permitiram, ainda, notar que a remoção das partículas da janela de visualização ocorre de forma mais rápida quando a vazão é elevada e quando o jato é aproximado do fundo da bancada.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foram analisadas as técnicas de bombeio de fluido: circulação direta e reversa. A força média e eficiência de limpeza foram estabelecidas como parâmetros de comparação. A partir da revisão da literatura, foi definida a relevância de estudar a influência da vazão do fluido e da altura da contração ao fundo da bancada.

Para a força média, notou-se que a vazão exerce uma influência mais significativa para a circulação reversa do que para a circulação direta. Isto é explicado, pois a perda de carga ocasionada nos contornos abruptos da contração ocorre antes da colisão do fluido com o fundo do poço na circulação direta. Desta forma, a força é parcialmente amortecida. Através da aproximação da contração ao fundo da bancada, foi possível observar um aumento na força média tanto para a circulação direta, quanto para a reversa.

Os perfis de pressão no fundo do poço gerados pela circulação direta apresentam picos nos pontos posicionados próximos ao centro da tubulação. O ponto mais distante radialmente tende a se manter constante, independentemente da altura do jato ou vazão de bombeamento do fluido. Para a circulação reversa, por outro lado, o perfil de pressões radial se mostrou uniforme. Desta forma, a influência da vazão e altura do jato nas medidas de pressão foi notada em todos os pontos de tomada de pressão e não somente nos centrais.

Através da avaliação da eficiência de limpeza e da visualização do escoamento, conclui-se que a circulação reversa é pouco eficaz na remoção de sólidos do leito de partículas, com a contração distante do fundo do poço. Por outro lado, a aproximação da contração ao fundo do poço possibilitou que grande parte do leito fosse removido, já que o fluido é forçado através do leito, carregando as partículas para o interior da contração. Assim, é possível concluir que a circulação reversa pode se equiparar à direta, dependendo da altura da contração e da vazão com que o fluido é bombeado.

Na região da contração, é possível observar que para a circulação convencional tanto a variação da altura da contração quanto do número de Reynolds



alteram o tempo com que as partículas são removidas da janela de visualização. Ao aproximar a contração do fundo da bancada as partículas são removidas de forma mais rápida, pois nesta condição o fluido atinge o fundo da bancada com maior velocidade. Da mesma forma, elevar a vazão de bombeamento possibilita que o fluido atinja a porção inferior da bancada com maior velocidade, permitindo a remoção do leito. Quanto à circulação reversa, a avaliação da fração volumétrica, determinada a partir da contagem de pixels, não se mostrou eficaz devido às distorções presentes nas imagens.

Por fim, conclui-se que cada uma das técnicas de bombeio apresenta particularidades, quanto às características fluidodinâmicas, que influenciam no transporte de sólidos. Desta forma, a escolha da técnica a ser empregada estará sujeita às condições de perfuração em cada poço ou etapa da perfuração.

## **6.1 Sugestões Para Trabalhos Futuros**

- Avaliar os efeitos da variação da massa inicial no leito;
- Aplicação da técnica PIV na janela de visualização, para que sejam levantados campos de velocidade na região;
- Comparação do efeito da viscosidade do fluido no transporte de sólidos;
- Uso de fluido não-newtoniano;
- Aplicação de rotação na coluna.

## REFERÊNCIAS

ANP – Agência Nacional de Petróleo. **Investimentos em PD&I**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/pesquisa-desenvolvimento-e-inovacao/investimentos-em-p-d-i>>. Acesso em: 27 jun. 2017.

API - **API: US oil, gas industry invested \$153 billion in drilling in 2012**. Disponível em: <<http://www.processingmagazine.com/processing-e-news/oil-gas-industry-update/api-us-oil-gas-industry-invested-153-billion-in-drilling-in-2012/>>. Acesso em 15 out. 2016.

API - AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API RP 13B-2 - Recommended practice for field-testing oil-based drilling fluids**. 2005.

BACELAR JUNIOR, F. L. **Simulação Numérica da Circulação Direta e Reversa em Broca PDC Na Perfuração De Poços De Petróleo**. Trabalho de Conclusão de Curso: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

BALMFORTH, N. J.; FRIGAARD, I. A.; OVARLEZ, G. **Yielding to Stress: Recent Developments in Viscoplastic Fluid Mechanics**. Annual Review of Fluid Mechanics, v. 46, n. 1, p. 121–146, 2014.

BARBOSA, M. V. **Análise paramétrica de escoamento particulado aplicado ao preenchimento de fraturas**. Dissertação de Mestrado: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

BELAVADI, M. N.; CHUKWU, G. A. **Experimental Study of the Parameters Affecting Cutting Transportation in a Vertical wellbore Annulus**. SPE International, 1994.

BHAGAT, R. K.; WILSON, D. I. **Flow in the thin film created by a coherent turbulent water jet impinging on a vertical wall**. Chemical Engineering Science, v. 152, p. 606–623, 2016. Elsevier.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Fenômenos de Transporte**. 2nd ed. 2006.

BISSON, P.; CHUOX, J. C.; POVO, A. **Hydraulic Optimization of PDC Bits by Visualization Methods**. SPE 18370 - SPE European Conference, p. 11, 1988.

BONN, D.; PAREDES, J.; DENN, M. M.; et al. **Yield Stress Materials in Soft Condensed Matter**. University of Amsterdam, v. 1502.05281, p. 2015.

BOURGOYNE, A. T.; MILHEIM, K. K.; CHENEVERT, M. E.; YOUNG JR., F. S. **Applied Drilling Engineering**. 2nd ed. Society of Petroleum Engineers, 1991.

CANELAS, A. **Investimentos em Exploração e Produção Após a Abertura da Indústria Petrolífera no Brasil: Impactos Econômicos**, Trabalho de Conclusão de Curso: Universidade Federal do Rio de Janeiro 2004.

CHHABRA, R. P.; RICHARDSON, J. F. **Non-Newtonian flow in the process industries: fundamentals and engineering applications**. 1st ed. 1999.

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.

DAVIDSON, P. A. **Turbulence, An Introduction For Scientists and Engineering**. 1<sup>o</sup>ed. Oxford University Press, 2015.

DESHPANDE, A.; KRISHNAN, J. M.; KUMAR, P. B. **Rheology of Complex Fluids**. New York: Springer, 2010.

FERNANDES, R. R.; ANDRADE, D. E. V; FRANCO, A. T.; NEGRÃO, C. O. R. **Correlation between the gel-liquid transition stress and the storage modulus of an oil-based drilling fluid**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 231, p. 6–10, 2016.

FIGUEIREDO, L. M. D. E. **Investigação numérica da força de impacto e do coeficiente de descarga em bocais ejetores de brocas de perfuração**. Trabalho de Conclusão de Curso: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

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

GRANT, A. **an Introduction To Reverse Circulation Drilling**. Talking Technically, v. 6, 2014.

HALLIDAY, R. **Gravitação , Ondas e Termodinâmica Jearl Walker**. 9th ed. LTC, 2012.

HOPKIN, E. A. **Factors Affecting Cuttings Removal During Rotary Drilling.** Journal of Petroleum Technology, v. 19, n. 6, 1967.

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

KUMAR, P. S.; KOULI, P.; GISBERGEN, S. VAN; SHIDI, S.; OMAN, P. D. **Coiled - Tubing Reverse Circulation - An Efficient Method of Cleaning Horizontal Wells in a Mature , Pressure - Depleted Field.** SPE International, 2005.

LARSEN, T. I.; PILEHVARI, A. A.; AZAR, J. J. **Development of a New Cuttings-Transport Model for High-Angle Wellbores Including Horizontal Wells.** SPE Drilling & Completion, v. 12, n. June, p. 129–135, 1997.

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.

LINGEN, N. H. VAN. **Bottom Scavenging-A Major Factor Governing Penetration Rates at Depth.** Journal of Petroleum Technology, 1962.

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.

MACOSKO, C. **Rheology: Principles, Measurements and Applications.** 1996.

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, p. 1–10, 1996.

MCISAN, H. **Crossflow and Impact Under Jet Bits.** Journal of Petroleum Technology, v. 16, n. 11, 1964.

MORRISON, F. A. **Understanding R Heology.** 2001.

NAZARI, T.; HARELAND, G.; AZAR, J. J. **Review of Cuttings Transport in Directional Well Drilling**. SPE International, SPE 132372, 2010.

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

OLIVEIRA, G. M. DE. **Modelagem da propagação de pressão no reinício do escoamento de fluidos de perfuração não gelificados**. Dissertação de Mestrado: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2011.

PEKER, S. M.; HELVACI, S. S. **Solid-Liquid Two Phase Flow**. 2011.

POPE, S. B. **Turbulent Flows**. Journal of Turbulence, v. 1, p. 771, 2000.

REGALLA, S. DE A. P. **Correlação Entre Tipos De Brocas, Taxas De Penetração E Formações Rochosas**. Trabalho de Conclusão de Curso: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

SÁNCHEZ, F. M. P. **Estudo Experimental Do Escoamento De Fluido Newtoniano em Contração Abrupta Axissimétrica com a Técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas**. Dissertação de Mestrado: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2011.

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, 2013.

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, T. R.; MYERS, G. M.; HADEN, E. L.; WAHL, H. A. **Drill Cutting Transport in Full Scale Vertical Annuli**. SPE 4514, 1973.

SUTKO, A. A.; MYERS, G. M. The Effect of Nozzle Size, Number, and Extension on the Pressure Distribution Under a Tricone Bit. **Journal of Petroleum Technology**, v. 23, 1971.

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

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

WARREN, T. M.; WINTERS, W. J. The Effect of Nozzle Diameter on Jet Impact for a Tricone Bit. **Society of Petroleum Engineers Journal**, v. 24, n. 01, p. 9–18, 1984.

WELLS, M. R.; PESSIER, R. C. **The Effects of Asymmetric Nozzle Sizing on the Performance of Roller Cone Bits**. SPE/IADC Drilling Conference, p. 593–603, 1993.

WHITE, F. **Fluid Mechanics**. McGraw-Hill, New York, 2010.

ZHANG, J.; LIU, Y.; QI, G.; JIAO, W.; YUAN, Z. **Flow characteristics in free impinging jet reactor by particle image velocimetry (PIV) investigation**. Fluid Dynamics Research, v. 48, 2016.

WPC – World Petroleum Council 2014. **Setor de Petróleo Chega a 13% do PIB Brasileiro**. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2014/06/setor-de-petroleo-e-gas-chega-a-13-do-pib-brasileiro>>. Acesso em: 25 jun. 2017.

MEWIS, J.; WAGNER, N. J. Thixotropy. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 147–148, p. 214–227, 2009.

## APÊNDICE A – AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS EXPERIMENTAIS

### A.1 Determinação das Incertezas

Qualquer grandeza obtida experimentalmente através do uso de ferramentas de medição ou sensores apresenta incertezas relacionadas aos níveis de precisão de cada instrumento (SÁNCHEZ, 2011). O estudo de incertezas experimentais é essencial para indicar possíveis fontes de erro ou mesmo estimar a precisão e validade dos dados obtidos (FOX et al., 2009).

Incetezas experimentais são oriundas de erros sistemáticos e aleatórios. Os erros sistemáticos ocorrem quando há desvios das médias em relação ao valor padrão, ou real. Seu ajuste pode ser realizado através da calibração do equipamento ou correção dos dados. Por outro lado, os erros aleatórios são dispersos e diferentes para cada medida realizada. A natureza aleatória destes erros faz com que não seja possível corrigi-los. Assim, estimam-se suas incertezas estatisticamente (WHITE, 2010). Para a determinação das incertezas, a norma ISO GUM (2008) as separa entre incertezas do Tipo A e do Tipo B.

### A.2 Avaliação das Incertezas do Tipo A

As incertezas do Tipo A são definidas pela norma ISO GUM (2008) como aquelas ocasionadas por dispersões nas medições. As incertezas do Tipo A ( $\delta_A$ ) são expressas por meio do desvio padrão amostral, calculado a partir da Equação (E.1).

$$\delta_A(x_j) = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2} \quad (\text{E.1})$$

Na Equação (E.1)  $n$  é o número de amostras,  $x_j$  é o valor de cada medida e  $\bar{x}$  é a média.

### A.3 Avaliação das Incertezas do Tipo B

A norma ISO GUM (2008) afirma que as incertezas do Tipo B podem ser avaliadas com base em especificações do fabricante ou certificados de calibração de cada equipamento utilizado.

No presente trabalho, as incertezas associadas aos equipamentos de medição são apresentadas na Tabela 13.

**Tabela 13 – Relação de equipamentos utilizados e suas incertezas associadas**

Equipamento	Incerteza Padrão
Transdutor de Pressão	±0,41%
Coriolis	±0,5%
Balança de Precisão	±0,1g

Para o *Coriolis* e transdutor de pressão, a incerteza padrão é fornecida por certificados de calibração. Ainda, o valor da incerteza padrão é definido como um percentual do fundo de escala dos equipamentos. Assim, há maior precisão ao avaliar dados cujos valores estejam em ordens de grandeza semelhantes à do fundo de escala do equipamento.

### A.4 Incertezas Combinadas

A Equação (E.2) apresenta uma expressão matemática utilizada para estimar o valor das incertezas aleatórias de um parâmetro qualquer medido ( $T$ ) que seja dependente de  $n$  variáveis, ou seja,  $T = T(x_1, x_2, \dots, x_n)$  (WHITE, 2010).

$$\delta T = \left[ \left( \frac{\partial T}{\partial x_1} \delta x_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial x_2} \delta x_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial T}{\partial x_n} \delta x_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{E.2})$$

Em que  $\delta x_n$  é a incerteza de cada uma das variáveis e  $\delta T$  é o erro combinado de cada uma das  $n$  variáveis para o parâmetro  $T$ .

Por fim, a determinação da incerteza combinada pode ser determinada a partir da Equação (E.3) (ISO GUM, 2008).

$$\delta = \sqrt{\delta_A + \delta_B} \quad (\text{E.3})$$



## APÊNDICE B – INCERTEZAS EXPERIMENTAIS NOS DADOS COLETADOS

Os dados experimentais apresentados no Capítulo 5 possuem incertezas associadas a eles. Os valores medidos para cada parâmetro, juntamente com suas incertezas, são apresentados nas seções subsequentes.

### B.1 Dados de pressão

Nas Tabelas de 14 a 31 são apresentadas as medidas de pressão coletadas para cada caso avaliado. Da mesma forma, são exibidas as incertezas associadas a cada medida.

**Tabela 14 - Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação direta, Re = 30.000 e h = 25 mm**

	$\bar{p}$ [Pa]	$\delta A$ [Pa]	$\delta B$ [Pa]	$\sqrt{\delta_A^2 + \delta_B^2}$ [Pa]
<b>P1</b>	20297,52	13,90399	255,02	255,39
<b>P2</b>	19795,19	26,56246	255,02	256,39
<b>P3</b>	19169,87	5,915915	255,02	255,08
<b>P4</b>	18956,75	8,830453	255,02	255,17

**Tabela 15 – Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação direta, Re = 30.000 e h = 50 mm**

	$\bar{p}$ [Pa]	$\delta A$ [Pa]	$\delta B$ [Pa]	$\sqrt{\delta_A^2 + \delta_B^2}$ [Pa]
<b>P1</b>	20230,5	15,04391	255,02	255,46
<b>P2</b>	19710,68	36,46691	255,02	257,61
<b>P3</b>	19183,48	14,90894	255,02	255,45
<b>P4</b>	18951,18	9,064657	255,02	255,18

**Tabela 16 – Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação direta, Re = 30.000 e h = 100 mm**

	$\bar{p}$ [Pa]	$\delta A$ [Pa]	$\delta B$ [Pa]	$\sqrt{\delta A^2 + \delta B^2}$ [Pa]
<b>P1</b>	19565,89	131,8257	255,02	287,07
<b>P2</b>	19139,12	100,4043	255,02	274,07
<b>P3</b>	19100,73	44,11761	255,02	258,81
<b>P4</b>	18964,09	11,83777	255,02	255,29

**Tabela 17 - Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação direta, Re = 40.000 e h = 25 mm**

	$\bar{p}$ [Pa]	$\delta A$ [Pa]	$\delta B$ [Pa]	$\sqrt{\delta A^2 + \delta B^2}$ [Pa]
<b>P1</b>	21349,65	24,08	255,02	256,15
<b>P2</b>	20524,62	34,41	255,02	257,33
<b>P3</b>	19396,95	7,67	255,02	255,14
<b>P4</b>	18984,94	15,25	255,02	255,48

**Tabela 18 - Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação direta, Re = 40.000 e h = 50 mm**

	$\bar{p}$ [Pa]	$\delta A$ [Pa]	$\delta B$ [Pa]	$\sqrt{\delta A^2 + \delta B^2}$ [Pa]
<b>P1</b>	21229,6	29,41	255,02	256,71
<b>P2</b>	20336,28	65,40	255,02	263,27
<b>P3</b>	19399,58	32,29	255,02	257,06
<b>P4</b>	18987,99	42,73	255,02	258,57

**Tabela 19 - Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação direta, Re = 40.000 e h = 100 mm**

	$\bar{p}$ [Pa]	$\delta A$ [Pa]	$\delta B$ [Pa]	$\sqrt{\delta A^2 + \delta B^2}$ [Pa]
<b>P1</b>	19979,29	223,08	255,02	338,82
<b>P2</b>	19214,39	157,54	255,02	299,76
<b>P3</b>	19235,85	69,27	255,02	264,26
<b>P4</b>	18997,98	20,18	255,02	255,82

**Tabela 20 - Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação direta, Re = 50.000 e h = 25 mm**

	$\bar{p}$ [Pa]	$\delta A$ [Pa]	$\delta B$ [Pa]	$\sqrt{\delta A^2 + \delta B^2}$ [Pa]
<b>P1</b>	22478,52	32,20	255,02	257,04
<b>P2</b>	21266,42	65,32	255,02	263,25
<b>P3</b>	19615,51	11,28	255,02	255,27
<b>P4</b>	18953,56	18,85	255,02	255,72

**Tabela 21 - Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação direta, Re = 50.000 e h = 50 mm**

	$\bar{p}$ [Pa]	$\delta A$ [Pa]	$\delta B$ [Pa]	$\sqrt{\delta A^2 + \delta B^2}$ [Pa]
<b>P1</b>	22308,35	43,40	255,02	258,69
<b>P2</b>	21017,19	84,24	255,02	268,57
<b>P3</b>	19621,34	27,69	255,02	256,52
<b>P4</b>	18935,50	18,64	255,02	255,70

**Tabela 22 - Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação direta, Re = 50.000 e h = 100 mm**

	$\bar{p}$ [Pa]	$\delta A$ [Pa]	$\delta B$ [Pa]	$\sqrt{\delta A^2 + \delta B^2}$ [Pa]
<b>P1</b>	20339,06	294,00	255,02	389,19
<b>P2</b>	19321,20	235,66	255,02	347,23
<b>P3</b>	19356,62	116,73	255,02	280,47
<b>P4</b>	18975,05	27,18	255,02	256,46

**Tabela 23 - Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação reversa, Re = 30.000 e h = 25 mm**

	$\bar{p}$ [Pa]	$\delta A$ [Pa]	$\delta B$ [Pa]	$\sqrt{\delta A^2 + \delta B^2}$ [Pa]
<b>P1</b>	11707,32	60,45	255,02	262,09
<b>P2</b>	11701,96	27,13	255,02	256,46
<b>P3</b>	11696,44	19,32	255,02	255,75
<b>P4</b>	11679,73	16,54	255,02	255,56

**Tabela 24 – Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação reversa, Re = 30.000 e h = 50 mm**

	$\bar{p}$ [Pa]	$\delta A$ [Pa]	$\delta B$ [Pa]	$\sqrt{\delta_A^2 + \delta_B^2}$ [Pa]
<b>P1</b>	10810,49	14,84	255,02	255,45
<b>P2</b>	10812,01	14,74	255,02	255,45
<b>P3</b>	10784,86	29,62	255,02	256,73
<b>P4</b>	10843,90	14,23	255,02	255,42

**Tabela 25 – Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação reversa, Re = 30.000 e h = 100 mm**

	$\bar{p}$ [Pa]	$\delta A$ [Pa]	$\delta B$ [Pa]	$\sqrt{\delta_A^2 + \delta_B^2}$ [Pa]
<b>P1</b>	10600,91	22,18	255,02	255,98
<b>P2</b>	10615,42	16,75	255,02	255,57
<b>P3</b>	10609,41	15,45	255,02	255,49
<b>P4</b>	10612,62	15,05	255,02	255,46

**Tabela 26 - Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação reversa, Re = 40.000 e h = 25 mm**

	$\bar{p}$ [Pa]	$\delta A$ [Pa]	$\delta B$ [Pa]	$\sqrt{\delta_A^2 + \delta_B^2}$ [Pa]
<b>P1</b>	15337,92	77,40	255,02	266,51
<b>P2</b>	15306,22	67,17	255,02	263,72
<b>P3</b>	15127,02	58,00	255,02	261,53
<b>P4</b>	14998,47	29,62	255,02	256,73

**Tabela 27 – Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação reversa, Re = 40.000 e h = 50 mm**

	$\bar{p}$ [Pa]	$\delta A$ [Pa]	$\delta B$ [Pa]	$\sqrt{\delta_A^2 + \delta_B^2}$ [Pa]
<b>P1</b>	15337,92	77,40	255,02	266,51
<b>P2</b>	15306,22	67,17	255,02	263,72
<b>P3</b>	15127,02	58,00	255,02	261,53
<b>P4</b>	14998,47	29,62	255,02	256,73

**Tabela 28 – Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação reversa, Re = 40.000 e h = 100 mm**

	$\bar{p}$ [Pa]	$\delta A$ [Pa]	$\delta B$ [Pa]	$\sqrt{\delta A^2 + \delta B^2}$ [Pa]
<b>P1</b>	14611,57	16,94	255,02	255,58
<b>P2</b>	14631,80	20,82	255,02	255,87
<b>P3</b>	14653,24	23,85	255,02	256,13
<b>P4</b>	14688,93	25,88	255,02	256,33

**Tabela 29 - Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação reversa, Re = 50.000 e h = 25 mm**

	$\bar{p}$ [Pa]	$\delta A$ [Pa]	$\delta B$ [Pa]	$\sqrt{\delta A^2 + \delta B^2}$ [Pa]
<b>P1</b>	20811,27	79,47	255,02	267,12
<b>P2</b>	20732,41	52,07	255,02	260,28
<b>P3</b>	20617,52	40,21	255,02	258,17
<b>P4</b>	20541,30	37,14	255,02	257,71

**Tabela 30 – Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação reversa, Re = 50.000 e h = 50 mm**

	$\bar{p}$ [Pa]	$\delta A$ [Pa]	$\delta B$ [Pa]	$\sqrt{\delta A^2 + \delta B^2}$ [Pa]
<b>P1</b>	19957,53	44,10	255,02	258,81
<b>P2</b>	20052,72	53,89	255,02	260,65
<b>P3</b>	20115,80	29,66	255,02	256,74
<b>P4</b>	20221,24	45,92	255,02	259,12

**Tabela 31 – Resultados de pressão e suas incertezas associadas utilizando a circulação reversa, Re = 50.000 e h = 100 mm**

	$\bar{p}$ [Pa]	$\delta A$ [Pa]	$\delta B$ [Pa]	$\sqrt{\delta A^2 + \delta B^2}$ [Pa]
<b>P1</b>	19681,30	41,33	255,02	258,35
<b>P2</b>	19616,48	29,07	255,02	256,67
<b>P3</b>	19564,32	28,71	255,02	256,63
<b>P4</b>	19530,03	27,62	255,02	256,51

## B.2 Dados de Eficiência de Limpeza

Nas Tabelas de 32 a 35 são apresentadas as medidas de pressão coletadas para cada caso avaliado. Da mesma forma, são exibidas as incertezas associadas a cada medida.

**Tabela 32 – Resultados de eficiência de limpeza e suas incertezas associadas utilizando a circulação direta e h = 100 mm**

Reynolds	$\bar{x}$ [g]	$\delta A$ [g]	$\delta B$ [g]	$\sqrt{\delta A^2 + \delta B^2}$ [g]
30.000	55,77	4,75	0,1	4,751
40.000	86,00	2,09	0,1	2,091
50.000	98,40	1,97	0,1	1,972

**Tabela 33 – Resultados de eficiência de limpeza e suas incertezas associadas utilizando a circulação direta e Re = 30.000**

h[mm]	$\bar{x}$ [g]	$\delta A$ [g]	$\delta B$ [g]	$\sqrt{\delta A^2 + \delta B^2}$ [g]
25	54,73	2,87	0,1	2,876
50	53,67	2,66	0,1	2,659
100	55,77	4,75	0,1	4,751

**Tabela 34 – Resultados de eficiência de limpeza e suas incertezas associadas utilizando a circulação reversa e h = 100 mm**

Reynolds	$\bar{x}$ [g]	$\delta A$ [g]	$\delta B$ [g]	$\sqrt{\delta A^2 + \delta B^2}$ [g]
30.000	-	-	0,1	-
40.000	1,55	0,30	0,1	0,32
50.000	11,20	0,87	0,1	0,88

**Tabela 35 – Resultados de eficiência de limpeza e suas incertezas associadas utilizando a circulação reversa e Re = 30.000**

h[mm]	$\bar{x}$ [g]	$\delta A$ [g]	$\delta B$ [g]	$\sqrt{\delta A^2 + \delta B^2}$ [g]
25	89,97	0,071598	0,1	7,161
50	19,60	0,038626	0,1	3,864
100	-	-	0,1	-