

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

CÁSSIO LUÍS SCHNEIDER

**ESTUDO EXPERIMENTAL DO PREENCHIMENTO DE FRATURAS
COM ESCOAMENTO PARTICULADO EM CANAL FRATURADO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2016

CÁSSIO LUÍS SCHNEIDER

**ESTUDO EXPERIMENTAL DO PREENCHIMENTO DE FRATURAS
COM ESCOAMENTO PARTICULADO EM CANAL FRATURADO**

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. Silvio L. M. Junqueira.

Co-Orientador: MSc. Fernando C. De Lai.

CURITIBA

2016

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "ESTUDO EXPERIMENTAL DO PREENCHIMENTO DE FRATURAS COM ESCOAMENTO PARTICULADO EM CANAL FRATURADO", realizado pelo aluno Cássio Luís Schneider, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Silvio L. M. Junqueira.

Damec, UTFPR

Orientador

Prof. Dr. Admilson T. Franco

Damec, UTFPR

Avaliador

Prof. M.Sc. Raul H. Erthal

Damec, UTFPR

Avaliador

Curitiba, 04 de Julho de 2016.

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso (ou Programa)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Celina e Clamundo, pelo amor, apoio e por me ensinarem que a educação é sempre o melhor caminho, não importa o quão árduo seja.

Aos colegas e amigos que estiveram presente nessa jornada, fazendo com que as dificuldades fossem vencidas de maneira muito mais agradável. Obrigado pelas infinitas risadas e momentos de descontração.

Ao professor Silvio Junqueira e ao pesquisador Fernando De Lai, pela oportunidade e confiança, e por me orientarem no desenvolvimento desse trabalho.

Aos professores membros da banca avaliadora Admilson Franco e Raul Erthal por todos os conselhos e críticas construtivas que contribuíram no desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná e todos os professores que passaram pelo meu caminho, me proporcionando um ensino de qualidade e uma formação honrosa.

Ao Centro de Pesquisas em Reologia e Fluidos Não Newtonianos por toda a estrutura fornecida para que a realização desse trabalho fosse possível.

À Petrobras, cujo suporte financeiro viabilizou a realização desse trabalho.

RESUMO

SCHNEIDER, Cássio Luís. Estudo Experimental do Preenchimento de Fraturas com Escoamento Particulado em Canal Fraturado, 2016. 125 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso Superior de Engenharia Mecânica. Curitiba, 2016.

A indústria de petróleo e gás está constantemente buscando o aperfeiçoamento de técnicas e processos visando manter a competitividade da operação em poços. No processo de perfuração a perda de circulação é um dos principais fenômenos que interferem na operação do poço. A presença de fraturas, frequentes no conjunto poço-formação, somadas aos gradientes de pressão, acentua significativamente a perda de fluido, de modo que se faz necessário um método de controle. Neste trabalho o processo de injeção de partículas sólidas num escoamento, com o objetivo de analisar o processo de preenchimento da fratura através da deposição de partículas é investigado de forma experimental. Os testes apresentados foram realizados em um aparato experimental composto por uma seção de testes retangular, que representa um poço fraturado, utilizando medidores de pressão, vazão e temperatura para monitorar o escoamento. Com o intuito de caracterizar o padrão de preenchimento da fratura, a influência da variação da espessura e da vazão de fuga de fluido pela fratura sobre a posição, a extensão e a altura do leito de partículas formado é investigada. Resultados mostram que ambos os parâmetros são capazes de modificar as características geométricas do leito, possuindo uma influência direta na fuga de fluido e no tempo de preenchimento.

Palavras-chave: Perda de circulação, Aparato experimental, Poço fraturado, Preenchimento, Escoamento particulado.

ABSTRACT

SCHNEIDER, Cássio Luís. Estudo Experimental do Preenchimento de Fraturas com Escoamento Particulado em Canal Fraturado, 2016. 125 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso Superior de Engenharia Mecânica. Curitiba, 2016.

The oil and gas industry is constantly seeking the improvement of techniques and processes to maintain the competitiveness of the wells operation. In the drilling process the lost circulation is one of the main phenomena that interfere with the well operation. The presence of fractures, common in all well-formation, added to the pressure gradient, significantly enhances fluid loss and a control method is required. In this work the process of injecting solid particles in a flow, in order to investigate the fracture filling process obtained through the particles deposition is investigated experimentally. The tests were performed on an experimental set-up, comprising a rectangular test section with a transverse fracture, instrumented with pressure gauges, flow and temperature monitors. In order to characterize the fracture filling pattern, the influence of variations of the thickness and the flow rate at the fracture end over the position, length and height of the formed bed of particles is investigated. Results show that both parameters present the same ability to modify the geometric characteristics of the bed, having a direct influence on the filling time and the fluid lost by the fracture.

Keywords: Lost circulation, Experimental set-up, Fractured well; Filling, Fluid-solid flow

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Representação da circulação do fluido de perfuração em operação de perfuração de petróleo.	20
Figura 1.2 - Fluido de perfuração invadindo a formação rochosa através das fraturas.	21
Figura 1.3 – Representação do conjunto poço-formação: (a) corte longitudinal e (b) corte transversal.....	23
Figura 1.4 - Idealização da geometria e escala do plano de fratura em relação ao poço vertical.	24
Figura 1.5 - Simplificação geométrica para o problema de perfuração.	24
Figura 1.6 - Preenchimento da fratura para três instantes de tempo.	25
Figura 2.1 - Faixa de operação e perfil do poço em função da ECD do fluido de perfuração.	39
Figura 2.2 - Representação das zonas de perda de circulação no conjunto poço-formação.	40
Figura 2.3 - Programa de gestão de perda de circulação.	43
Figura 3.1 - Unidade experimental: (a) esquema do circuito hidráulico e (b) Projeto tridimensional destacando os principais componentes.	48
Figura 3.2 - Esquema da unidade experimental com a indicação dos componentes.	49
Figura 3.3 – Tanque com misturador (a) Vista exterior; (b) Vista interior com as pás de mistura.	50
Figura 3.4 - Termopar tipo J.	50
Figura 3.5 - Bomba helicoidal NEMO NM 021BY.	51
Figura 3.6 - Medidor de vazão mássica Coriolis RHM -15.	52
Figura 3.7 – Transmissores de pressão relativa S11: (a) Conectado a seção de testes (b) Posicionamento na seção de testes.	53

Figura 3.8 - Visão geral do aparato experimental.....	54
Figura 3.9 - Representação da seção de testes: (a) corte transversal e (b) vista lateral.	56
Figura 3.10 - Vista em corte longitudinal da seção de testes.	56
Figura 3.11 - Bocal de entrada da seção de testes	57
Figura 3.12 – Tubos utilizados para representar a fratura com seus respectivos diâmetros internos.....	57
Figura 3.13 - Flange de conexão da fratura com o canal da seção de testes: (a) posição de montagem e (b) projeto tridimensional.....	58
Figura 3.14 - Visão geral da fratura com a válvula de controle de vazão de fluido. ..	58
Figura 3.15 – Representação do bocal de saída da seção de testes: (a) vista isométrica e (b) plano de corte.....	59
Figura 3.16 - Diagrama de blocos programado no LabVIEW.....	61
Figura 3.17 - Interface de trabalho, leitura e controle de dados.	62
Figura 3.18 - Curva de caracterização estática do medidor de vazão mássica coriolis.	64
Figura 3.19 - Curva de caracterização estática do transmissor de pressão manométrica I-3.	66
Figura 3.20 - Curva de caracterização estática do transmissor de pressão manométrica I-2.	67
Figura 3.21 – Abrasivo plástico utilizado como material particulado.	68
Figura 3.22 - Viscosímetro Brookfield LVDV-II+ Pro.	69
Figura 3.23 – Equipamentos utilizado nos testes reométricos: (a) Adaptador UL; (b) Banho termostático RTE-111.....	69
Figura 3.24 - Interface do software Rheocalc para controle do viscosímetro.....	70
Figura 4.1 - Variação da massa específica com o aumento da concentração mássica de glicerina em água.....	75

Figura 4.2 - Viscosidade dinâmica em função da concentração mássica de glicerina em água.....	76
Figura 4.3 - Variação da temperatura ao longo da realização de testes.	76
Figura 4.4 - Variação da viscosidade dinâmica em função da temperatura do fluido.	77
Figura 4.5 - Número de Reynolds em função da vazão mássica para as diferentes concentrações de água-glicerina.	78
Figura 4.6 - Gradiente de pressão no canal da seção de testes para as concentrações avaliadas.....	79
Figura 4.7 - Gradiente de pressão em função da concentração de glicerina em água para vazões mássicas de 3, 6 e 12 kg/min	79
Figura 4.8 - Influência da concentração de partículas sobre o gradiente de pressão para concentração de 73,1% de glicerina em água.	80
Figura 4.9 - Processo de formação do leito de partículas ao longo tempo para $C_p = 3\%$, $Re = 150$ e $Q_v = 0,75$	84
Figura 4.10 - Parâmetros geométricos do leito de partículas.	84
Figura 4.11 - Instantes finais para cada espessura de fratura utilizada no processo de preenchimento para $Q_v = 0,5$ e $Re = 150$	85
Figura 4.12 - Gradiente de pressão ao longo do tempo para $Re = 150$ e $Q_v = 0,5$	86
Figura 4.13 - Instantes finais para cada espessura de fratura utilizada no processo de preenchimento para $Q_v = 0,75$ e $Re = 300$	87
Figura 4.14 - Gradiente de pressão ao longo do tempo para $Re = 300$ e $Q_v = 0,75$..	87
Figura 4.15 - Instantes finais para cada vazão de fuga inicial utilizada no processo de preenchimento da fratura para $e_{FR} = 16$ mm e $Re = 150$	89
Figura 4.16 - Gradiente de pressão ao longo do tempo para $e_{FR} = 16$ mm e $Re = 150$	90
Figura 4.17 - Instantes finais para cada vazão de fuga inicial utilizada no processo de preenchimento da fratura para $e_{FR} = 20$ mm e $Re = 150$	91

Figura 4.18 - Gradiente de pressão ao longo do tempo para $e_{FR} = 20$ mm e $Re = 150$	92
Figura 4.19 - Instantes finais para cada número de Reynolds utilizado no processo de preenchimento da fratura para $e_{FR} = 20$ mm e $Q_V = 0,5$	93
Figura 4.20 - Instantes finais para cada número de Reynolds utilizado no processo de preenchimento da fratura para $e_{FR} = 20$ mm e $Q_V = 0,75$	94
Figura 4.21 - Gradiente de pressão ao longo do tempo para $e_{FR} = 20$ mm e $Q_V = 0,5$	95
Figura 4.22 - Instantes finais para cada número de Reynolds utilizado no processo de preenchimento da fratura para $e_{FR} = 26$ mm e $Q_V = 0,5$	96
Figura 4.23 – Gradiente de pressão ao longo do tempo para $e_{FR} = 26$ mm e $Q_V = 0,5$	97
Figura A.1 – Instantes finais do leito de partículas para $e_{FR} = 16$ mm.	106
Figura A.2 – Instantes finais do leito de partículas para $e_{FR} = 20$ mm.	107
Figura A.3 – Instantes finais do leito de partículas para $e_{FR} = 26$ mm.	108
Figura C.1 - Curva estática para um dado instrumento apresentando o conceito de linearidade.....	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação da perda de circulação de acordo com a severidade.	42
Tabela 2.2 - Classificação de materiais utilizados como LCM de acordo com a forma e características	45
Tabela 3.1 - Descrição dos itens do circuito experimental.	49
Tabela 3.2 - Características do tanque misturador.....	50
Tabela 3.3 - Características da bomba helicoidal.....	51
Tabela 3.4 - Características do medidor de vazão mássica Coriolis.	52
Tabela 3.5 - Características dos transmissores de pressão.....	53
Tabela 3.6 - Características dos módulos de aquisição de dados utilizados.	59
Tabela 3.7 - - Resultados obtidos na caracterização do medidor de vazão mássica coriolis.	63
Tabela 3.8 - Resultados obtidos na caracterização do transmissor de pressão manométrica I-3.	65
Tabela 3.9 - Resultados obtidos na caracterização do transmissor de pressão manométrica I-4.	66
Tabela 3.10 - Características das partículas utilizadas nos testes.	68
Tabela 3.11 – Sequência dos testes realizados com seus respectivos parâmetros..	73
Tabela 4.1 - Concentração de glicerina em água e massa específica da solução interpolados linearmente pela viscosidade dinâmica obtida.....	75
Tabela 4.2 - Dados de medições realizadas em viscosímetro com a solução água-glicerina.....	81
Tabela 4.3 - Concentração de glicerina em água e propriedades da solução utilizada nos testes experimentais.....	82
Tabela 4.4 – Parâmetros constantes para todos os testes experimentais.	82
Tabela 4.5 - Comprimentos de desenvolvimento em função do número de Reynolds do escoamento no interior do canal.	83

Tabela 4.6 - Parâmetros variados para os testes de formação do leito de partículas.	84
Tabela 4.7 - Parâmetros geométricos do leito de partículas para $Q_V = 0,5$ e $Re = 150$	85
Tabela 4.8 - Parâmetros geométricos do leito de partículas para $Q_V = 0,75$ e $Re = 300$	87
Tabela 4.9 - Parâmetros geométricos do leito de partículas para $e_{FR} = 16$ mm e $Re = 150$	89
Tabela 4.10 - Parâmetros geométricos do leito de partículas para $e_{FR} = 20$ [mm] e $Re = 150$	92
Tabela 4.11 - Parâmetros geométricos do leito de partículas para $e_{FR} = 20$ mm e $Q_V = 0,5$	93
Tabela 4.12 - Parâmetros geométricos do leito de partículas para $e_{FR} = 20$ mm e $Q_V = 0,75$	94
Tabela 4.13 - Parâmetros geométricos do leito de partículas para $e_{FR} = 26$ mm e $Q_V = 0,5$	96
Tabela C.1 - Fator de abrangência relacionado ao nível de confiança.	115
Tabela C.2 - Valores para razão entre o máximo desvio aceitável e o desvio padrão de acordo com o número de medidas.	117
Tabela A.1 - Viscosidade dinâmica da solução em função da concentração mássica de glicerina e da temperatura.....	119
Tabela A.2 - Massa específica da solução em função da concentração mássica de glicerina e da temperatura.....	120

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

CERNN	Centro de Pesquisas em Reologia e Fluidos Não Newtonianos
ECD	Equivalent circulating density
LaMP	Laboratório de Meios Porosos
LCM	Lost Circulation Materials
NPT	Nonproductive Time
OBF	Oil Based Fluid
PCP	Polymer-based Cross-linked Pills
PIB	Produto Interno Bruto
POP	Procedimento Operacional Padrão
PVC	Policloreto de polivinila
PWD	Pressure while drilling
SBF	Synthetic Based Fluid
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
WBF	Water Based Fluid
WPC	World Petroleum Congress
WSS	Wellbore Stabilization System

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas

A	Área	$[m^2]$
C_g	Fração mássica de glicerina	$[-]$
C_p	Fração mássica de partículas	$[-]$
C_α	Fração mássica de determinada substância	$[-]$
D	Diâmetro da tubulação	$[m]$
d	Desvio de uma medição	$[-]$
D_h	Diâmetro hidráulico	$[m]$
d_{\max}	Desvio máximo aceitável	$[-]$
e_{FR}	Espessura da fratura	$[mm]$
e_p	Altura do leito de partículas	$[%]$
g	Aceleração da gravidade	$[m/s^2]$
h_{CH}	Dimensão do espaço anular do poço	$[m]$
h_{FR}	Comprimento da fratura	$[m]$
h_{lt}	Perda de Carga total	$[m^2/s^2]$
h_p	Comprimento do leito de partículas	$[mm]$
$h_{p,i}$	Posição de início de formação do leito de partículas	$[mm]$
k_p	Fator de abrangência	$[-]$
L	Comprimento de desenvolvimento	$[m]$

l_{DW}	Comprimento da seção de testes a jusante da fratura	[<i>m</i>]
L_{FR}	Comprimento da fratura	[<i>m</i>]
l_{UP}	Comprimento da seção de testes a montante da fratura	[<i>m</i>]
m_g	Massa de glicerina	[<i>kg</i>]
m_p	Massa de partículas	[<i>kg</i>]
m_t	Massa total da solução líquido-sólido	[<i>kg</i>]
m_w	Massa de água	[<i>kg</i>]
m_α	Massa de determinada substância	[<i>kg</i>]
MW	Massa específica do fluido de perfuração	[<i>lb / gal</i>]
N	Tamanho da amostra	[-]
n	Número de observações	[-]
P	Probabilidade em uma distribuição normal	[-]
p	Pressão	[<i>Pa</i>]
$p_{1,2}$	Pressão medida no transdutor I-2	[<i>kPa</i>]
$p_{1,3}$	Pressão medida no transdutor I-3	[<i>kPa</i>]
P_A	Queda de pressão no espaço angular	[<i>psi</i>]
P_m	Perímetro molhado	[<i>m</i>]
PVD	Profundidade vertical do poço	[<i>ft</i>]
Q	Vazão volumétrica	[<i>m</i> ³ / <i>s</i>]
Q_v	Abertura da válvula de vazão inicial pela fratura	[-]
R^2	Coeficiente de regressão linear	[-]
Re	Número de Reynolds	[-]
T	Temperatura	[° <i>C</i>]

t_{ip}	Tempo de injeção de partículas	[s]
U	Incerteza expandida	[-]
u_c	Incerteza padrão combinada	[-]
\bar{V}	Velocidade média	[m/s]
\bar{x}	Média aritmética das medições	[-]
x_i	Observação independente	[-]
x_{susp}	Medição suspeita	[-]
Z	Altura	[m]
Z_{CH}	Profundidade do canal	[mm]
Z_{FR}	Profundidade da fratura	[m]

Letras Gregas

α	Substância	[-]
μ	Viscosidade dinâmica do fluido	[kg/m.s]
ρ	Massa específica da solução	[kg/m ³]
σ	Desvio padrão	[-]
τ	Tensão de cisalhamento	[N/m ²]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Caracterização do Problema	22
1.2	Revisão da Literatura	25
1.3	Objetivos	31
1.4	Justificativa	31
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	33
2.1	Conceitos e definições básicas	33
2.1.1	Fração mássica	33
2.1.2	Viscosidade	34
2.1.3	Vazão e velocidade média	34
2.1.4	Número de Reynolds	35
2.1.5	Comprimento de desenvolvimento	36
2.1.6	Perda de carga	36
2.2	Perda de circulação	37
2.2.1	Zonas de perda de circulação	39
2.2.2	Mecanismos de controle de perda de circulação	42
2.3	Síntese do capítulo 2	45
3	MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1	Circuito experimental	47
3.2	Características da seção de testes	54
3.3	Sistema de aquisição de dados	59
3.4	Instrumentos de medição	62
3.4.1	Calibração dos instrumentos de medição	62
3.5	Solução fluido-sólido	67
3.6	Ensaíos reométricos	68
3.7	Testes experimentais	71
3.8	Síntese do capítulo 3	73
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	74
4.1	Testes preliminares	74
4.2	Caracterização da mistura água-glicerina	80
4.3	Formação do leito de partículas	82
4.3.1	Efeito da variação do diâmetro da fratura	85
4.3.2	Efeito da variação da vazão de fuga	88
4.3.3	Efeito da variação do número de Reynolds	93
5	CONCLUSÕES	98
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	99
	REFERÊNCIAS	101
	APÊNDICE A – IMAGENS DOS INSTANTES FINAIS DE CADA TESTE REALIZADO	106
	APÊNDICE B – ORÇAMENTO DOS GASTOS ENVOLVIDOS NA REALIZAÇÃO DO PROJETO	109

APÊNDICE C – INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS	110
ANEXO A – PROPRIEDADES FÍSICAS DA SOLUÇÃO ÁGUA - GLICERINA	118
ANEXO B - PROCEDIMENTO PARA INÍCIO DO FUNCIONAMENTO DO APARATO EXPERIMENTAL	121

1 INTRODUÇÃO

A indústria de petróleo e gás está constantemente em busca do desenvolvimento de novas tecnologias e na utilização de novos materiais para aperfeiçoar cada vez mais suas técnicas e metodologias procurando atender os crescentes desafios produtivos e econômicos impostos atualmente.

Um número cada vez maior de companhias se direciona a exploração de reservatórios de óleo e gás mais profundos e em condições mais complexas (KANG, *et al.*, 2014).

Em reservatórios de petróleo, o óleo e o gás natural são originalmente produzidos por rochas geradoras e, posteriormente migram, por efeitos de capilaridade e forças de empuxo, para rochas reservatório que são, essencialmente, rochas com vazios no seu interior (porosas). A extração dos constituintes das rochas reservatório engloba diferentes processos, dentre os quais se destaca a perfuração.

A perfuração é realizada através do método rotativo que consiste no movimento de rotação de uma broca que comprime a rocha ocasionando o seu esmerilhamento, gerando uma grande quantidade de cascalhos. Os cascalhos são continuamente removidos utilizando-se fluidos de perfuração. Como mostra a Figura 1.1 o fluido é injetado por bombas para o interior da coluna de perfuração através da cabeça de injeção, ou *swivel* e retorna à superfície através do espaço anular formado pelas paredes do poço e a coluna (THOMAS, 2004).

Durante a perfuração dois fenômenos podem vir a ocorrer de acordo com as configurações de pressão no poço. Caso a pressão no poço seja menor que a pressão de poro, observada na formação, um fenômeno que consiste na entrada de fluido que está presente no reservatório em direção ao poço acontece, recebendo o nome de influxo ou kick. Entretanto, Se a pressão no poço for maior do que a pressão de poro ocorre a perda de circulação, fenômeno que consiste na fuga de fluido de perfuração em direção ao reservatório.

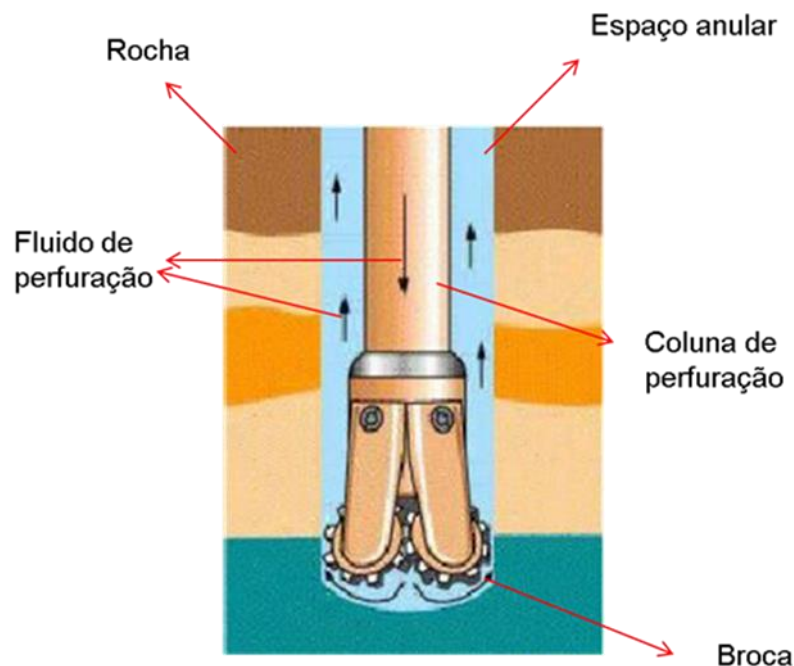


Figura 1.1 - Representação da circulação do fluido de perfuração em operação de perfuração de petróleo.

(Fonte: adaptado de FREUDENRICH, 2013).

Considerando os elevados gradientes de pressão envolvidos na perfuração, a presença de fraturas no conjunto poço-formação pode ocasionar a perda de circulação de fluidos, interferindo negativamente na operação do poço. Este fenômeno consiste no escoamento de fluido de perfuração de forma descontrolada para o reservatório (formação rochosa ou porosa), devido ao escoamento preferencial gerado pelas fraturas, o que pode ser visualizado na Figura 1.2.

As fraturas podem aparecer de duas formas diferentes no processo de perfuração, já estando presentes na formação ou sendo causadas na perfuração através do excesso de pressão gerado na interação da coluna de perfuração com a formação.

Controlar o fenômeno de perda de circulação por fraturas é extremamente interessante para a indústria de petróleo e gás, pois está diretamente ligado a eficiência do processo de perfuração. Por essa razão, diferentes métodos de controle são utilizados para bloquear o escoamento de fluidos no conjunto poço-

formação, sendo um deles o processo de injeção de partículas sólidas para vedação de fraturas (CIVAN, 2002).

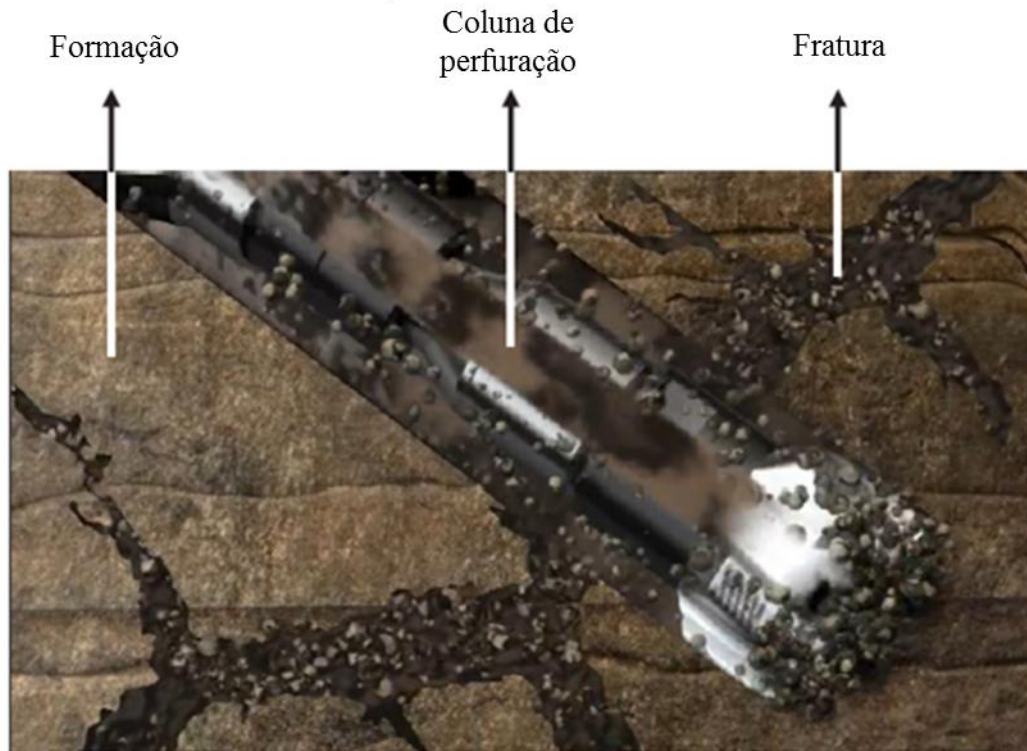


Figura 1.2 - Fluido de perfuração invadindo a formação rochosa através das fraturas. (Fonte: adaptado de HALLIBURTON, 2013).

As partículas sólidas utilizadas no combate a perda de circulação são conhecidas como materiais de perda de circulação (*Lost Circulation Materials - LCM's*) e são classificadas de acordo com a composição, forma geométrica ou empregabilidade (SUYAN *et al.*, 2007).

Dentro deste contexto ressalta-se a importância do estudo de escoamentos particulados tendo em vista os diferentes problemas inerentes na engenharia de petróleo. Neste trabalho, a proposta central do estudo é investigar o processo de injeção de partículas, como método de controle para o fenômeno de invasão em formações fraturadas, visando à retomada da circulação do fluido no processo de perfuração.

1.1 Caracterização do Problema

Conforme exposto, a perda de circulação é um problema que pode influenciar significativamente o processo de perfuração, alterando o planejamento da operação e resultando em efetivas perdas financeiras.

Devido à complexidade das características e parâmetros presentes no processo de perfuração, algumas considerações e simplificações são realizadas.

A primeira consideração realizada é em relação ao tipo de poço perfurado, que para o atual estudo é considerado como vertical, ilustrado na Figura 1.3. Nesta figura é possível verificar outra consideração feita para o tipo de fratura, presente no conjunto poço-formação, que é simplificada como um plano de fratura horizontal. Desta forma, o poço vertical atravessa o plano de fratura de forma perpendicular.

A Figura 1.3 (a) mostra o plano de corte longitudinal, onde é possível identificar a espessura da fratura (e_{FR}), que representa a descontinuidade na direção radial do poço e o percurso do fluido de perfuração, que inicia descendente no interior da coluna de perfuração e retorna de forma ascendente até a superfície através do espaço anular. No corte transversal, Figura 1.3 (b), pode-se observar a profundidade da fratura (Z_{FR}), que pode ser representada pelo ângulo ocupado por um plano de fratura em uma seção transversal do poço. Devido à simplificação do plano ser grande o suficiente, esta espessura não é importante para o estudo.

Como pode ser visualizado na Figura 1.4, a profundidade do plano da fratura é significativamente maior que a espessura, o que proporciona uma entrada simétrica do fluido do poço ao longo da entrada da fratura.

Considerando que o principal objetivo deste estudo é investigar o processo de preenchimento da fratura com material particulado, outra simplificação é feita em relação à região do escoamento, considerada apenas no retorno do espaço anular. A região de escoamento no interior da coluna de perfuração não será objeto de estudo neste trabalho.

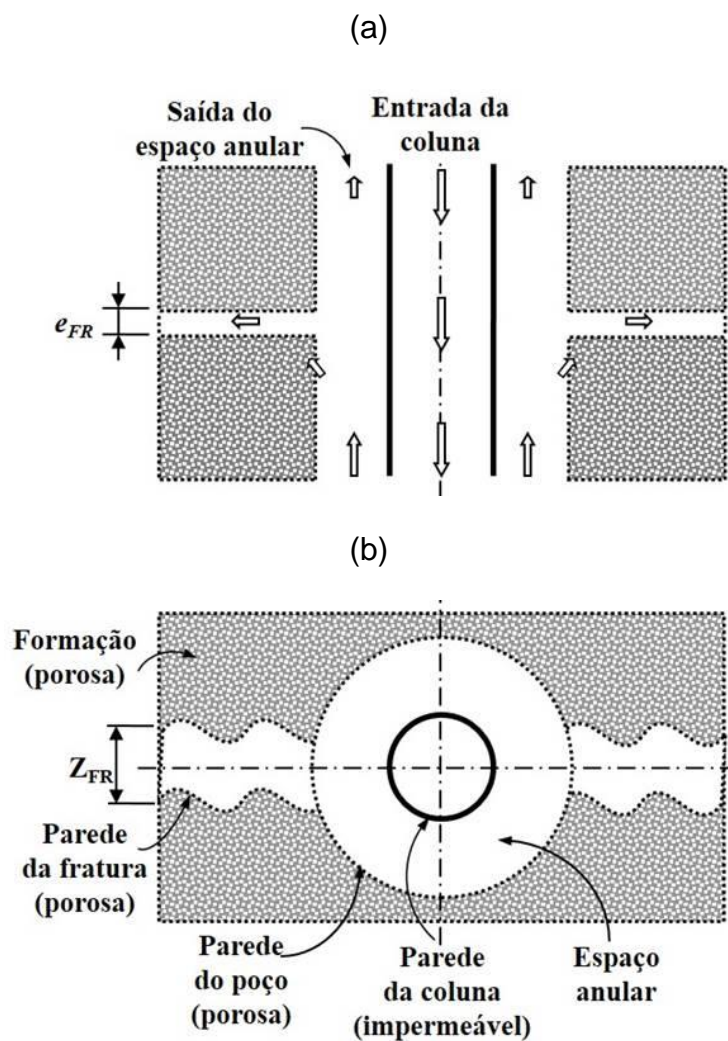


Figura 1.3 – Representação do conjunto poço-formação: (a) corte longitudinal e (b) corte transversal.

(Fonte: DE LAI, 2013).

A Figura 1.5 representa a região de interesse para o presente estudo após as simplificações consideradas, apresentando uma entrada de fluido (retorno do anular) e duas saídas: uma pela saída do anular e outra no final da fratura.

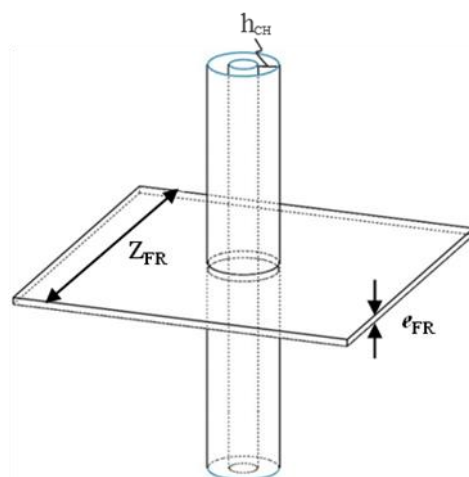


Figura 1.4 - Idealização da geometria e escala do plano de fratura em relação ao poço vertical.
(Fonte: adaptado de DE LAI, 2013).

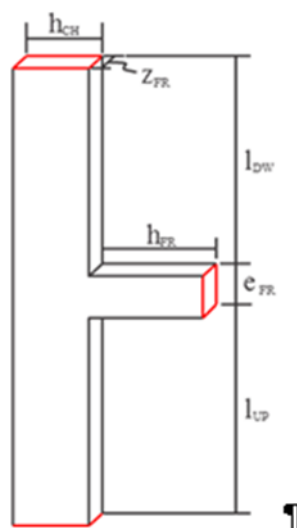


Figura 1.5 - Simplificação geométrica para o problema de perfuração.
(Fonte: adaptado de BARBOSA, 2015).

A largura do canal, h_{CH} , representa a dimensão do espaço anular do poço, a região da fratura é representada por uma espessura, e_{FR} , e um comprimento, h_{FR} . O comprimento da região a montante da fratura é denominado l_{UP} , e a jusante l_{DW} .

Neste trabalho, o controle da invasão de fluido, ocorre através da injeção de material particulado no fluido de perfuração, a fim de se obter a vedação das fraturas

ao longo do tempo. O processo de deposição das partículas na fratura está representado na Figura 1.6, onde (a) representa o instante em que as partículas são injetadas no canal; (b) a deposição de material particulado na parede horizontal inferior da fratura devido à gravidade; e (c) o leito de partículas vedando o canal fraturado.

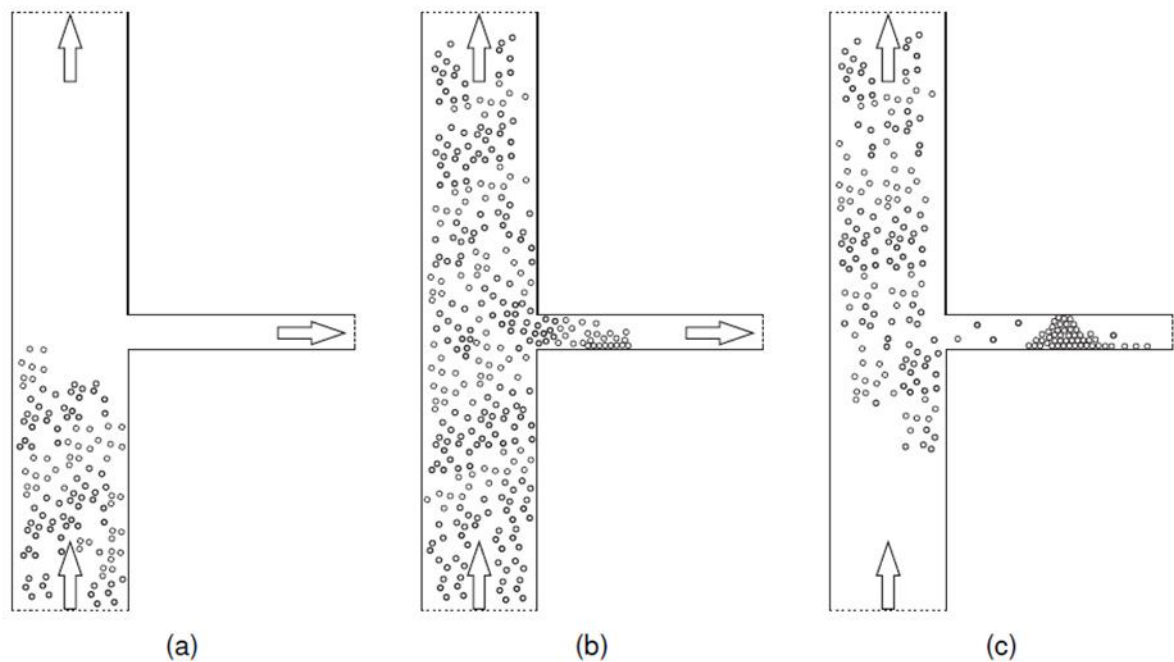


Figura 1.6 - Preenchimento da fratura para três instantes de tempo.
(Fonte: BARBOSA, 2015).

Dentro do escopo apresentado é observada a janela de oportunidade deste trabalho: investigar experimentalmente a influência da fratura ao se utilizar o escoamento particulado para caracterizar uma solução para o problema da perda de circulação em canais fraturados.

1.2 Revisão da Literatura

Nesta seção serão apresentados estudos já realizados que estão relacionados com o tema proposto e contribuem com o desenvolvimento desta monografia. Os trabalhos enfocam processos de perfuração de poços de petróleo, problemas de

perda de circulação de fluidos de perfuração e fluidodinâmica de sistemas particulados e serão descritos de forma sucinta.

O livro de Thomas (2004) apresenta todas as etapas que envolvem a produção de petróleo e gás, desde a fase de prospecção até as etapas de processamento de fluidos, proporcionando uma base abrangente em engenharia de petróleo e principalmente na etapa de perfuração.

Voltado mais especificamente para a área de engenharia de perfuração, o livro de Azar e Samuel (2007) é uma potencial ferramenta no entendimento de todo o processo de perfuração. Apresenta desde tipos e técnicas de perfuração, passando pela seleção de brocas e fluidos de perfuração, bem como possíveis problemas a serem enfrentados durante a perfuração e formas atualmente utilizadas para prevenir e ou combater tais adversidades.

Escoamentos em meios porosos e em microescala são analisados por Crowe *et al.* (1998), onde são apresentados conceitos básicos de escoamentos multifásicos, ebulição e condensação, além de fenômenos de transporte com material particulado em dutos, leitos fluidizados e sistemas de separação de partículas.

A fim de analisar o desempenho do poço, Brill e Mukherjee (1999) apresentam conceitos de escoamentos monofásicos e multifásicos aplicados a poços de petróleo e gás. Também realizam a análise da previsão do gradiente de pressão através de restrições e componentes da coluna e das tubulações.

Massarani (2001) aborda a fluidodinâmica de sistemas particulados, apresentando conceitos desde o estudo da partícula sólida isolada até o escoamento bifásico em meios porosos e a teoria de filtração através de formação de torta, realizando também a abordagem matemática do escoamento líquido-sólido através da relação das forças atuantes com a trajetória das partículas.

Dietrich *et al.* (2005) abordam conhecimentos em meios porosos naturalmente fraturados e testes experimentais com amostras de rochas recolhidas em campo, analisando a permeabilidade, porosidade, condutividade hidráulica e as características das fraturas presentes. Os autores investigam fraturas que dominam

significativamente a preferência do escoamento através da amostra, característica do contexto deste trabalho.

Conceitos de escoamento particulado desde a escala molecular e a distribuição e concentração de partículas no escoamento são abordados por Peker e Helvaci (2008). São apresentados também conceitos do comportamento de suspensões líquido-sólido em fluidos não newtonianos englobando suas propriedades reológicas.

Considerando o fenômeno de perda de circulação de fluidos em processos de perfuração, Howard e Scott Jr. (1951) apresentam a definição de perda de circulação e os tipos de formação onde ocorre, apresentando características que permitem o reconhecimento de cada tipo de formação. O trabalho também apresenta as condições do poço para o fraturamento e as causas da utilização de fluido de perfuração com pressão excessiva durante a perfuração. Como forma de prevenção da perda de circulação para fraturas, os autores concluíram, através de testes de laboratório, que materiais de perda de circulação granulares são os mais efetivos para controlar a perda de fluido de perfuração para fraturas.

Uma metodologia para o controle de perda de circulação no poço denominada Wellbore Stabilization System (WSS) foi proposto por Chatterji *et al.* (1999). Esta metodologia consiste na injeção de um fluido composto por uma resina e um agente endurecedor no interior do poço para preencher a fratura. O processo de perfuração é interrompido no momento em que uma fratura é detectada e, após o tempo de cura, esse fluido se solidifica e tampona a fratura, permitindo a retomada da perfuração do poço.

Jilani *et al.* (2002) realizaram experimentos para avaliar a influência do processo de perfuração na condição *overbalance* na ocorrência de danos na formação. Um método ultrassônico foi utilizado para medir a profundidade da invasão de fluido de perfuração em direção a formação rochosa. Os autores observaram que há uma diminuição na profundidade da invasão conforme aumenta-se a pressão no poço até que um valor crítico seja atingido. A partir deste valor crítico, a profundidade da invasão aumenta com o aumento da pressão no poço.

Ivan *et al.* (2002) estudaram o controle de fuga de fluido em fraturas induzidas pelo processo de perfuração. Uma metodologia é apresentada para a seleção de

partículas, priorizando partículas denominadas Polymer-based Cross-linked Pills (PCP). Essas pílulas são empregadas juntamente com uma mistura de outras partículas utilizadas como material de perda de circulação e são desenvolvidas a partir de um reticulado composto por duas cadeias de materiais poliméricos. As pílulas se transformam em uma substância muito dúctil, similar a uma borracha, capaz de penetrar e selar as fraturas.

Testes de resiliência para partículas de diferentes materiais foram apresentadas por Whitfill e Hemphill (2004). Os autores observaram que uma combinação de materiais de diferentes formas e composições apresenta resultados melhores no controle de perda de fluido de perfuração. Com os resultados obtidos experimentalmente, concluíram que realizar uma pré-mistura do material de perda de circulação com o fluido de perfuração antes da utilização permite garantir a manutenção da distribuição de tamanho de partículas.

Kumar e Savari (2011) apresentam conceitos de perda de circulação e as zonas onde ocorre, abordando mecanismos de controle do fenômeno. Apresentam também um estudo experimental das propriedades de partículas de diferentes materiais utilizadas para controlar a perda de circulação através de fraturas. A partir do estudo concluiu-se que partículas de maior razão de aspecto, maior resiliência e maior resistência ao esmagamento possuem melhor desempenho no selamento das fraturas para o controle da perda de circulação.

Fundamentos de perda de circulação e conceitos de programa de gestão do fenômeno são apresentados por Cook *et al.* (2012). Também são apresentados o conceito de densidade de circulação equivalente e a faixa segura para se perfurar um poço, além de conceitos de materiais para o fortalecimento do poço e formação de torta.

A classificação dos tipos de perda de circulação conforme sua intensidade e os tipos de tratamentos utilizando a adição de material particulado fibroso no fluido de perfuração, de acordo com os tipos de fraturas encontrados são apresentados por Almagro *et al.* (2014). O estudo relata diversas operações de controle da perda de circulação bem sucedidas realizadas em poços de petróleo e gás ao redor do mundo.

Calçada *et al.* (2015) desenvolveram um aparato experimental para simular o escoamento de fluido com material particulado de diferentes formas e tamanhos para preenchimento de fraturas com espessuras distintas. No estudo são variados o fluido e as partículas utilizadas, a fim de comparar o desempenho das diferentes misturas para atenuar a perda de fluido através das fraturas. Os autores concluíram que através do aparato desenvolvido pode-se analisar a eficiência de cada solução utilizada no selamento das fraturas.

Vários estudos na área de perda de circulação e escoamento particulado vem sendo desenvolvidos no Laboratório de Meios Porosos (LaMP), do Centro de Pesquisas em Reologia e Fluidos Não Newtonianos (CERNN), da UTFPR. Na sequência serão apresentados sucintamente alguns destes trabalhos já realizados, a fim de mostrar a evolução dos estudos que contribuem com o desenvolvimento da presente monografia.

Dias (2010) estudou diferentes parâmetros geométricos de um canal parcialmente poroso contendo uma fratura discreta para abordar numericamente, utilizando coordenadas cilíndricas, o fenômeno da invasão considerando aspectos dinâmicos do escoamento e do meio poroso, caracterizando a fuga preferencial do escoamento.

Também para um canal parcialmente poroso e fraturado Andreatta (2011) abordou o problema de invasão, avaliando numericamente a influência dos parâmetros geométricos da fratura, utilizando coordenadas cilíndricas, considerando também o número de fraturas no canal e a distância entre elas, no comportamento do escoamento.

De Lai (2013) abordou o escoamento particulado para o preenchimento de um canal com uma fratura retangular, impermeável em seu comprimento, a fim de observar o empacotamento de partículas ao final da fratura. O autor analisou numericamente, para um mesmo padrão de injeção de partículas, a influência da concentração de material particulado na vazão de fuga da fratura, que se manifesta apenas no final da fratura.

Stahlke e Fritoli (2014) realizaram a concepção, especificação, construção, montagem e instrumentação de uma bancada experimental capaz de permitir o

estudo de escoamentos de diferentes sistemas particulados em seções de teste com seção transversal retangular. Os autores apresentaram alguns testes iniciais, a fim de verificar o funcionamento da bancada, analisando o número de Reynolds e a perda de carga na seção de testes utilizando água como fluido de trabalho. Também é importante destacar a apresentação de ensaios de calibração estática dos instrumentos de medição e de experimentos preliminares de filmagem de escoamento particulado.

Para escoamento particulado aplicado ao preenchimento de uma fratura retangular e não permeável, Barbosa (2015) analisou numericamente parâmetros como o comprimento da fratura, parâmetros do escoamento como número de Reynolds e viscosidade dinâmica do fluido, além de parâmetros das partículas, diâmetro e razão entre massa específica da partícula e do fluido, e o número de partículas injetadas, a fim de caracterizar a influência dessas variáveis na formação do leito de partículas. O autor observou essa influência através do comprimento e posicionamento do leito e pelo preenchimento vertical da fratura.

Obrzut (2015), utilizando um aparato experimental desenvolvido em conjunto com o presente trabalho, estudou a formação de leito de partículas no interior da fratura para controle do fenômeno de fuga de fluido. O autor analisou a influência de parâmetros como o número de Reynolds, a concentração e o tipo de material particulado na formação do leito ao longo da fratura. A partir dos resultados, concluiu que o aumento da concentração de partículas, a diminuição do número de Reynolds do escoamento no canal e a utilização de partículas de maior massa específica contribuem para uma formação de leito com maior altura e comprimento.

Como um estudo preliminar do presente trabalho, Schneider (2015) utilizou o mesmo aparato experimental para avaliar o comportamento da mistura água-glicerina, sem a presença de material particulado. O escoamento foi realizado somente na seção de testes, não utilizando a fratura, de modo que foram coletados dados de vazão e de pressão relativa na entrada e na saída da seção, a fim de caracterizar o escoamento para fluidos com viscosidade diferentes e conhecer as limitações do aparato experimental.

A partir dos trabalhos revisados, é possível identificar que o presente estudo envolve diferentes conceitos da engenharia, que abrangem desde conhecimentos

básicos de engenharia de petróleo até conhecimentos mais específicos de fenômenos de transporte com material particulado em meios fraturados, para solucionar o problema de perda de circulação. O grande diferencial está no fato de ser um estudo experimental e, dentro deste escopo, nos parâmetros avaliados, tendo como foco investigar a fratura e não o tipo ou a concentração de material particulado.

1.3 Objetivos

No presente trabalho, propõem-se analisar experimentalmente o processo de injeção de partículas sólidas no fluido visando o preenchimento da fratura quando existe perda de circulação em canal fraturado.

Com o intuito de caracterizar o processo de preenchimento da fratura, a influência da variação da espessura, do número de Reynolds e da vazão de fuga de fluido pela fratura sobre a posição inicial, o comprimento e a altura do leito de partículas formado são analisadas. As propriedades do fluido e das partículas são mantidas constantes.

1.4 Justificativa

A importância econômica do projeto fica evidenciada pela importante participação da indústria petrolífera no PIB brasileiro, que aumentou de 3% em 1990 para 12% em 2010 e chega a 13% nos dias de hoje conforme dados divulgados no WPC (2015) pelo diretor de Gás e Energia da Petrobras, José Alcides Santoro.

Atualmente, a maioria das explorações offshore realizadas no Brasil pela Petrobras ocorrem a uma profundidade média de 5500 a 7000 m, incluindo reservatórios depletados, zonas subsal e pré-sal e calcários fraturados naturalmente. A perda de fluido de circulação para o reservatório pode reduzir ou até mesmo eliminar a capacidade de produção do poço e normalmente 1/3 dos poços perfurados pela Petrobras apresentam perda de circulação (CALÇADA, et al., 2015).

O fenômeno de perda de circulação causa significativos aumentos nos custos da operação devido à perda de fluido, comprometendo a produtividade do poço e aumentando o tempo de recuperação dos reservatórios. Estudo de caso para a empresa Hart Energy estimou que os custos ocasionados pela perda de circulação chegam a U\$800 milhões por ano, enquanto o custo de materiais para combater a perda de circulação através da adição de materiais para perda de circulação (LCM) ao fluido de perfuração chega à U\$200 milhões por ano (IVAN e BRUTON, 2005).

O estudo desenvolvido nesta monografia é parte da frente experimental de um projeto mais abrangente, realizado pelo grupo de pesquisa do Centro de Pesquisas em Reologia e Fluidos Não Newtonianos (CERNN) nas dependências da UTFPR com o objetivo de estudar numérica e experimentalmente, em conjunto com a Petrobras, o escoamento fluido-sólido em meios porosos e fraturados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados conceitos importantes e informações que contribuem para a compreensão e o desenvolvimento do presente trabalho. Cada subdivisão desta seção aborda um conjunto intrínseco de conceitos e definições utilizados na realização de testes ou na análise de dados.

2.1 Conceitos e definições básicas

Os principais conceitos físicos e fundamentos de mecânica dos fluidos utilizados diretamente no escopo deste trabalho, tanto para o entendimento do problema como para o desenvolvimento e a análise dos testes a serem realizados são apresentados nesta seção.

2.1.1 Fração mássica

A composição de uma mistura pode ser expressa em função da fração mássica (C_α), que é definida pela massa que possui uma determinada substância (α) em relação à massa total da mistura (m_t), expressa por (KOTZ, et al., 2009):

$$C_\alpha = \frac{m_\alpha}{m_t} \quad (2.1)$$

Para o presente trabalho são definidas duas frações mássicas, para a quantidade em percentual mássico de glicerina (C_g), Eq.(2.2), e de partículas (C_p), Eq. (2.3), presente na solução a ser utilizada para realização dos testes.

$$C_g = \frac{m_g}{m_t} = \frac{m_g}{m_g + m_w + m_p} \quad (2.2)$$

$$C_p = \frac{m_p}{m_t} = \frac{m_p}{m_p + m_g + m_w} \quad (2.3)$$

Sendo m_w a massa de água, m_g a massa de glicerina e m_p a massa das partículas presentes na massa total da mistura (m_t).

2.1.2 Viscosidade

A viscosidade é uma medida que representa a resistência que um fluido oferece ao escoamento. A tensão de cisalhamento (τ) é uma relação entre a aplicação de uma força de cisalhamento e a área cisalhante, que para o plano cartesiano xy é dada por (FOX, et al., 2010):

$$\tau_{xy} = \mu \frac{dV}{dy} \quad (2.4)$$

Sendo μ a viscosidade dinâmica do fluido, também chamada de viscosidade absoluta, que é uma constante que representa sua resistência à deformação. Assim, para uma determinada vazão, quanto maior a viscosidade, maior será a necessidade de energia para fazer com que o fluido escoe.

2.1.3 Vazão e velocidade média

Os parâmetros vazão e velocidade média são utilizados para caracterizar o escoamento através do aparato experimental. A vazão representa a quantidade de

material que escoar através de uma seção por unidade de tempo. A vazão em volume ou volumétrica (Q) através de uma seção de uma superfície de controle de área (A) é dada pela Eq.(2.5) e, a partir da vazão, a velocidade média (\bar{V}) do escoamento em uma seção pode ser calculada pela Eq.(2.6).

$$Q = \int_A \bar{V} \cdot d\bar{A} \quad (2.5)$$

$$\bar{V} = \frac{Q}{A} = \frac{1}{A} \int_A \bar{V} \cdot d\bar{A} \quad (2.6)$$

2.1.4 Número de Reynolds

O número de Reynolds (Re) representa a razão entre as forças de inércia e as forças viscosas de um fluido que está escoando. É um parâmetro adimensional e, para o escoamento confinado, é dado pela Eq.(2.7):

$$Re = \frac{\rho \bar{V} D}{\mu} \quad (2.7)$$

em que D é o diâmetro da tubulação e ρ a massa específica da solução. Para escoamentos confinados em tubulações de seção de geometria não circular, como no caso do presente trabalho, é utilizado o conceito do diâmetro hidráulico D_H , definido pela Eq.(2.8):

$$D_H = \frac{4A}{P_m} \quad (2.8)$$

onde A representa a área da seção transversal da tubulação e P_m o perímetro molhado (comprimento de parede em contato com fluido escoando).

O número de Reynolds permite caracterizar o regime de escoamento em laminar, transição ou turbulento. De acordo com White (1991), o número de Reynolds no qual ocorre a transição de regime de escoamento laminar para turbulento é em torno de $Re_{D_H} = 2000$.

2.1.5 Comprimento de desenvolvimento

O comprimento de desenvolvimento é definido como a distância da entrada da tubulação necessária para o escoamento se tornar completamente desenvolvido, ou seja, a camada limite em desenvolvimento atinge a linha de centro e o perfil de velocidades se torna constante. Este conceito decorre da conservação da massa para escoamento incompressível e da condição de não deslizamento nas paredes.

Calcula-se o comprimento de desenvolvimento para escoamento laminar em dutos a partir da Eq.(2.9) (WHITE, 1991), na qual $C_1 = 0,5$, $C_2 = 0,05$ e L correspondendo ao comprimento de desenvolvimento.

$$\frac{L}{D_h} = C_1 + C_2 Re_{Dh} \quad (2.9)$$

2.1.6 Perda de carga

Partindo do conceito da conservação da energia pode-se definir a perda de carga entre dois pontos em locais distintos 1 e 2. A Eq.(2.10) (FOX, *et al.*, 2010) apresenta a perda de carga total por unidade de massa (h_{it}), que é definida como a conversão irreversível de energia mecânica em energia térmica não desejada e em perda de energia por transferência de calor.

$$h_{it} = \left(\frac{p_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{\bar{V}_1^2}{2} + gz_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{\bar{V}_2^2}{2} + gz_2 \right) \quad (2.10)$$

onde g representa a aceleração da gravidade, p a pressão no local especificado e z a altura.

2.2 Perda de circulação

No momento em que a coluna de perfuração atinge a região da fratura, dois fenômenos podem vir a ocorrer de acordo com as configurações de pressão no poço. Caso a pressão no poço seja menor que a pressão de poro, observada na formação, um fenômeno que consiste na entrada de fluido que está presente no reservatório em direção ao poço acontece, recebendo o nome de influxo ou *kick*. No entanto, caso a pressão no poço seja maior que a pressão de poro ocorre a perda de circulação (DATWANI, 2012).

A perda de circulação é definida como a fuga de fluido de perfuração para a formação rochosa através dos poros ou de fissuras no conjunto poço-formação (GOINS, 1952). As áreas da formação para as quais o fluido de perfuração escoam são conhecidas como zonas de fuga e contribuem significativamente para o tempo não produtivo (*Nonproductive Time* - NPT) do processo de perfuração (COOK, *et al.*, 2012).

Normalmente, poços são perfurados em uma condição de *overbalance*, na qual a pressão dentro do poço é maior do que a pressão de reservatório. Nesta condição, durante o processo de construção do poço, a perda de circulação pode ocorrer (CALÇADA, *et al.*, 2015).

A densidade do fluido de perfuração é a fonte principal da pressão hidrostática em um poço. A contribuição do fluido para a pressão quando circula pelo poço pode ser expressa em termos da densidade de circulação equivalente (*equivalent circulating density* – ECD). Na condição de *overbalance* a ECD contribui para criar

uma pressão hidrostática no poço maior do que a pressão de poro da formação (COOK, *et al.*, 2012). O ECD pode ser obtido pela Eq.(2.11):

$$ECD = \frac{P_A}{0,052 \text{ TVD}} + MW \quad (2.11)$$

onde P_A é a queda de pressão no espaço anular medida em psi, TVD representa a profundidade vertical do poço medida em pés e MW a massa específica do fluido de perfuração medida em libras por galão.

A densidade de circulação equivalente do fluido utilizada no processo de perfuração deve estar inserida dentro de uma faixa segura de operação, Figura 2.1, contida entre a pressão de poro da formação e a pressão que inicia a formação de fraturas na rocha, logo o cálculo da ECD é muito importante para o controle do peso do fluido.

O surgimento da perda de circulação ocorre normalmente em consequência das fraturas geradas pelos métodos utilizados para perfurar um poço. Devido ao NPT gerado pelas perdas de circulação, os operadores usualmente adicionam de 10% a 20% aos seus orçamentos de perfuração e o fluido que escoar incontrolavelmente para a formação pode danificar o reservatório, afetando negativamente o potencial de produção e alterando suas características (ALMAGRO, *et al.*, 2014).

A criação de fraturas resulta de falhas de tração, o que ocorre quando a tensão exercida na formação excede a tensão circunferencial ao redor do poço e a força de tração da rocha, usualmente devido a densidade do fluido de perfuração ou a pressão do poço. Para operar com segurança em intervalos instáveis, de baixa pressão ou fraturados naturalmente é preciso identificá-los e priorizar a perfuração dentro destes intervalos (ALMAGRO, *et al.*, 2014; COOK, *et al.*, 2012).

As fraturas ocasionadas pelo processo de perfuração tendem a se propagar facilmente porque a pressão requerida para expandir uma fratura é normalmente menor do que a requerida para formá-la (COOK, *et al.*, 2012).

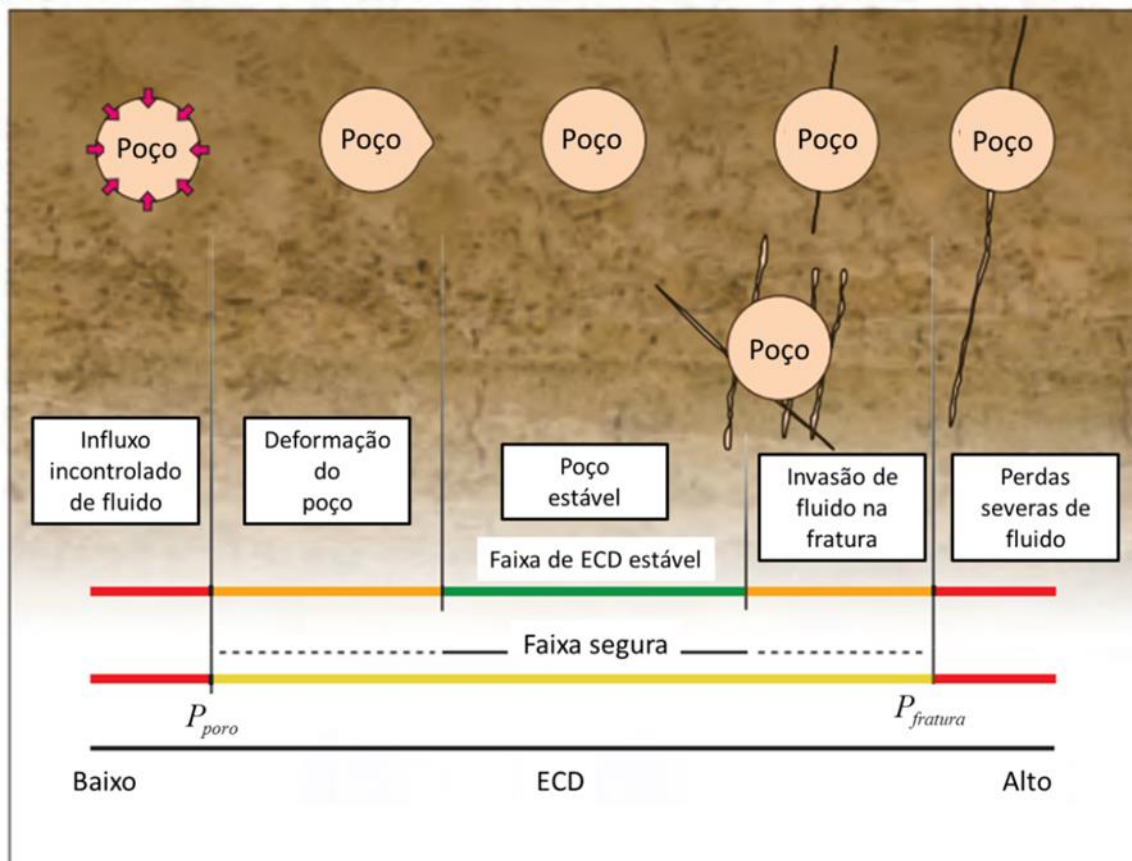


Figura 2.1 - Faixa de operação e perfil do poço em função da ECD do fluido de perfuração.
(Fonte: Adaptado de COOK *et al.*, 2012 e OBRZUT, 2015).

O presente estudo será restringido a problemas de perda de circulação em formações fraturadas que apresentam o fenômeno de invasão dentro da faixa segura, e também para perdas severas de fluido pela fratura.

2.2.1 Zonas de perda de circulação

As zonas de fuga ou de perda de circulação podem fazer com que as equipes de perfuração percam controle sobre o poço porque o fluido de perfuração entra nessas regiões que impedem o retorno do fluido para a superfície (ALMAGRO, *et al.*, 2014).

As zonas de perda de circulação podem ser classificadas em formações naturalmente fraturadas, formações cavernosas, formações de alta permeabilidade

ou fraturas induzidas devido ao processo de perfuração (ALMAGRO, *et al.*, 2014 e CALÇADA, *et al.*, 2015), como pode ser visualizado na Figura 2.2.

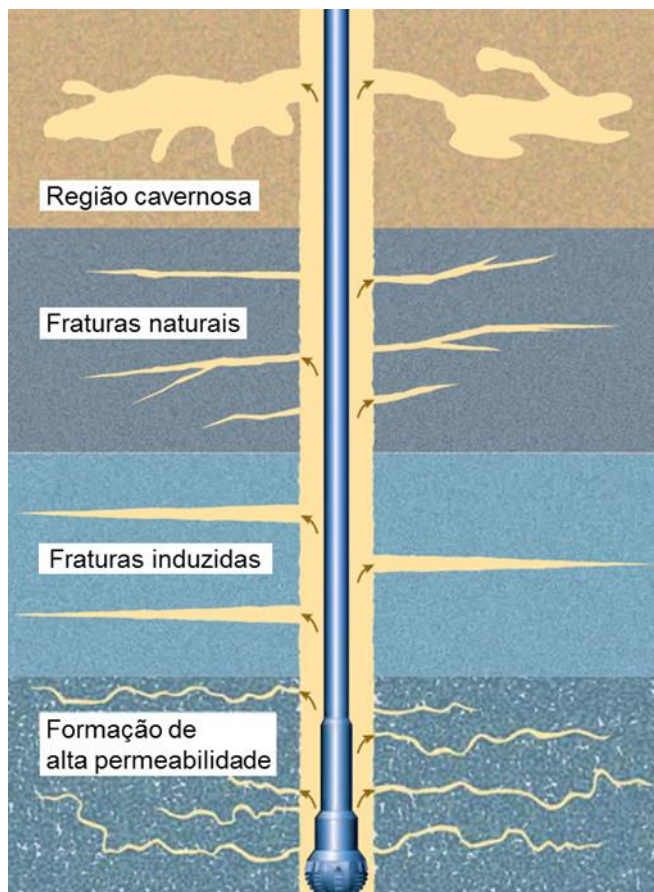


Figura 2.2 - Representação das zonas de perda de circulação no conjunto poço-formação.
(Fonte: ALMAGRO *et al.*, 2014)

Em formações de alta permeabilidade a perda de circulação requer que as passagens intergranulares sejam de tamanho suficiente para permitir a entrada total de fluido. São zonas de fuga identificadas pela perda gradual do nível de fluido de perfuração nos poços, que pode se tornar total caso a perfuração continue (HOWARD e SCOTT JR, 1951).

Devido ao grande tamanho do poro e da alta permeabilidade, são as zonas de maior ocorrência de perda de circulação. Partículas do fluido de perfuração não conseguem formar uma torta estável, o que dá início a perda de circulação. O uso de materiais de perda de circulação (LCM – *Lost Circulation Materials*), adicionados ao

fluido de perfuração é a solução mais comum para esse tipo de formação (KUMAR e SAVARI, 2011).

Fraturas naturais podem ser horizontais, verticais ou em vários ângulos para um diâmetro, podendo ocorrer em qualquer tipo de rocha. A perda de circulação é evidenciada pela diminuição gradativa de fluido de perfuração nos poços. Se mais fraturas são expostas e a perfuração não é interrompida, pode ocorrer perda de circulação total (HOWARD e SCOTT JR, 1951).

Formações naturalmente fraturadas são as mais difíceis de solucionar problemas de perda de circulação. Isso ocorre devido a falta de conhecimento do tamanho real da fratura, o que dificulta a seleção do tamanho da partícula a ser utilizada (KUMAR e SAVARI, 2011).

Em formações perfuradas com uma densidade de circulação equivalente muito elevada, devido a pressão do poço, fraturas podem ser induzidas. Por causa das fraturas induzidas, um caminho para o escoamento é aberto, pelo qual a perda de circulação ocorre (KUMAR e SAVARI, 2011).

Fraturas induzidas são diferenciadas de fraturas naturais primeiramente por requerer a imposição de pressão de magnitude suficiente para quebrar ou dividir a formação, enquanto que em fraturas naturais a pressão precisa ser apenas maior que a pressão no fluido dentro da formação. Podem ocorrer em qualquer tipo de rocha, mas preferencialmente em formações com características planas fracas, como xisto. A perda de circulação normalmente é repentina e acompanhada de perda total; sucedendo repentinas ondas na pressão (HOWARD e SCOTT JR, 1951).

As formações com fraturas induzidas por causa da pressão do poço são ainda mais complicadas, devido ao fato de a forma e a estrutura serem relativas a natureza da formação, aos efeitos da perfuração, assim como de influências geológicas ao longo do tempo. Estas fraturas induzidas tem a propensão de abrir ou fechar de acordo com variações na pressão do poço (KUMAR e SAVARI, 2011).

A perda de circulação em formação cavernosa ocorre quando a pressão do fluido de perfuração excede a pressão da formação da caverna. Neste tipo de formação, normalmente restrita a calcário, a broca deve cair de poucas polegadas a

vários pés logo antes do início da perda de circulação, que pode ser repentina e total (HOWARD e SCOTT JR, 1951).

Os tipos de perda de circulação são classificados de acordo com a severidade ou taxa em que a perda ocorre conforme a composição do fluido de perfuração (NAYBERG e PETTY, 1986; KUMAR e SAVARI, 2011), como apresenta a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Classificação da perda de circulação de acordo com a severidade.

Fluido	Perda	Vazão (bbl/h)	Cenários
WBF	Pequena (infiltração)	<25	Qualquer tipo de formação
	Parcial	25-100	Faturas naturais ou induzidas
	Severa	100-500	Faturas, falhas, regiões cavernosas e regiões de alta permeabilidade
	Total	Impossível manter o poço cheio	Faturas, falhas e regiões cavernosas
OBF, SBF	Pequena (infiltração)	<10	Qualquer tipo de formação
	Parcial	10-30	Faturas naturais ou induzidas
	Severa	>30	Faturas, falhas, regiões cavernosas e regiões de alta permeabilidade
	Total	Impossível manter o poço cheio	Faturas, falhas e regiões cavernosas

(Fonte: adaptado de CALÇADA, *et al.*, 2015).

A Tabela 2.1 relaciona a intensidade da perda de circulação com a vazão em que ocorre de acordo com cada fluido e também indica os tipos de formação mais propensos a ocorrer cada tipo de perda. Pode-se notar que para o fluido a base de água (*water based fluid* – WBF) admite-se maiores volumes de vazão pela fratura para uma mesma classificação de intensidade de perda quando comparado com fluido a base de óleo (*oil based fluid* – OBF) ou fluido de base sintética (*synthetic based fluid* – SBF).

2.2.2 Mecanismos de controle de perda de circulação

Os métodos existentes para conter a perda de circulação são classificados de acordo com a utilização em corretivos e preventivos, como mostra a Figura 2.3,

sendo que a experiência industrial tem mostrado que é melhor prevenir o fenômeno da perda de circulação do que tentar corrigi-lo, quando acontece durante o processo de perfuração. Entretanto, em alguns casos a prevenção não é possível, de forma que uma técnica corretiva deve ser utilizada, como adicionar LCM no fluido de perfuração (COOK, *et al.*, 2012).



Figura 2.3 - Programa de gestão de perda de circulação.
(Fonte: adaptado de COOK, *et al.*, 2012).

As características de uma formação estabelecem o tratamento para controlar a perda de circulação. A escolha da solução correta depende do entendimento da formação e identificação do tipo e causa da perda de circulação (ALMAGRO, *et al.*, 2014).

Os métodos preventivos incluem medidas como materiais de fortalecimento de poço, seleção do fluido de perfuração e melhores práticas de perfuração, a fim de evitar a ocorrência de perda de circulação, o que nem sempre é possível. O objetivo de tratamentos de fortalecimento do poço é aumentar a tensão circunferencial e assim, aumentar a capacidade do poço de suportar pressões (KUMAR e SAVARI, 2011).

No método corretivo a perda de circulação já está acontecendo e aditivos são adicionados ao fluido de perfuração para controlar a perda (KUMAR e SAVARI, 2011). O presente trabalho utiliza um método corretivo para combater a perda de fluido através de fraturas.

Para controlar a perda de circulação durante a construção de um poço utilizando o método corretivo, uma série de etapas deve ser executada, não bastando apenas selecionar o tipo apropriado de LCM (WHITFILL e HEMPHILL, 2003):

- Análise de estabilidade do poço;
- Modelagem hidráulica para estimar a densidade de circulação equivalente (*equivalent circulating density* - ECD).
- Seleção do fluido de perfuração e do material de LCM para ajudar a minimizar os efeitos na ECD;
- Métodos de monitoramento da pressão durante a perfuração (*pressure while drilling* – PWD).

Normalmente quando o fluido de perfuração é pré-tratado com LCM, contém uma menor quantidade de LCM do que um fluido formulado após a perda de circulação ocorrer. O aumento da ECD para um fluido de perfuração pré-tratado é geralmente menor do que para os fluidos mais carregados de LCM. Além disso, pré-misturando LCM antes de usar ajuda a garantir quantidades próprias e a manter a distribuição de tamanho de partículas (WHITFILL e HEMPHILL, 2003)

Os LCM's podem ser classificados de acordo com a composição, forma geométrica ou características durante a utilização no combate a perda de fluido de perfuração, como pode-se observar na Tabela 2.2 (ALSABA e NYGAARD, 2014).

Como exemplo, pode-se classificar os LCM's como granulares, em formato de flocos, fibrosos e até mesmo uma combinação de diferentes tipos de partículas. O material particulado utilizado neste estudo tem características mais próximas aos LCM's granulares.

Tabela 2.2 - Classificação de materiais utilizados como LCM de acordo com a forma e características

LCM	Características	Exemplos
Granulares	Elevada resistência ao esmagamento	Grafita, cascas de nozes, carbonato de cálcio, gilsonita, bentonita, asfalto e perlita
Flocos	Apresenta graus de rigidez e são capazes de formar uma “esteira” ou “tapete” sobre a face da formação rochosa	Celofane, mica, cascas de algodão, vermiculita e carbonato de cálcio em flocos
Fibras	Possuem a habilidade de se entrelaçar e formar uma espécie de tapete ou peneira, retendo outras partículas e então formar o selante	Fibras de celulose, fibras de <i>nylon</i> , fibras minerais, pó de serra e papel picado
Solúveis em água ou ácido	Possuem a desvantagem de poder causar danos a formação rochosa	Solúveis em ácido: carbonato de cálcio e fibras minerais; solúveis em água: sais
Squeezes	Normalmente utilizados para conter elevadas taxas de perda de fluido em formações fraturadas ou altamente permeáveis; geralmente necessitam de um procedimento especial com o objetivo de forçar as partículas a invadir as zonas de perda de circulação	Ampla faixa de materiais
Hidratáveis ou dilatáveis	São basicamente uma combinação de LCM's com materiais reativos; são ativados tanto por reagentes químicos quanto pelo contato com o fluido de perfuração ou os fluidos presentes na formação.	Polímeros
Nanopartículas	Definidas como partículas sólidas que possuem uma faixa de tamanho variando entre 1 a 100 nm	Sílica, hidróxido de ferro e carbonato de cálcio
Mistura	Mistura de dois ou mais diferentes tipos de LCM resultam num melhor desempenho ao combate a perda de fluido devido às diferentes propriedades que essas misturas apresentam	Ampla faixa de materiais

2.3 Síntese do Capítulo 2

Neste capítulo foram apresentados conceitos importantes para o desenvolvimento do presente trabalho, abrangendo a mecânica dos fluidos e o fenômeno da perda de circulação.

Dentre as regiões de fuga de fluido apresentadas, as fraturas naturais são as de características mais semelhantes ao problema estudado, devido ao plano de fratura representado.

Vários tipos de LCM's também foram apresentados, sendo que o material particulado do presente estudo possui características mais próximas aos de formato granular, que possuem elevada resistência ao esmagamento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentada detalhadamente a unidade experimental utilizada para realização dos testes de escoamento líquido-sólido e formação de leito de partículas.

São apresentados o circuito hidráulico com todos os componentes e as características de cada um e também o projeto e desenvolvimento da seção de testes, de acordo com as considerações e simplificações feitas, além da instrumentação da seção e a caracterização dos instrumentos de medição. O *software* utilizado para monitorar os testes e o sistema de aquisição de dados, que realiza obtenção dos resultados das grandezas mensuradas, também são apresentados.

Com relação à solução fluido-sólido, é abordada a caracterização da composição mistura água-glicerina e do material particulado utilizados nos testes experimentais, assim como a metodologia empregada para realizá-los.

3.1 Circuito experimental

Para realizar os testes experimentais foi realizada uma reformulação na unidade experimental desenvolvida por Stahlke e Fritoli (2014) com base nas hipóteses simplificadoras apresentadas na Seção 1.1, a fim de possibilitar a simulação do escoamento particulado e a formação de leito de partículas em um canal fraturado. A Figura 3.1(a) apresenta o esquema do circuito hidráulico da unidade experimental e a Figura 3.1(b) o projeto tridimensional, destacando os principais componentes.

O circuito experimental é composto por uma seção de testes, uma bomba helicoidal para proporcionar o escoamento, um tanque com misturador acoplado para homogeneizar a solução fluido-sólido, um medidor de vazão mássico coriolis, dois transmissores de pressão e um termopar, além de válvulas e tubulações. Na

sequência serão descritos com detalhes todos os equipamentos e as razões das faixas de operação escolhidas.

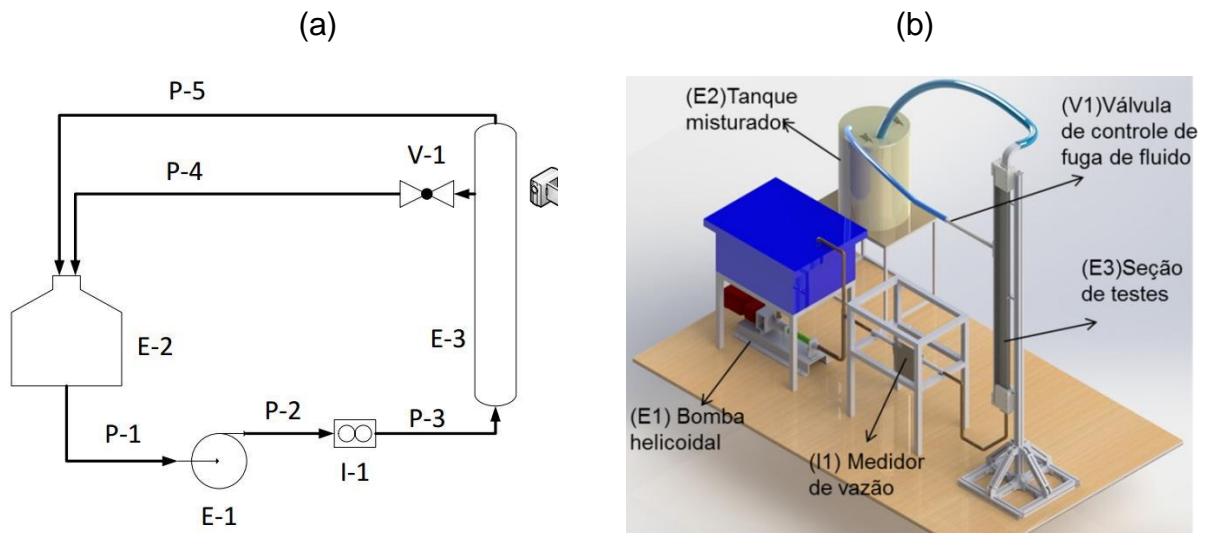


Figura 3.1 - Unidade experimental: (a) esquema do circuito hidráulico e (b) Projeto tridimensional destacando os principais componentes.

A Figura 3.2 representa o circuito experimental completo evidenciando cada componente presente no sistema, descritos na Tabela 3.1.

A unidade experimental consiste em um tanque com misturador (E2) modelo BMIX 1,5 DF (BOMBETEC, 2015), Figura 3.3, que é utilizado para homogeneizar a solução fluido-sólido. A

Tabela 3.2 apresenta as principais características do tanque. O controle da rotação do motor das pás do misturador é feita através de um inversor de frequência da marca Schneider Electric.

No interior do tanque está inserido um termopar (I4) tipo J (THERMOMETRICS, 2013), Figura 3.4, usado para medir a temperatura da solução no momento do teste. O tipo J foi selecionado devido ao baixo custo e a faixa de temperatura que será utilizado (temperatura ambiente). Aferir a temperatura do fluido no momento do teste é muito importante devido à sensibilidade das propriedades da glicerina em função da variação de temperatura. Maiores detalhes sobre a mistura do fluido utilizado serão abordados na Seção 3.5

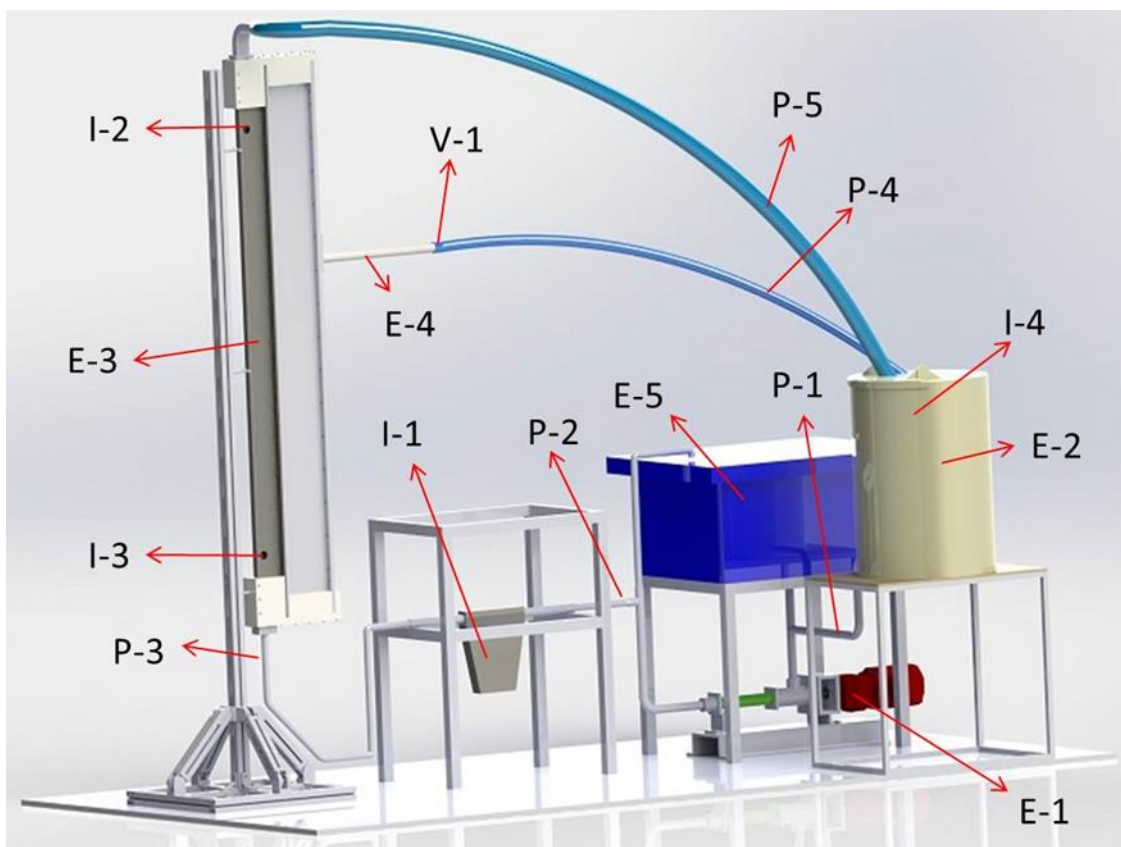


Figura 3.2 - Esquema da unidade experimental com a indicação dos componentes.

Tabela 3.1 - Descrição dos itens do circuito experimental.

Sigla	Descrição
E-1	Bomba Helicoidal
E-2	Tanque Misturador
E-3	Canal da Seção de Testes
E-4	Tubo Representando a Fratura
E-5	Tanque reserva
I-1	Medidor de Vazão Mássica Coriolis
I-2	Transdutor de Pressão Manométrica
I-3	Transdutor de Pressão Manométrica
I-4	Termopar
P-1	Tubulação de sucção
P-2	Tubulação de recalque
P-3	Tubulação de entrada na seção de testes
P-4	Tubulação de saída da fratura
P-5	Tubulação de saída da seção de testes
V-1	Válvula de controle de vazão na fratura

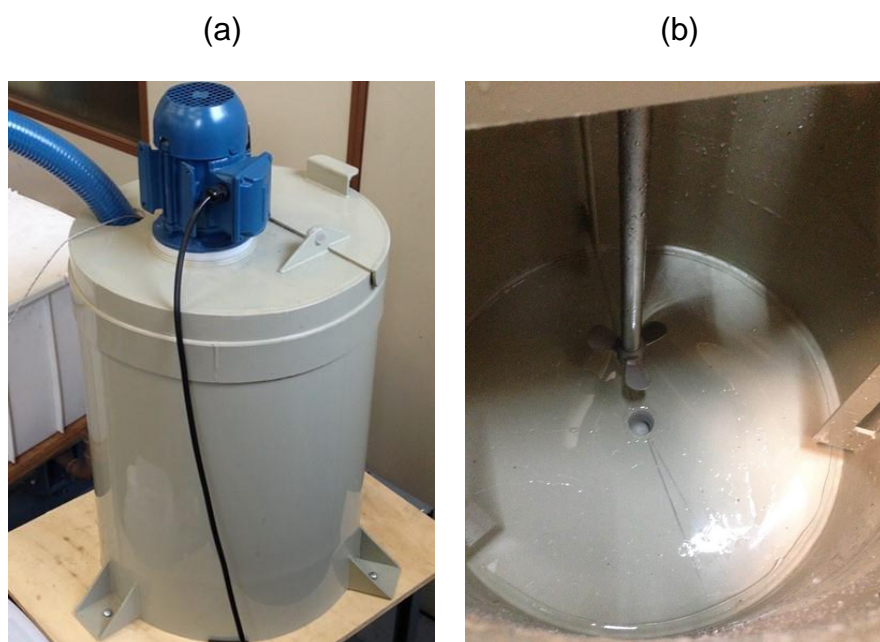


Figura 3.3 – Tanque com misturador (a) Vista exterior; (b) Vista interior com as pás de mistura.

Tabela 3.2 - Características do tanque misturador.

Capacidade	100 l
Potência	0,33CV
Rotação máxima	1750 rpm
Frequência	60 Hz



Figura 3.4 - Termopar tipo J.

Uma bomba helicoidal (E1) modelo NEMO NM 021BY (NETZSCH, 2006), que pode ser visualizada na Figura 3.5, proporciona o escoamento fluido-sólido através

de todo o circuito. As principais características da bomba são apresentadas na Tabela 3.3.

Esta bomba foi selecionada devido a capacidade de trabalhar com soluções com até 10% de material particulado e por não danificar as partículas pelo fato de ser helicoidal. A bomba possui um inversor de frequência da marca Danfoss acoplado ao motor, a fim de se ajustar a vazão desejada.



Figura 3.5 - Bomba helicoidal NEMO NM 021BY.

Tabela 3.3 - Características da bomba helicoidal.

Faixa de vazão	90 a 730 l/h
Pressão manométrica	2,0 bar
Rotação	46 a 278 rpm

Após sair da bomba, antes de chegar à seção de testes, a solução passa por um medidor de vazão mássica tipo Coriolis (I1) modelo RHM-15 (METROVAL, 2007), Figura 3.6, que permite a aferição da vazão mássica em tempo real. A principal razão para a escolha deste modelo foi a possibilidade de trabalhar com o escoamento de material particulado adicionado ao fluido. A Tabela 3.4 apresenta algumas características do medidor de vazão mássica coriolis.

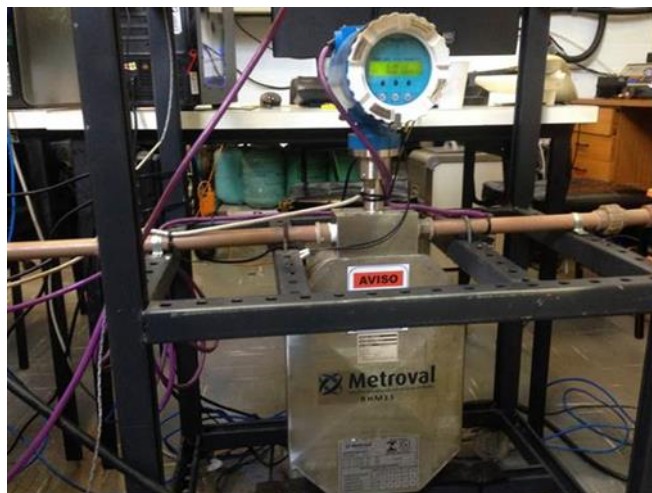


Figura 3.6 - Medidor de vazão mássica Coriolis RHM -15.

Tabela 3.4 - Características do medidor de vazão mássica Coriolis.

ϕ nominal	1"
Sinal de saída	4 a 20 mA
Faixa de medição	4 a 200 kg/min

A seção de testes (E-3) representa a simplificação apresentada na Seção 1.1, considerando um canal na presença de uma fratura discreta. A seção é confeccionada em acrílico para permitir a visualização do escoamento e, principalmente, a deposição de material particulado ao longo da fratura, possibilitando também a captação de imagens da formação de leito. A seção de testes será melhor detalhada na Seção 3.2.

Na seção de testes estão acoplados dois transmissores de pressão relativa (I2 e I3) modelo S-11 (Wika, 2012), Figura 3.7 (a), um próximo à entrada da seção e o outro próximo à saída, acima da fratura, com o objetivo de medir as pressões no local, e avaliar a perda de carga. O posicionamento dos transmissores pode ser visualizado na Figura 3.7 (b). A Tabela 3.5 apresenta as principais características dos transmissores de pressão utilizados.

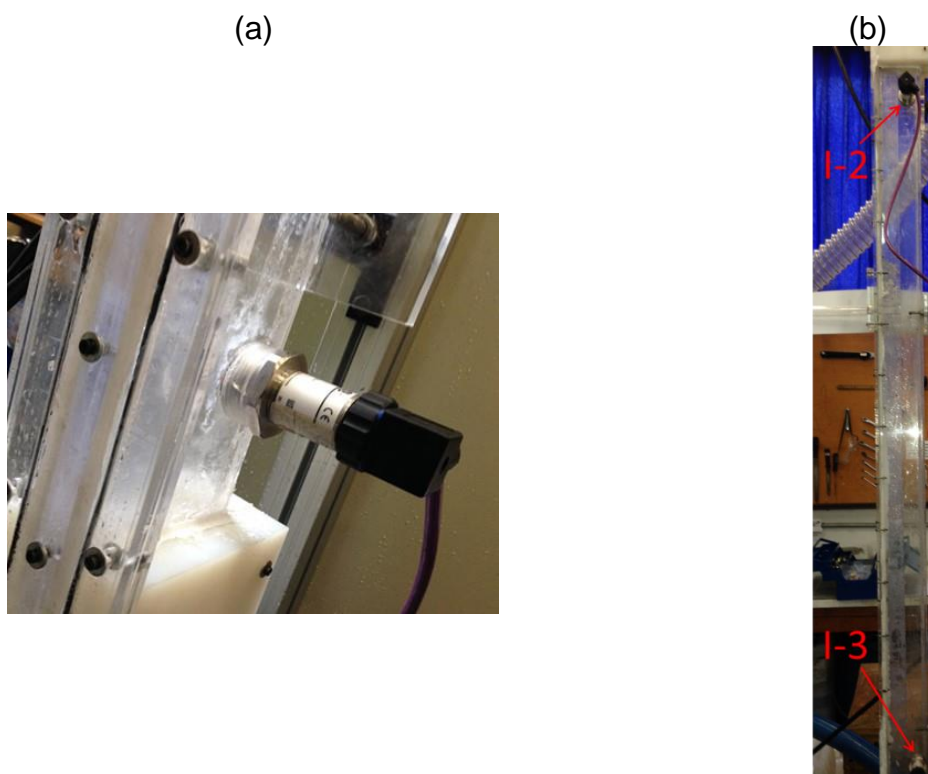


Figura 3.7 – Transmissores de pressão relativa S11: (a) Conectado a seção de testes (b) Posicionamento na seção de testes.

Tabela 3.5 - Características dos transmissores de pressão.

Dados	Relativo superior (I2)	Relativo inferior (I3)
Marca	Wika	Wika
Modelo	S11-04	S11-06
Faixa de operação	0-0,4 bar	0-0,6 bar

As tubulações do aparato experimental (Figura 3.8) são fabricadas em PVC, sendo a de sucção de 32 mm de diâmetro e as de recalque e de entrada na seção de testes de 25 mm de diâmetro. Nas saídas da seção de testes o fluido é redirecionado ao tanque através de duas mangueiras fabricadas em PVC, sendo a encaixada no tubo da fratura (P4) de 2" e a posicionada no bocal superior da seção (P5) de 3". A Figura 3.8 apresenta uma visão geral de todo aparato experimental instalado nas dependências do Laboratório de Meios Porosos (LaMP), do Centro de Pesquisas em Reologia e Fluidos Não Newtonianos (CERNN), da UTFPR.

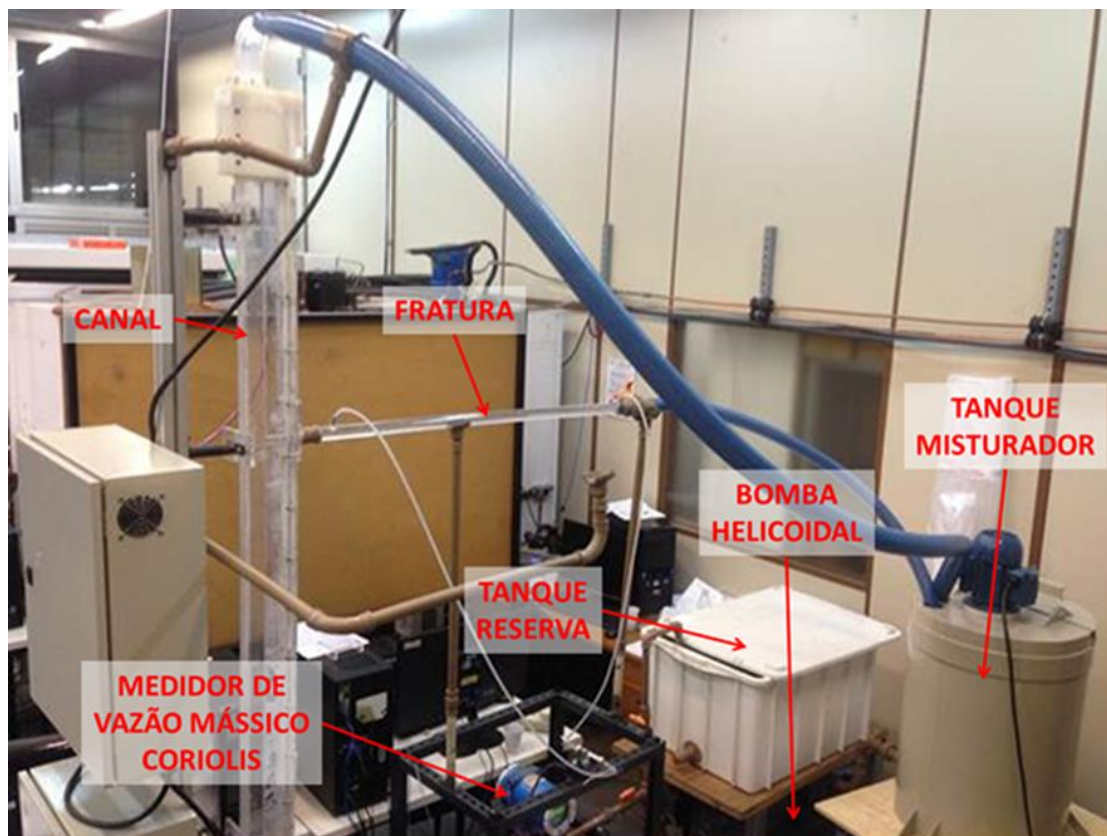


Figura 3.8 - Visão geral do aparato experimental.

3.2 Características da seção de testes

A geometria da seção de testes do aparato experimental foi desenvolvida conforme as considerações apresentadas na Seção 1.1. Despreza-se o escoamento pelo interior da coluna de perfuração levando em consideração para o estudo apenas o escoamento ascendente pelo canal. A formação rochosa é considerada como impermeável e o poço simétrico com uma fratura discreta disposta transversalmente em relação ao canal.

Como condições de contorno consideram-se as pressões na saída do canal e na saída da fratura iguais à pressão atmosférica e a vazão mássica constante na saída da bomba durante a realização de todos os testes.

A seção de testes foi dimensionada e projetada conforme pode ser visualizado na Figura 3.9, que apresenta um corte na região da fratura na vista lateral da seção de testes para destacar o início da descontinuidade no canal.

A largura do canal representa a dimensão da região anular, para uma abertura do poço com diâmetro externo e interno, respectivamente, de 8,5 e 5 polegadas, com base nas dimensões de um poço para uma determinada etapa do processo de perfuração (DE LAI, 2013; CALÇADA *et al.*, 2015).

A Figura 3.10 representa o corte longitudinal da seção de testes, destacando a região (1) como o canal para o escoamento do fluido, a região (2) como a entrada da fratura na matriz sólida, a região (3) como a fratura que atua como caminho preferencial para o fluido, o componente (4) como o flange de conexão da fratura com o canal, que permite a mudança de seção transversal das regiões e o componente (5) como os parafusos de fixação da tampa da seção de testes.

A solução fluido-sólido chega até a seção de testes por uma tubulação de PVC de 25 mm que é conectada à seção de testes, que possui seção transversal 45 x 16 mm, através de um bocal de entrada. O bocal permite a mudança de seção transversal da tubulação para a seção transversal retangular do canal. A Figura 3.11 apresenta diferentes vistas e planos de corte do bocal de entrada da seção de testes.

Após atingir o canal a solução chega até o ponto que contém uma descontinuidade. A fratura está localizada em $y=1,28m$, a partir da entrada do canal, permitindo que o escoamento chegue completamente desenvolvido para os parâmetros utilizados nos testes.

A fratura é representada através de um tubo em acrílico para a visualização do pacote de partículas formado durante o processo de preenchimento. São utilizados três tubos com 1 m de comprimento e diâmetros internos de 16, 20 e 26 mm, conforme pode ser visualizado na Figura 3.12.

A faixa de variação escolhida atende a fraturas encontradas no processo de perfuração (entre 2 e 45 mm). A escolha específica dos diâmetros, além da disponibilidade para compra, abrange satisfatoriamente a faixa de razão entre o canal e a fratura (0,35 a 0,57). O comprimento da fratura é arbitrado e garante que a condição de contorno na saída da fratura não influencia o leito formado.

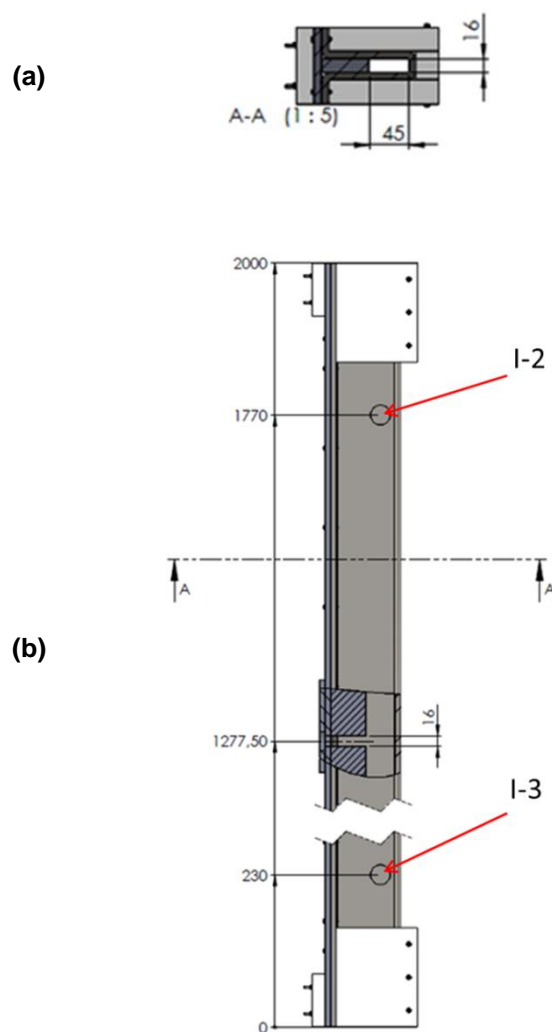


Figura 3.9 - Representação da seção de testes: (a) corte transversal e (b) vista lateral.

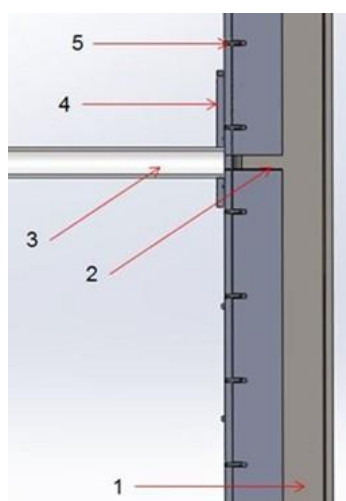


Figura 3.10 - Vista em corte longitudinal da seção de testes.

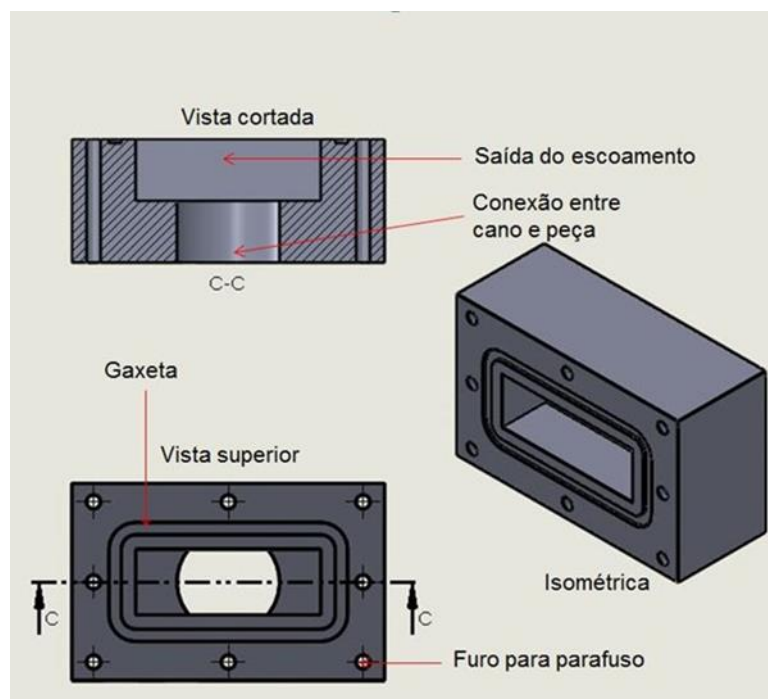


Figura 3.11 - Bocal de entrada da seção de testes

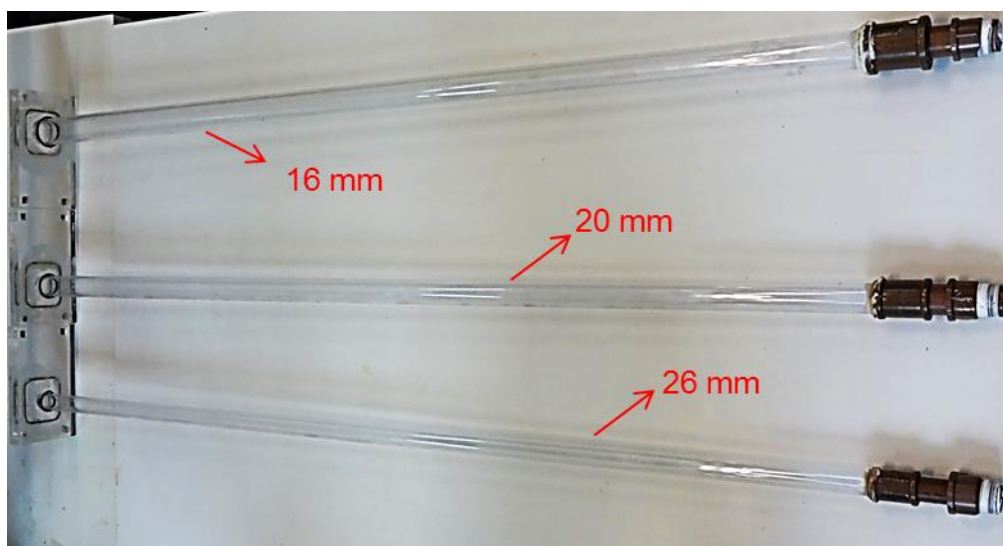


Figura 3.12 – Tubos utilizados para representar a fratura com seus respectivos diâmetros internos.

As fraturas são conectadas ao canal de escoamento através de flanges, Figura 3.13 (a), que possibilitam a mudança de seção transversal circular da fratura para a seção quadrada do canal. Cada tubo possui um flange com o diâmetro externo

correspondente e 15 mm de espessura. A Figura 3.13 (b) apresenta o projeto de um dos flanges.



Figura 3.13 - Flange de conexão da fratura com o canal da seção de testes: (a) posição de montagem e (b) projeto tridimensional.

Para controlar a vazão de fuga de fluido inicial pela fratura, parâmetro muito importante no presente estudo, o aparato experimental possui uma válvula globo posicionada ao final da fratura, que pode ser visualizada na Figura 3.14. A válvula possui marcadores para que seja aberta de $\frac{1}{4}$ em $\frac{1}{4}$ de volta.



Figura 3.14 - Visão geral da fratura com a válvula de controle de vazão de fluido.

A fração da solução que não escoa pela fratura segue no canal até chegar ao bocal de saída da seção de testes. Como pode ser visto na Figura 3.15, a seção transversal do bocal é igual à seção transversal retangular do canal, a fim de evitar

qualquer efeito sobre o escoamento. A Figura 3.15 (a) apresenta a vista isométrica e a Figura 3.15 (b) um plano de corte do bocal de saída da seção de testes.

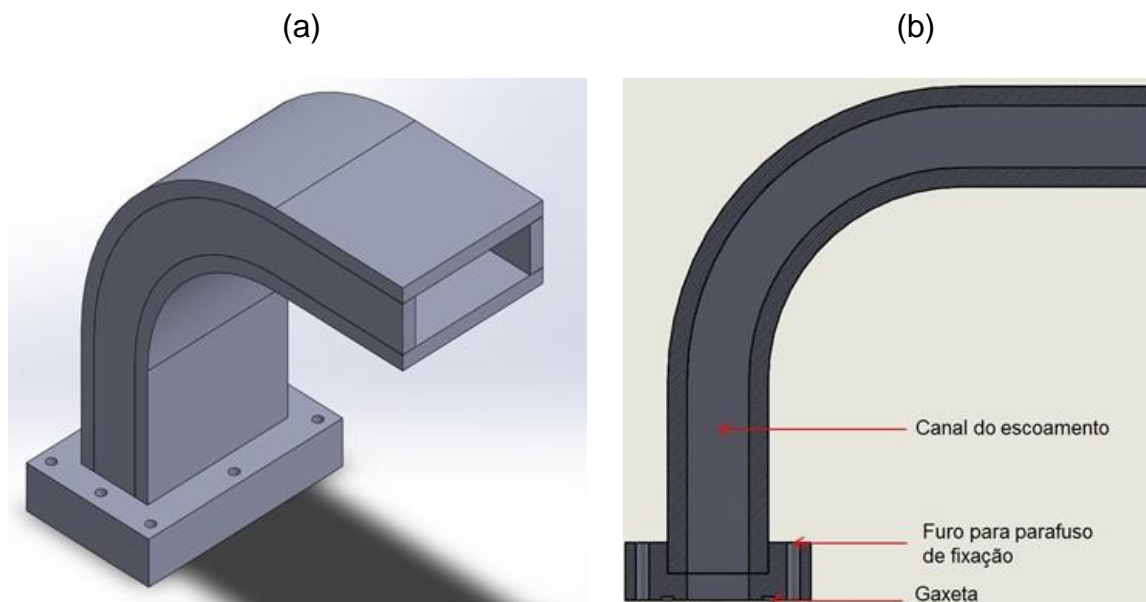


Figura 3.15 – Representação do bocal de saída da seção de testes: (a) vista isométrica e (b) plano de corte.

3.3 Sistema de aquisição de dados

A aquisição dos sinais provenientes dos medidores é realizada por uma placa da National Instruments (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012), instalada no suporte da seção de testes. O sistema é composto por um chassi e três módulos de aquisição de dados. Os módulos são responsáveis por adquirir o sinal proveniente dos equipamentos, enquanto o chassi tem como funções abrigar os módulos e transmitir os sinais a um computador, através de um cabo USB. O chassi utilizado é o modelo cDAQ – 9174, com capacidade para quatro módulos, cujas características são apresentadas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Características dos módulos de aquisição de dados utilizados.

Dados	NI 9219	NI 9211	NI 9205
Sinal de entrada	Universal (Corrente, tensão, ponte, resistência, RTD)	Termopar	Tensão (analógica)
Quantidade de entradas	4	4	32 (16 diferenciais)
Velocidade de aquisição	100/s/canal	14/s	250 k/s

Os dados obtidos são analisados pelos programas LabVIEW (LABVIEW, 2013) e Microsoft Excel. Utilizando uma interface virtual programada, o LabVIEW adquire os sinais de corrente dos equipamentos. A partir das curvas estáticas de calibração obtidas via ensaios é feita a conversão em valores de vazão e pressão. São monitorados os parâmetros de entrada e saída de cada equipamento, a perda de carga na seção de testes e os limites operacionais de trabalho. A exportação de dados para as planilhas do Excel é configurável, destacando-se a possibilidade de ajustar a frequência de gravação. A Figura 3.16 representa o diagrama de blocos programado no LabVIEW, destacando a programação das principais grandezas medidas, e a Figura 3.17 a interface de leitura de dados e controle que permite monitorar em tempo real os valores de pressão relativa na entrada e saída da seção de teste, a vazão mássica na seção de testes e a temperatura do fluido.

O Apêndice B apresenta um orçamento aproximado de todos os gastos envolvidos com o projeto, abrangendo todos os equipamentos, sistema de aquisição de dados, seção de testes, tubulações e materiais diversos.

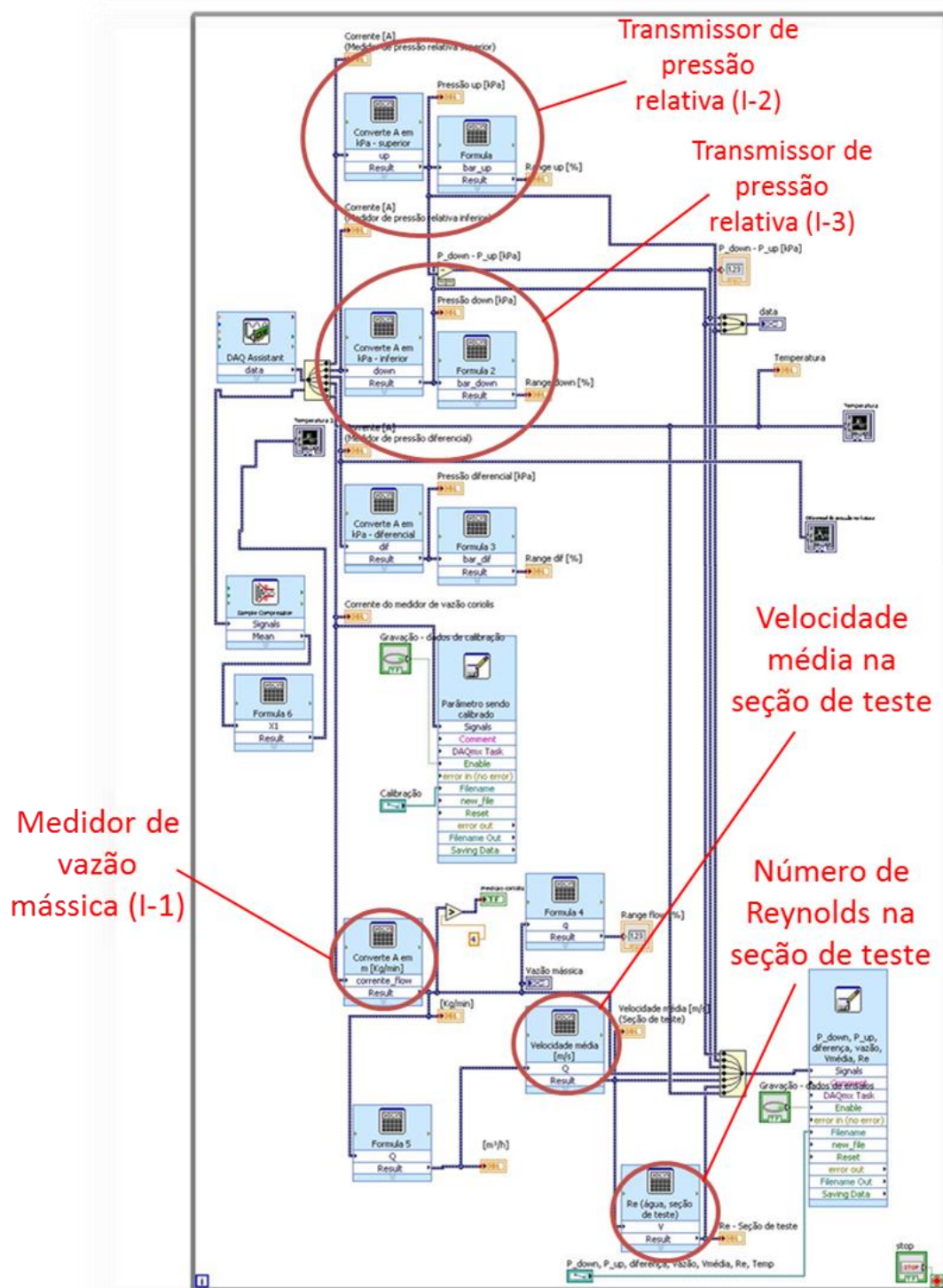


Figura 3.16 - Diagrama de blocos programado no LabVIEW.

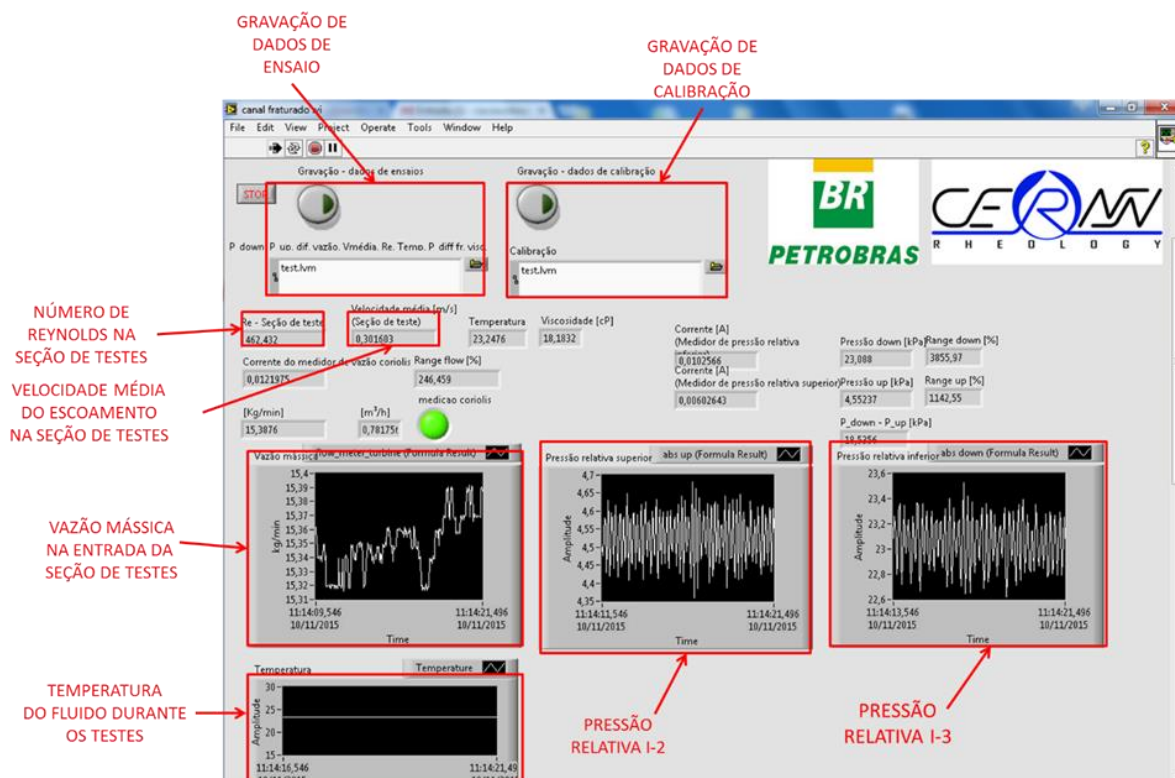


Figura 3.17 - Interface de trabalho, leitura e controle de dados.

3.4 Instrumentos de medição

Nesta seção são apresentados alguns conceitos importantes para o desenvolvimento dos testes experimentais referentes à utilização de instrumentos industriais de medição para mensurar grandezas físicas.

Algumas definições referentes à utilização e calibração de instrumentos de medição, assim como a metodologia empregada para expressão de incertezas experimentais e para rejeição de dados experimentais são apresentados no Apêndice C.

3.4.1 Calibração dos instrumentos de medição

Antes de iniciar a execução de quaisquer testes, os instrumentos de medição foram calibrados para assegurar a validade dos dados obtidos. Procedimento que foi

realizado para os dois transmissores de pressão manométrica e também para o medidor de vazão mássica coriolis.

- Caracterização do medidor de vazão mássica Coriolis

O medidor de vazão mássica Coriolis possui um sistema eletrônico de calibração a partir de um procedimento, apresentado pelo fornecedor, que consiste em preencher o medidor com o fluido a ser utilizado, porém sem escoamento, e dessa forma, o próprio medidor obtém as propriedades necessárias para funcionar com eficácia.

Após a realização desse procedimento, inicia-se a caracterização do instrumento de medição com o objetivo de converter o sinal elétrico enviado do Coriolis para o computador em vazão mássica equivalente. Este processo consiste em manter a bomba fornecendo uma vazão constante durante um minuto, verificar a vazão mássica indicada na tela do equipamento e a corrente elétrica indicada no monitor do computador. Relaciona-se então a vazão indicada pelo medidor com a média dos valores de corrente elétrica indicados no computador a uma taxa de 200 amostras gravadas por segundo.

Com os dados obtidos no ensaio, apresentados na Tabela 3.7, elabora-se um gráfico de dispersão relacionando a corrente elétrica medida com a vazão mássica correspondente, conforme pode ser visualizado na Figura 3.18.

Tabela 3.7 - - Resultados obtidos na caracterização do medidor de vazão mássica coriolis.

Vazão mássica (kg/min)	Corrente elétrica (mA)
0,00	4,00
4,10	6,18
5,75	7,06
6,93	7,69
8,12	8,32
9,29	8,94
10,46	9,56
11,57	10,16
12,53	10,65
30,00	20,00

Utilizou-se do método estatístico de regressão linear para levantamento de uma curva de ajuste de tendência linear relacionando a vazão mássica (y) em kg/min e a corrente elétrica (x) medida em mA, resultando na Eq.(3.1).

$$y = 1,8749x - 7,4817 \quad (3.1)$$

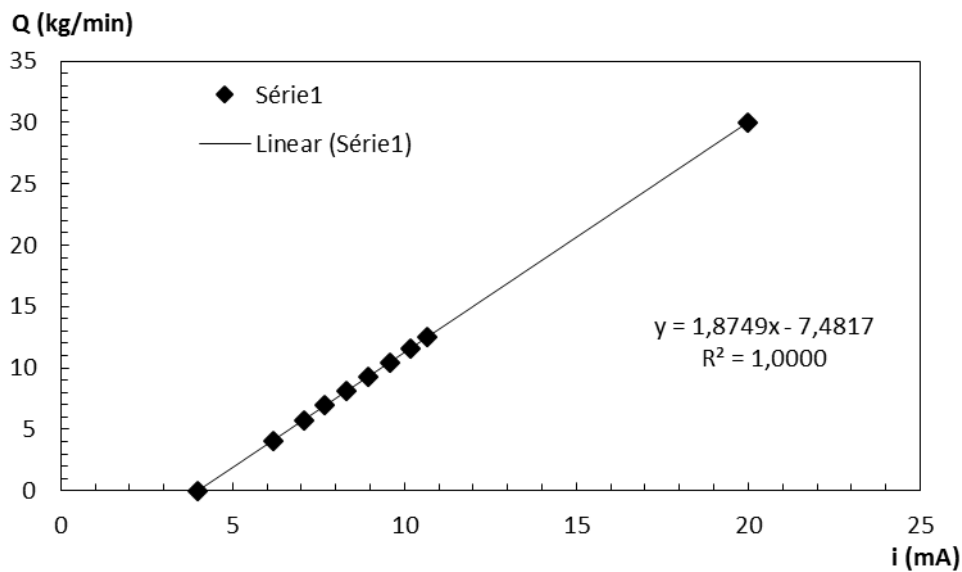


Figura 3.18 - Curva de caracterização estática do medidor de vazão mássica coriolis.

- Caracterização dos transdutores de pressão manométrica

Os transmissores de pressão manométrica utilizados foram calibrados conforme o método de calibração estática apresentado no Apêndice C, com o objetivo de obter a relação entre corrente elétrica e pressão para a leitura dos dados medidos.

Inicialmente, adiciona-se uma coluna d'água no interior do canal e mede-se a altura da coluna para calcular a pressão, relacionando-se a altura de coluna d'água medida com a pressão correspondente a partir da Eq.(3.2), na qual ρ representa a massa específica da água, g a aceleração da gravidade e h a altura de coluna d'água medida.

$$P = \rho gh \quad (3.2)$$

Com o auxílio da interface do programa desenvolvido no LabView, para cada coluna d'água, foram coletados os dados de corrente, oriundos do transmissor de pressão, obtidos durante 60 segundos, a uma taxa de 200 amostras por segundo. Então, calcula-se a média dos valores de corrente elétrica e associa-se com a coluna d'água medida e a pressão correspondente calculada.

A Tabela 3.8 apresenta os valores obtidos para caracterização do transmissor de pressão manométrica I-3, conforme a variação da altura de coluna d'água. A partir destes dados, plota-se um gráfico de dispersão relacionando a corrente elétrica medida com a pressão devido à coluna d'água correspondente, como pode ser visualizado na Figura 3.19.

Tabela 3.8 - Resultados obtidos na caracterização do transmissor de pressão manométrica I-3.

Coluna d'água (mm)	Pressão (kPa)	Corrente elétrica (mA)
10,80	0,11	4,44
15,30	0,15	4,56
21,30	0,21	4,73
24,20	0,24	4,80
38,10	0,37	5,18
49,40	0,48	5,46
57,70	0,57	5,68
62,60	0,61	5,80
73,10	0,72	6,08
79,20	0,78	6,25
91,00	0,89	6,54

A curva de ajuste de regressão linear resulta na Eq.(3.3), que representa a função que relaciona a corrente elétrica (x) medida em mA com a pressão (y) em kPa. O coeficiente de regressão linear R^2 é igual a 1,0000.

$$y = 0,3737x - 1,5568 \quad (3.3)$$

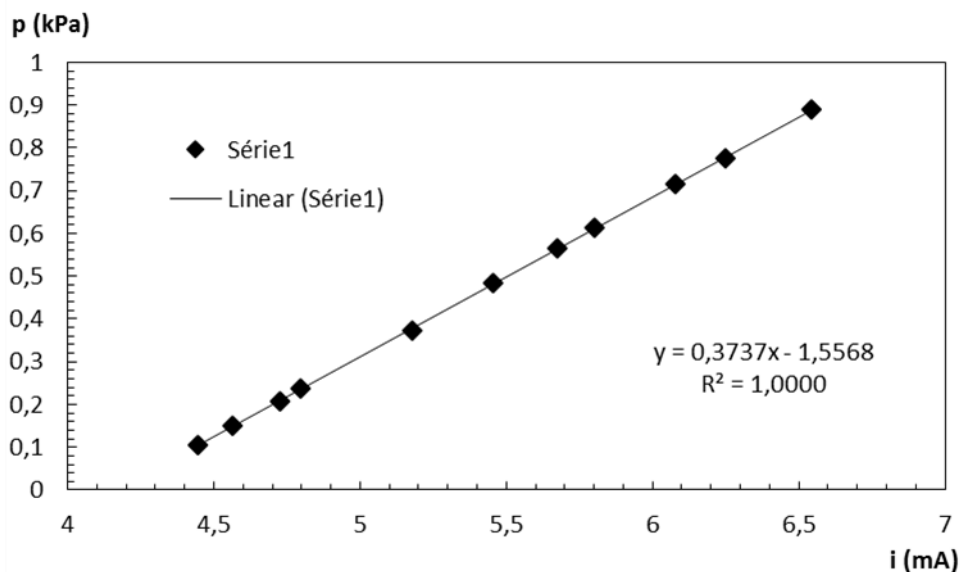


Figura 3.19 - Curva de caracterização estática do transmissor de pressão manométrica I-3.

Efetuada o mesmo procedimento para o transmissor de pressão manométrica I-2 obtém-se, para caracterização estática, os valores apresentados na Tabela 3.9 e o gráfico de dispersão relacionando a corrente elétrica medida com a pressão devido à coluna d'água correspondente representado na Figura 3.20.

Tabela 3.9 - Resultados obtidos na caracterização do transmissor de pressão manométrica I-4.

<u>Coluna d'água (mm)</u>	<u>Pressão (kPa)</u>	<u>Corrente elétrica (mA)</u>
127,00	1,24	4,69
152,00	1,49	4,78
188,00	1,84	4,93
243,00	2,38	5,16
271,00	2,65	5,25

A curva de ajuste de regressão linear resulta na Eq.(3.4), representando a função que relaciona a corrente elétrica (x) medida em mA com a pressão (y) em kPa. O coeficiente de regressão linear R^2 também foi igual a 1,0000.

$$y = 2,4626x - 10,2985 \quad (3.4)$$

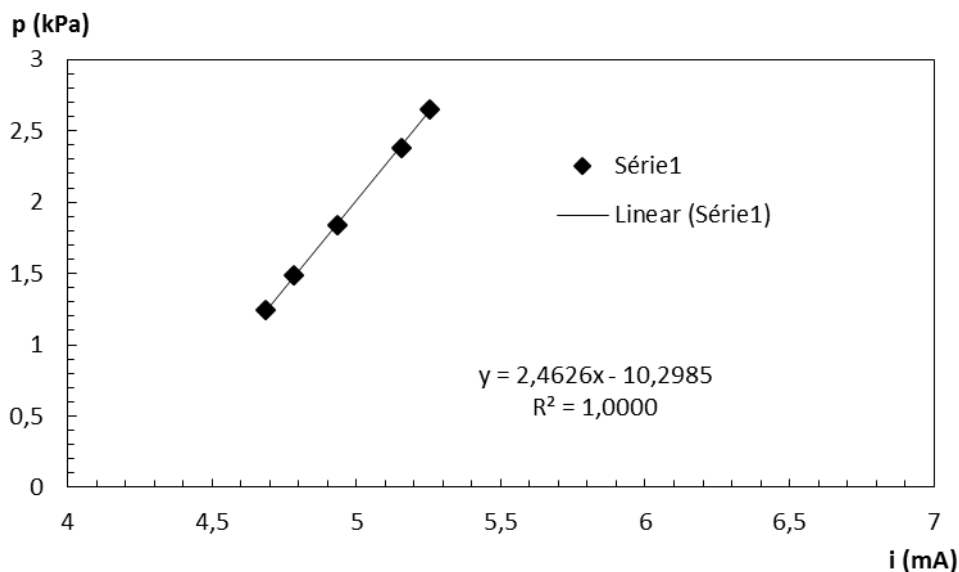


Figura 3.20 - Curva de caracterização estática do transmissor de pressão manométrica I-2.

3.5 Solução fluido-sólido

Antes de iniciar os testes experimentais, a solução fluído-sólido foi preparada no tanque com misturador. Buscou-se obter uma concentração mássica de 70% de glicerina na mistura água-glicerina e uma concentração mássica de material particulado de 3%. Estes valores foram considerados como ideais para analisar a variação dos parâmetros propostos neste trabalho, considerando os testes preliminares apresentados com maiores detalhes na Seção 4.1.

Um cálculo breve foi realizado para definir, aproximadamente, a quantidade, em volume, de água e de glicerina a ser adicionada para atingir a concentração de glicerina desejada. Após a mistura água-glicerina ter sido preparada e devidamente misturada foram realizados testes reométricos para aferir a concentração mássica exata de glicerina na mistura, conforme está descrito na Seção 3.6.

Tendo finalizado a preparação da mistura e tendo conhecimento da massa total da solução, a partir da concentração definida nos testes reométricos, calculou-se a quantidade de partículas, em kg, necessária para se obter 3% de concentração mássica. Utilizando uma balança, adicionou-se o material particulado completando a preparação da solução fluído-sólido.

O material particulado utilizado foi um abrasivo plástico (Urea), que pode ser visualizado na Figura 3.21. A Tabela 3.10 apresenta as propriedades das partículas.

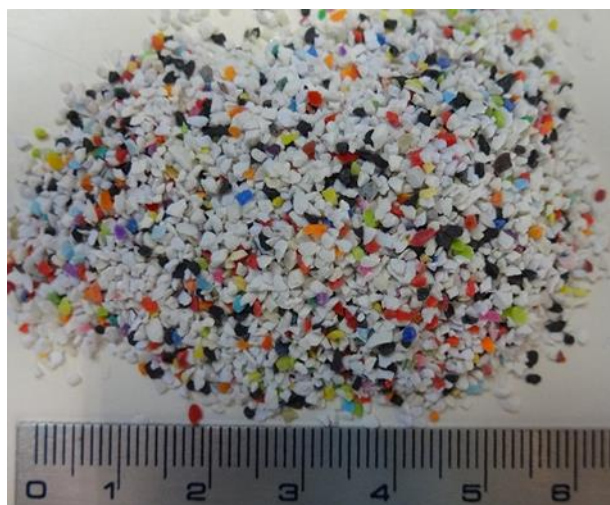


Figura 3.21 – Abrasivo plástico utilizado como material particulado.

Tabela 3.10 - Características das partículas utilizadas nos testes.

Dados	Abrasivo Plástico
Material	Urea
Diâmetro	0,8 < diâm.< 1,2 mm
Massa específica a 25°C	1,5-1,6 g/cm ³
Coloração	Branca mesclada.
Fornecedor	Zirtec

3.6 Ensaios reométricos

Para determinar a viscosidade da solução água-glicerina e, conseqüentemente, a concentração mássica de glicerina presente na mistura, foram realizados testes reométricos utilizando um viscosímetro modelo LV DV-II Pro, Figura 3.22, (BROOKFIELD, 2010).

Para medir a viscosidade da solução 16 ml de fluido, conforme indicação do fabricante, são adicionados ao adaptador UL, Figura 3.23 (a), que é acoplado ao eixo do viscosímetro. O adaptador UL é um adaptador mais indicado para medições de fluidos de baixa viscosidade, como o utilizado no presente estudo. Um banho

termostático modelo RTE-111, Figura 3.23 (b), (NESLAB, 2000) é utilizado para manter a temperatura do fluido constante durante a realização dos testes.



Figura 3.22 - Viscosímetro Brookfield LVDV-II+ Pro.
(Fonte: Adaptado de BROOKFIELD, 2010)



Figura 3.23 – Equipamentos utilizado nos testes reométricos: (a) Adaptador UL; (b) Banho termostático RTE-111.

O viscosímetro funciona com base no torque necessário para rodar o eixo imerso em um fluido. Para determinada viscosidade, a resistência ao escoamento oferecida pelo fluido é proporcional à velocidade de rotação do eixo, e está relacionada com o seu tamanho e geometria. O eixo é conectado ao motor através de uma mola calibrada, cuja deflexão é tomada como parâmetro para o torque ao qual o eixo está sendo submetido (CRUZ, 2012).

O acionamento do viscosímetro e a leitura dos dados são feitos através do software Rheocalc, seguindo os seguintes passos básicos:

- o viscosímetro é zerado acionando o campo indicado como “1” na Figura 3.24;
- o número de rotações realizado pelo eixo do viscosímetro é controlado através do campo “4”;
- quando o torque aplicado, indicado no campo “3” estiver o mais próximo possível de 100%, então a viscosidade dinâmica, indicada no campo “2”, é medida.

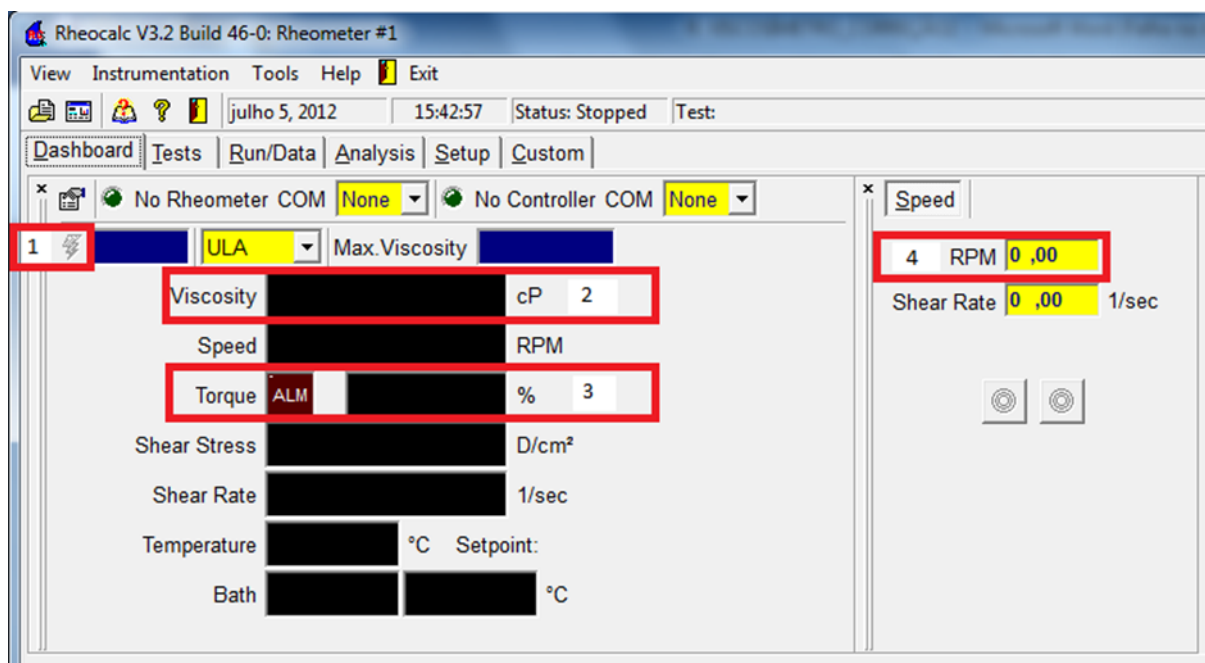


Figura 3.24 - Interface do software Rheocalc para controle do viscosímetro.

Os testes reométricos foram realizados utilizando a metodologia proposta por Cruz (2012), conforme sequência apresentada abaixo:

1. Aquecimento ou resfriamento do banho térmico até a temperatura desejada;
2. Inserção do volume pré-determinado de amostra no copo, e encaixe deste no viscosímetro;
3. Intervalo de uma hora, para que a amostra atinja o equilíbrio térmico;

4. Após o viscosímetro ser zerado, e o eixo ser engatado no rotor, início da medição da viscosidade, através da variação de rotações do eixo.
5. Efetuam-se 15 medições de viscosidade;
6. Descartam-se as cinco primeiras medições, como indicado pelo fabricante.

Os resultados obtidos nos testes reométricos são apresentados na Seção 4.2.

3.7 Testes experimentais

Para realizar os testes experimentais a unidade experimental é iniciada conforme o Procedimento Operacional Padrão CERNN-LAMP-POP001, contido no Anexo B. O tanque com misturador é mantido ligado por cinco minutos para homogeneização da solução e então a bomba é acionada, através do inversor de frequência, para dar início ao escoamento por todo o circuito experimental mantendo-se a válvula na saída da fratura fechada.

A vazão é ajustada até se obter o número de Reynolds desejado, através do acompanhamento em tempo real pelo *LabVIEW*. Uma fórmula foi programada de forma que, conforme a medida da temperatura obtida pelo termopar, a viscosidade correspondente, para a concentração mássica de água em glicerina da solução, é determinada e, conseqüentemente, o valor da viscosidade obtida é inserido no cálculo do número de Reynolds no *LabVIEW*.

Após se verificar visualmente o escoamento homogêneo de material particulado ao longo da seção de testes, a válvula na saída da fratura é aberta, permitindo a fuga de fluido na vazão desejada. O monitoramento dos parâmetros medidos e a filmagem da fratura para acompanhar a formação de leito são iniciados momentos antes da abertura da válvula da fratura.

O processo de preenchimento de partículas na fratura possui uma taxa de deposição que, com o passar do tempo, diminui até uma estabilização do leito. A partir deste instante final do teste, i.e., quando não existe mais entrada de partículas na fratura, podem se definir os parâmetros geométricos do leito formado.

Após o teste ser concluído e as imagens do leito serem captadas, é realizado um procedimento para limpeza do material particulado acumulado na extensão da fratura. Este procedimento consiste em diminuir a vazão proporcionada pela bomba para que apenas fluido, sem partículas, escoe pela seção de testes. A válvula na saída da fratura é mantida completamente aberta, para que todo o escoamento ocorra na fratura, carregando assim todo o material particulado.

Para cada configuração de testes adotada, vazão de fuga de fluido inicial e número de Reynolds, o procedimento foi efetuado três vezes e então, a repetitividade dos parâmetros geométricos dos leitos formados foi visualizada, para verificar a necessidade da realização de mais testes com a mesma configuração.

Realizados os testes para todas as variações nas vazões de fuga de fluido inicial e no número de Reynolds desejadas para determinada espessura de fratura, o tubo foi substituído por outro de diâmetro diferente. Todo o procedimento foi adotado novamente, assim como para o terceiro diâmetro de tubo utilizado.

A Tabela 3.11 apresenta todas as configurações testadas com os respectivos parâmetros adotados em cada uma, diâmetro do tubo da fratura, número de Reynolds no canal e abertura de válvula da fratura.

As imagens captadas dos instantes finais de cada teste escolhido, i.e., uma dentre as três repetições de cada uma das configurações, podem ser visualizadas no Apêndice A.

Tabela 3.11 – Sequência dos testes realizados com seus respectivos parâmetros.

Número do teste	Φ (mm)	Reynolds	Abertura de Válvula (Q_v)
1	20	150	0,25
2	20	150	0,5
3	20	150	0,75
4	20	150	1
5	20	150	1,25
6	20	300	0,75
7	20	450	0,75
8	26	150	0,75
9	26	300	0,75
10	26	450	0,75
11	16	150	0,25
12	16	150	0,5
13	16	150	0,75
14	16	150	1
15	16	150	1,25
16	16	300	0,75
17	16	450	0,75
18	16	300	0,5
19	16	450	0,5
20	20	300	0,5
21	20	450	0,5
22	26	150	0,5
23	26	300	0,5
24	26	450	0,5

3.8 Síntese do capítulo 3

O aparato experimental desenvolvido para realização dos testes experimentais, assim como a razão da escolha e as principais características de cada equipamento foram apresentados.

Os procedimentos de calibração dos instrumentos de medição e a metodologia de execução dos testes foram descritas detalhadamente.

A preparação da solução fluido-sólido e as características do material particulado utilizados na realização dos testes de formação de leite de partículas também foram apresentadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos para os testes realizados. Partindo dos testes preliminares para determinação da solução a ser utilizada para caracterizar a influência dos parâmetros pretendidos, assim como o ensaio reométrico realizado para a determinação da composição da mistura água-glicerina e para os ensaios de formação de leito de partículas.

Para o estudo da formação do leito de partículas, serão variados a espessura da fratura, a vazão inicial de fuga de fluido e o número de Reynolds do escoamento através do canal. A mistura água-glicerina, a concentração de partículas no fluido, o tipo de material particulado utilizado e a geometria do canal não serão alterados ao longo dos testes.

4.1 Testes preliminares

Antes de iniciar os testes variando os parâmetros do objetivo do estudo, foram realizados diversos testes preliminares com o intuito de observar o comportamento da mistura água-glicerina e da adição de partículas.

Primeiramente foram analisados os efeitos da variação da concentração de glicerina na água realizando testes com escoamento apenas no canal, sem a presença de fratura.

Para se determinar as diferentes concentrações mássicas de glicerina, fez-se necessário a determinação das viscosidades dinâmicas através de testes reométricos, conforme procedimento descrito na Seção 3.6.

A partir do valor determinado para a viscosidade e da temperatura utilizada nos testes reométricos, 25°C, foram utilizadas as tabelas de propriedades de fluidos (DORSEY, 1940), apresentadas no Anexo A, para determinar a concentração de água e glicerina presente na solução e a massa específica da mistura. A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 4.1 - Concentração de glicerina em água e massa específica da solução interpolados linearmente pela viscosidade dinâmica obtida.

Viscosidade dinâmica [cP]	Concentração de glicerina em água [%]	Massa específica [kg/m ³]
1,0 (25°C)	0,0	997,1
1,7 (25°C)	22,9	1052,7
2,1 (25°C)	28,5	1067,0
3,4 (25°C)	40,9	1099,4
5,2 (25°C)	50,3	1124,6
7,0 (30°C)	59,3	1146,4
10,0 (25°C)	61,4	1154,8
25,5 (25°C)	73,1	1186,8

A adição de glicerina na água aumenta linearmente a massa específica da solução, como pode ser visualizado na Figura 4.1, que mostra o gráfico plotado através dos valores apresentados na Tabela 4.1.

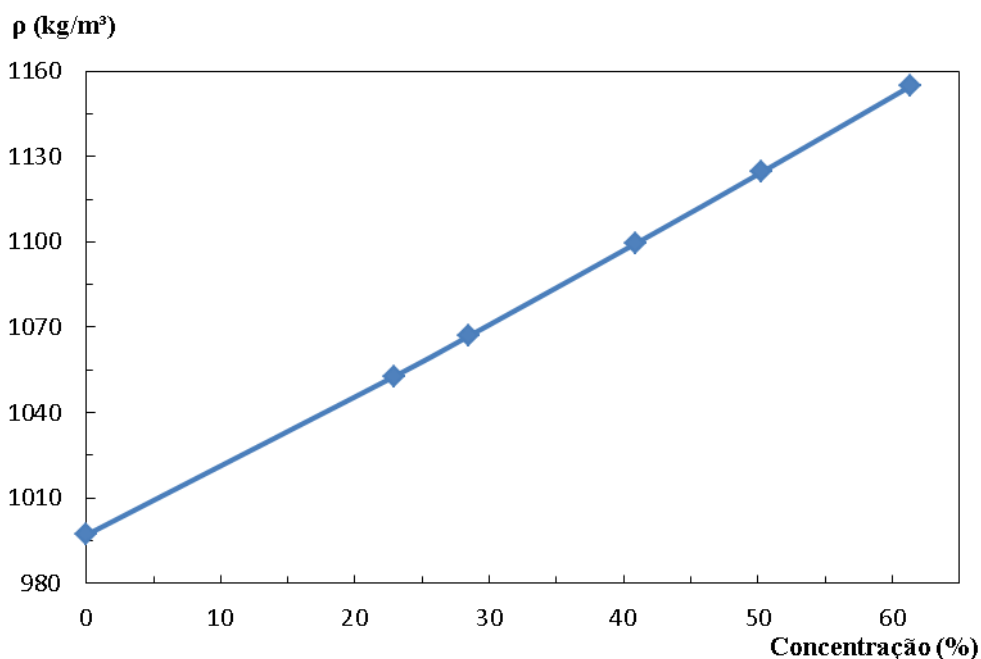


Figura 4.1 - Variação da massa específica com o aumento da concentração mássica de glicerina em água.

A Figura 4.2 compara a curva das viscosidades dinâmicas medidas a 25°C com as apresentadas pela literatura. Fica evidenciado o aumento da viscosidade dinâmica com o aumento da concentração mássica de glicerina em água.

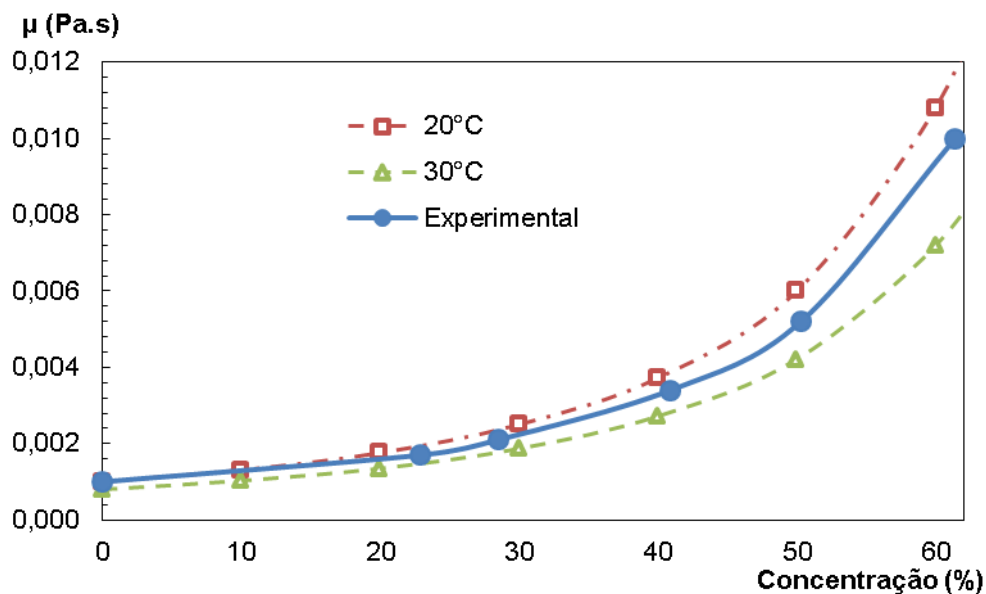


Figura 4.2 - Viscosidade dinâmica em função da concentração mássica de glicerina em água.

Pode-se notar também que para altas concentrações de glicerina em água, a viscosidade dinâmica do fluido apresenta uma maior sensibilidade a variações na temperatura. Por essa razão é importante monitorar a temperatura do fluido durante os testes.

A Figura 4.3 apresenta a variação da temperatura da solução medida dentro do tanque, através do termopar, durante a realização de testes por 30 min.

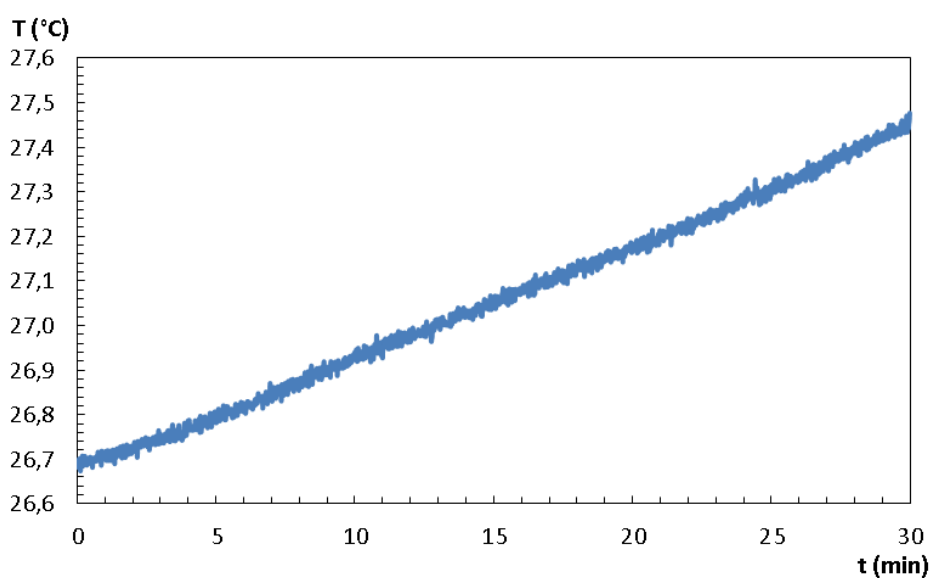


Figura 4.3 - Variação da temperatura ao longo da realização de testes.

Como a temperatura ambiente pode variar significativamente ao longo do dia, a viscosidade do fluido pode ser diferente em dois períodos de testes, impossibilitando a repetitividade dos resultados para um mesmo fluido. A Figura 4.4 mostra, para altas concentrações de glicerina em água, a faixa de variação de temperatura ambiente que o aparato experimental pode estar exposto e a consequente variação na viscosidade da solução.

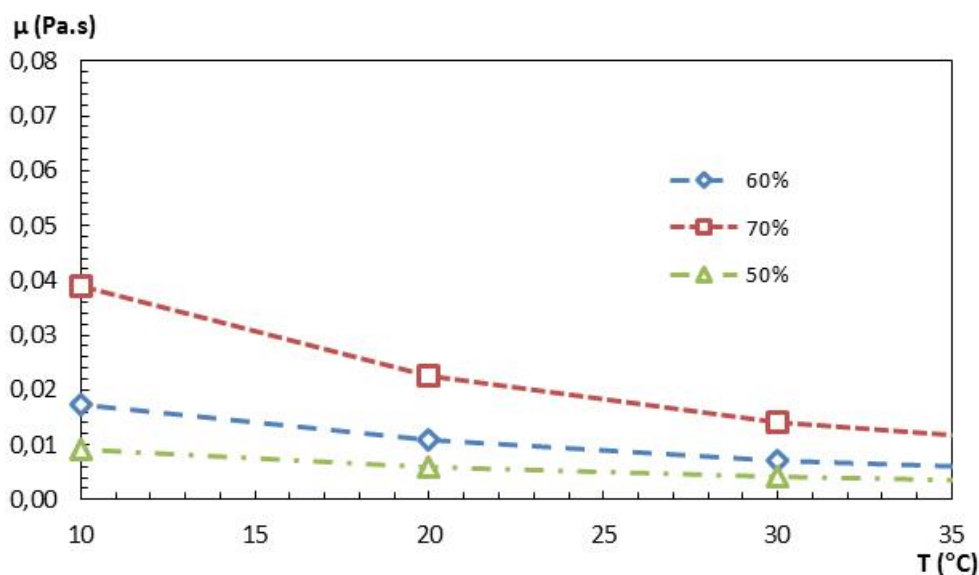


Figura 4.4 - Variação da viscosidade dinâmica em função da temperatura do fluido.

Tendo definido as concentrações utilizadas nos testes preliminares, o número de Reynolds do escoamento no canal foi avaliado, para cada concentração de glicerina em água, em função da vazão mássica do sistema. Nota-se que para altas concentrações de glicerina a faixa de escoamento laminar aumenta em relação à faixa de vazão do sistema, como pode ser visualizado na Figura 4.5.

Outro fator avaliado foi o gradiente de pressão no canal da seção de testes em função da concentração de glicerina em água. O gradiente de pressão é definido como a razão entre a diferença de pressão medida nos dois transdutores e a distância entre o posicionamento dos transdutores, conforme apresenta a Eq.(4.1). Os resultados podem ser visualizados na Figura 4.6.

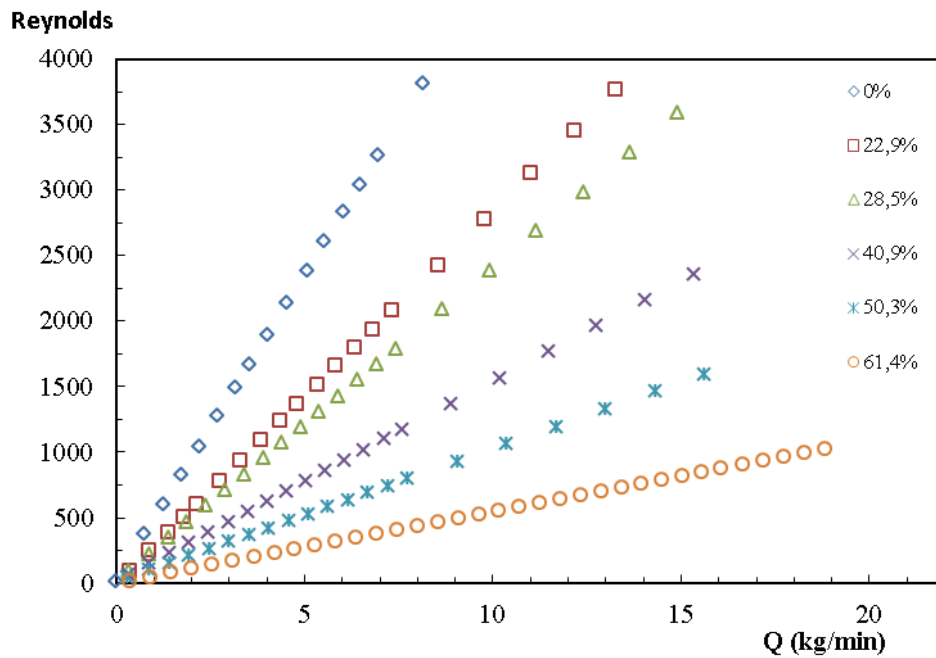


Figura 4.5 - Número de Reynolds em função da vazão mássica para as diferentes concentrações de água-glicerina.

$$\frac{\Delta p}{\Delta x} = \frac{P_{1,3} - P_{1,2}}{1,54} \quad (4.1)$$

É possível observar que o aumento da concentração de glicerina em água, e por consequência da viscosidade dinâmica e da massa específica, resulta no aumento das pressões do sistema.

Também foi obtida a relação do gradiente de pressão para as vazões mássicas fixas de 3, 6 e 12 kg/min, como mostra a Figura 4.7. Pode-se observar um padrão linear na variação do gradiente de pressão com o aumento da concentração de glicerina, isto indica que o valor de viscosidade da mistura é constante, verificando que para a mistura água-glicerina o comportamento do fluido é newtoniano.

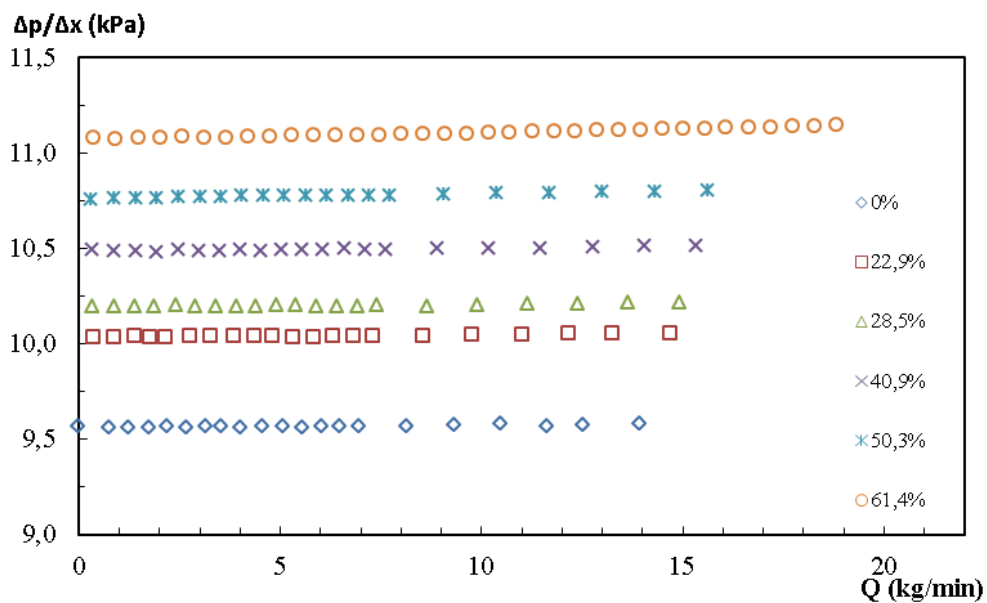


Figura 4.6 - Gradiente de pressão no canal da seção de testes para as concentrações avaliadas.

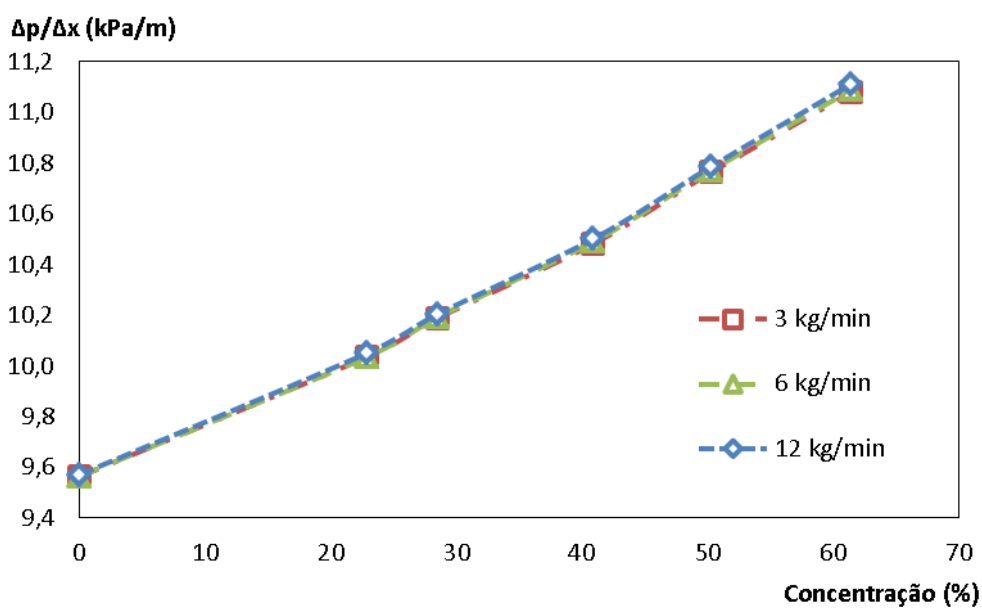


Figura 4.7 - Gradiente de pressão em função da concentração de glicerina em água para vazões mássicas de 3, 6 e 12 kg/min

Após realizados os testes variando a concentração de glicerina, foi adicionado material particulado ao fluido para avaliar a influência que as partículas possuem sobre o escoamento. Como ficou evidente a necessidade de se utilizar altas

concentrações de glicerina em água para o estudo em questão, estes testes foram realizados apenas para a concentração de 73,1% de glicerina em água.

A Figura 4.8 mostra a comparação de duas concentrações de partículas (1 e 2%) para uma mistura de 73,1 % de glicerina em água. Nota-se que aumentando a concentração mássica de material particulado no escoamento tem-se um aumento do gradiente de pressão ao longo da seção de testes.

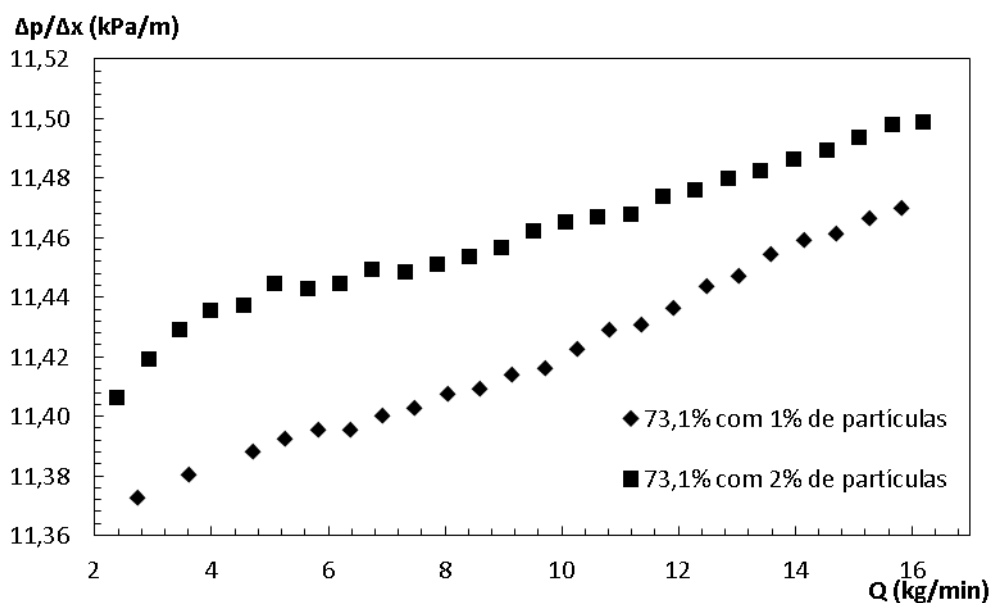


Figura 4.8 - Influência da concentração de partículas sobre o gradiente de pressão para concentração de 73,1% de glicerina em água.

4.2 Caracterização da mistura água-glicerina

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para os testes reométricos realizados em viscosímetro, conforme a metodologia apresentada na Seção 3.6. Estes testes serão utilizados para analisar os processos de preenchimento da fratura no presente trabalho.

É necessária a realização dos testes em viscosímetro para determinar com exatidão a concentração de glicerina em água e assim determinar as propriedades do fluido utilizado nos testes de formação de leito de partículas.

Os resultados obtidos nos ensaios realizados em viscosímetro são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Dados de medições realizadas em viscosímetro com a solução água-glicerina.

Teste	Viscosidade dinâmica (cP)	Rotação (RPM)	Torque (%)	Tensão de cisalhamento (Pa)	Taxa de cisalhamento (1/s)	Banho termostático (°C)
1	16,9	35,5	100	7,34	43,42	25
2	16,9	35,47	99,9	7,33	43,38	25
3	16,89	35,49	99,9	7,33	43,4	25
4	16,9	35,49	100	7,34	43,4	25
5	16,9	35,47	99,9	7,33	43,38	25
6	16,9	35,45	99,9	7,33	43,36	25
7	16,9	35,45	99,9	7,33	43,36	25
8	16,91	35,44	99,9	7,33	43,34	25
9	16,91	35,44	99,9	7,33	43,34	25
10	16,91	35,44	99,9	7,33	43,34	25
11	16,91	35,43	99,9	7,33	43,33	25
12	16,91	35,43	99,9	7,34	43,33	25
13	16,92	35,45	100	7,34	43,36	25
14	16,92	35,41	99,9	7,33	43,31	25
15	16,93	35,4	99,9	7,33	43,29	25

A viscosidade dinâmica média obtida nas medições 6 a 15 é de 16,91 cP, que corresponde a $19,91 \times 10^{-3}$ Pa.s.

Para determinar o valor exato da concentração de glicerina em água, utiliza-se a viscosidade dinâmica média obtida nos ensaios em viscosímetro e a temperatura do banho termostático. A Tabela A.3, contida no Anexo A, apresenta os valores de viscosidade dinâmica da mistura água-glicerina de acordo com a concentração mássica de glicerina em água e a temperatura na qual o fluido se encontra. Com a concentração de glicerina em água determinada, pode-se então definir a massa específica do fluido. A Tabela 4.3 apresenta as propriedades do fluido utilizado nos demais testes experimentais.

Tabela 4.3 - Concentração de glicerina em água e propriedades da solução utilizada nos testes experimentais.

Concentração mássica de glicerina em água (C_G)	Viscosidade dinâmica a 25°C	Massa específica a 25°C
68,9%	$16,912 \times 10^{-3}$ Pa.s	1175,38 kg/m ³

4.3 Formação do leito de partículas

Os testes de escoamento particulado em canal vertical e formação de leito de partículas na fratura foram conduzidos de acordo com a metodologia apresentada na Seção 3.7.

Durante a realização dos testes alguns parâmetros são considerados constantes para todos os ensaios. A Tabela 4.4 apresenta os valores destes parâmetros tanto para a solução fluido-sólido como para a geometria da seção de testes.

Tabela 4.4 – Parâmetros constantes para todos os testes experimentais.

Concentração mássica de glicerina em água	C_G	68,90%
Concentração mássica de material particulado na solução	C_p	3%
Material particulado	-	Grãos de Urea
Comprimento da fratura	L_{FR}	1 m
Espessura do canal	h_{CH}	45 mm
Profundidade do canal	Z_{CH}	16 mm

Os testes de formação de leito de partículas foram conduzidos com escoamento em regime laminar e completamente desenvolvido no momento que o fluido atinge a altura da fratura. Como é observado no escoamento em canal de seção transversal não circular, para o cálculo do número de Reynolds deve ser utilizado o conceito de diâmetro hidráulico, conforme apresentado na Seção 2.1.4. Para o canal da seção de testes o diâmetro hidráulico é de 23,6 mm.

A Tabela 4.5 apresenta o valor calculado para o comprimento de desenvolvimento para escoamento laminar, obtidos através da Eq.(2.9), em função dos três valores de número de Reynolds utilizados na realização dos testes.

Tabela 4.5 - Comprimentos de desenvolvimento em função do número de Reynolds do escoamento no interior do canal.

Re	L_D
150	0,212 m
300	0,425 m
450	0,637 m

Como pode ser visualizado na Figura 3.9, a distância entre a entrada do canal e a posição da fratura é de 1,28 m. Logo, para todos os diferentes números de Reynolds utilizados nos testes, o escoamento atinge a altura da fratura de forma completamente desenvolvido.

A Figura 4.9 apresenta o processo de formação do leito de partículas ao longo do tempo para uma configuração com número de Reynolds igual a 150. Observa-se que em $t=0$ s a fratura está fechada e não existe a presença de partículas na fratura. Em $t=30$ s já pode-se observar o início do processo de preenchimento ao longo da fratura, que conforme o tempo do processo existe uma taxa de deposição das partículas que formam o leito. Observa-se que a partir de um determinado momento o leito não apresenta mudança significativa, o que indica a parada de entrada de partículas na região da fratura. No instante final do teste, i.e., quando não existe mais entrada de partículas na fratura, os parâmetros geométricos do leito formado podem ser definidos.

A Figura 4.10 destaca os parâmetros geométricos de caracterização do leito ao final do processo de preenchimento. As análises dos resultados do processo de formação do leito de partículas são caracterizados a partir da posição inicial de formação $h_{p,i}$, comprimento h_p , altura e_p e tempo de injeção de partículas t_{ip} . A altura do leito é medida pelo percentual do diâmetro do tubo que está ocupado pelo leito de partículas.

É possível observar que existe um anteparo branco posicionado atrás do tubo da fratura a fim de melhorar a visualização do leito de partículas. Este anteparo possui uma marcação de 10 em 10 cm para facilitar a medição do comprimento final do leito, que é realizada a partir das imagens obtidas.



Figura 4.9 - Processo de formação do leito de partículas ao longo tempo para $C_p = 3\%$, $Re = 150$ e $Q_V = 0,75$.

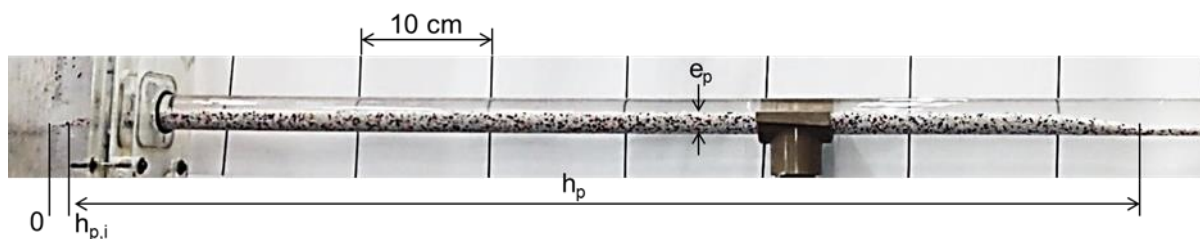


Figura 4.10 - Parâmetros geométricos do leito de partículas.

A Tabela 4.6 apresenta os valores adotados para cada parâmetro variado. No presente trabalho é investigada a influência da espessura da fratura, da vazão inicial pela fratura e do número de Reynolds sobre a formação do leito de partículas no interior da fratura.

Tabela 4.6 - Parâmetros variados para os testes de formação do leito de partículas.

Espessura da fratura	e_{FR}	16; 20; 26 mm
Abertura da válvula de vazão inicial pela fratura	Q_V	0,25 – 1,25
Número de Reynolds	Re	150; 300;- 450

4.3.1 Efeito da variação do diâmetro da fratura

Para caracterizar a influência da espessura da fratura foram utilizados três tubos de um metro de comprimento com diâmetros distintos (16, 20 e 26mm). Os testes foram realizados mantendo-se constantes o número de Reynolds e a vazão de fuga inicial para cada espessura da fratura.

A Figura 4.13 mostra os instantes finais dos testes realizados para um escoamento com número de Reynolds $Re=150$ no canal e vazão de fuga inicial de 1/2 volta de válvula ($Q_v = 0,5$). Os parâmetros geométricos dos leitos formados para estes ensaios são apresentados na Tabela 4.7.



Figura 4.11 - Instantes finais para cada espessura de fratura utilizada no processo de preenchimento para $Q_v = 0,5$ e $Re = 150$.

Tabela 4.7 - Parâmetros geométricos do leito de partículas para $Q_v = 0,5$ e $Re = 150$.

e_{FR} (mm)	$h_{p,i}$ (mm)	h_p (mm)	e_p (%)	t_{ip} (s)
16	18	435	55	115
20	22	255	50	120
26	18	176	82	260

É possível observar que quanto maior a espessura da fratura utilizada menor é o comprimento do leito de partículas, porém maior a altura do leito e o tempo de preenchimento. O aumento da área de escoamento pela fratura proporciona uma maior entrada de partículas que, devido à gravidade, tendem a se depositar mais próximo da entrada do canal, resultando em leitos mais altos e mais curtos.

A Figura 4.12 mostra o gradiente de pressão ao longo do tempo, para cada um dos testes cujos instantes finais foram apresentados na Figura 4.11. Pode-se observar que a variação da espessura da fratura não exerce influência significativa no gradiente de pressão.

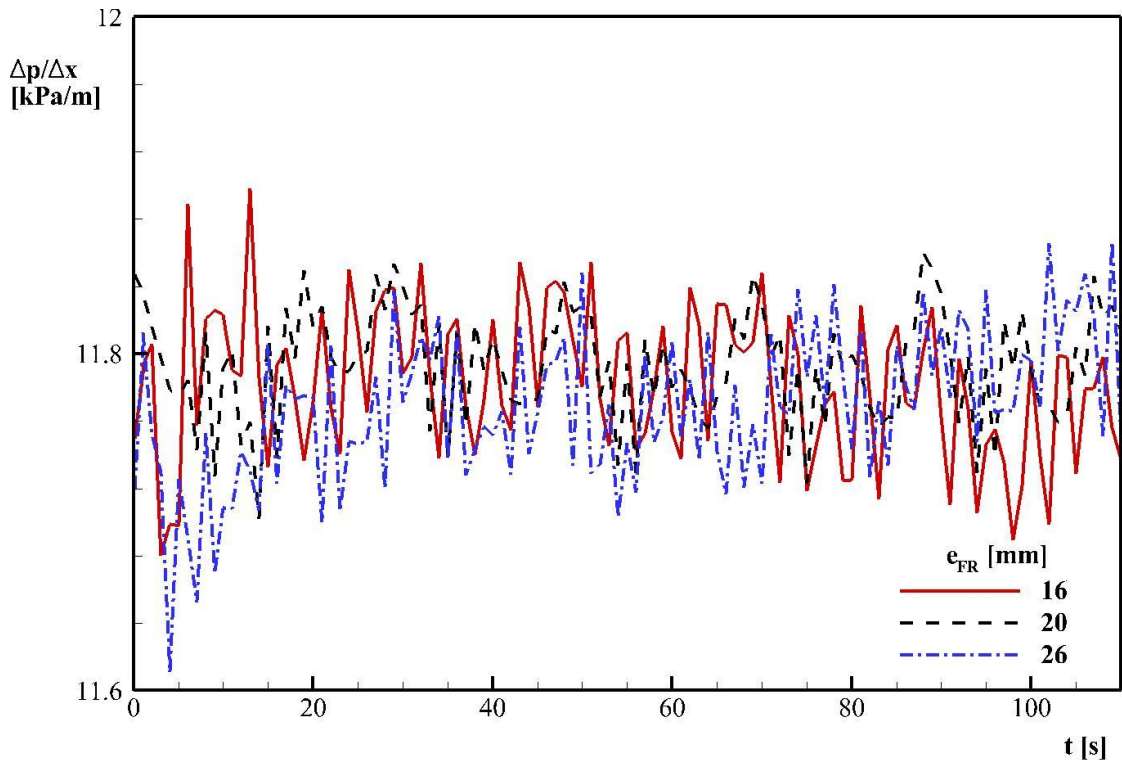


Figura 4.12 - Gradiente de pressão ao longo do tempo para $Re = 150$ e $Q_v = 0,5$.

Para confirmar os resultados obtidos para influência da fratura, uma configuração diferente foi testada, com número de Reynolds $Re=300$ no canal e vazão de fuga inicial de 3/4 de volta de válvula ($Q_v = 0,75$). A Figura 4.13 mostra os leitos obtidos e a Tabela 4.8 apresenta os parâmetros geométricos para esta configuração.

O mesmo padrão é observado, sendo que, para esta configuração, o aumento da altura do leito com o aumento da espessura da fratura fica ainda mais evidente. A Figura 4.14 mostra o gradiente de pressão ao longo do tempo, para cada um dos três testes cujos instantes finais foram apresentados na Figura 4.13.



Figura 4.13 - Instantes finais para cada espessura de fratura utilizada no processo de preenchimento para $Q_v = 0,75$ e $Re = 300$.

Tabela 4.8 - Parâmetros geométricos do leito de partículas para $Q_v = 0,75$ e $Re = 300$.

e_{FR} (mm)	$h_{p,i}$ (mm)	h_p (mm)	e_p (%)	t_{ip} (s)
16	50	-	30	75
20	50	535	45	135
26	50	260	55	210

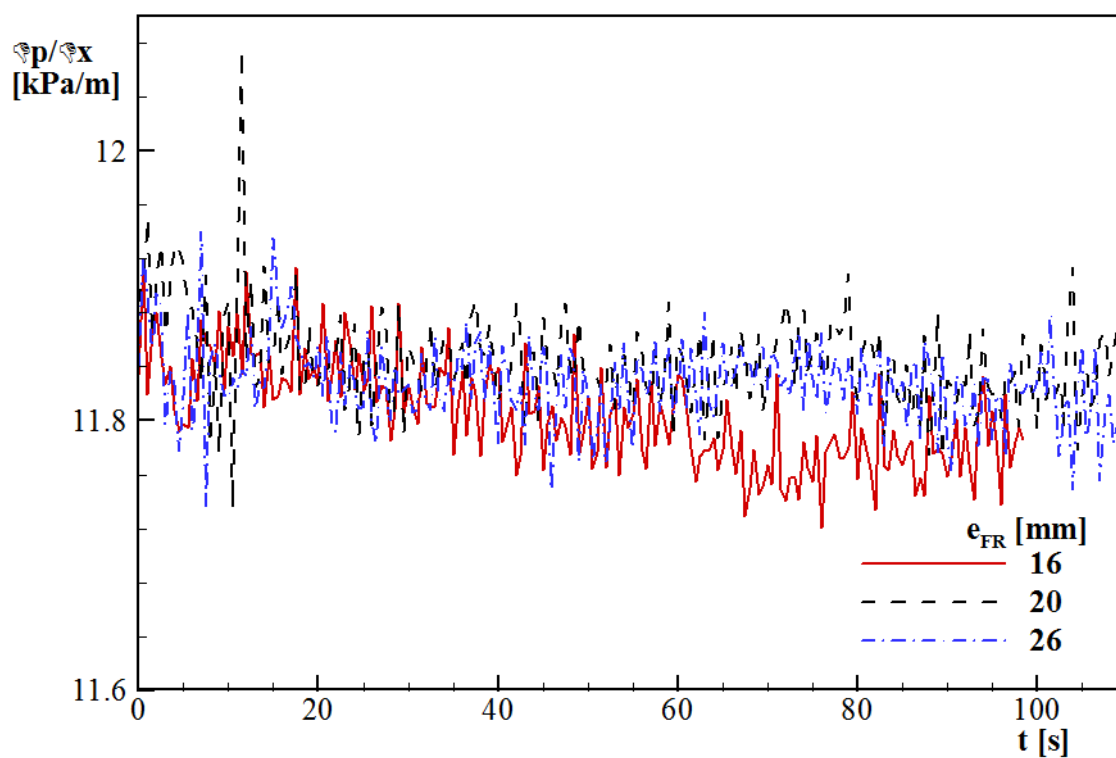


Figura 4.14 - Gradiente de pressão ao longo do tempo para $Re = 300$ e $Q_v = 0,75$.

Mais uma vez pode-se observar que a variação da espessura da fratura não exerce influência significativa no gradiente de pressão, destacando apenas valores levemente mais baixos para a espessura de 16 mm. Ao longo do tempo, cada um dos testes, também não apresenta variação no gradiente de pressão, porém uma perturbação fica evidente no momento em que a válvula ao final da fratura é aberta, próximo aos 10 segundos.

4.3.2 Efeito da variação da vazão de fuga

Para avaliar a influência da vazão de fuga inicial pela fratura o aparato experimental possui uma válvula globo posicionada ao final da fratura. A válvula permite abertura de 1/4 de volta e cinco níveis de abertura da válvula foram comparados para os tubos de 16 e 20 mm, considerando um escoamento com número de Reynolds $Re=150$ no canal.

A Figura 4.15 mostra os instantes finais dos testes realizados, utilizando a fratura de 16 mm para os cinco níveis de abertura, de $Q_v = 0,25$ de volta até $Q_v = 1,25$ na válvula. A Tabela 4.9 apresenta os parâmetros geométricos dos leitos formados para estes ensaios.

É possível observar que quanto maior a vazão de fuga maior é o comprimento do leito formado e também o tempo de preenchimento. Conforme a fratura permite uma vazão de fuga elevada, a velocidade na região de entrada da fratura é maior, permitindo uma maior entrada de partículas.

Com o aumento da velocidade, a inércia do escoamento horizontal estratificado na fratura é maior, proporcionando um maior arrasto do material particulado e fazendo com que o comprimento final do leito de partículas aumente.

Na Figura 4.15, devido à espessura da fratura, não é possível observar o comprimento total dos leitos obtidos com vazão de fuga inicial (Q_v) de 0,75 e 1,0, pois os leitos se estendem além do comprimento total do tubo. Já para $Q_v = 1,25$ ocorre a fuga total pela fratura.



Figura 4.15 - Instantes finais para cada vazão de fuga inicial utilizada no processo de preenchimento da fratura para $e_{FR} = 16$ mm e $Re = 150$.

Tabela 4.9 - Parâmetros geométricos do leito de partículas para $e_{FR} = 16$ mm e $Re = 150$.

Q_v	$h_{p,i}$ (mm)	h_p (mm)	e_p (%)	t_{ip} (s)
0,25	14	335	70	100
0,5	18	435	55	115
0,75	18	-	58	330
1,0	15	-	57	390
1,25	-	-	-	-

A Figura 4.16 mostra o gradiente de pressão ao longo do tempo, para todos os testes mostrados na Figura 4.15, para escoamento com número de Reynolds 150 e utilizando a fratura com 16 mm de espessura.

É possível observar que a variação da vazão de fuga inicial também não exerce influência significativa no gradiente de pressão. Entretanto vale ressaltar o comportamento, ao longo do tempo, das curvas que representam as aberturas de válvula de $Q_v = 1$ e de $Q_v = 1,25$.

A curva representando o gradiente de pressão para vazão de fuga inicial de 1 volta de abertura de válvula ($Q_v = 1,0$), mostra que, após a abertura da válvula, próximo aos 25 segundos, o gradiente de pressão cai drasticamente até não poder mais ser visualizado no gráfico. Pois, inicialmente, o escoamento se dá apenas pela

fratura, não atingindo o transdutor de pressão relativa superior. Após um pequeno intervalo de tempo, próximo aos 30 segundos, o gradiente de pressão volta a subir e atinge um formato semelhante às demais curvas. Com o início da deposição de material particulado na fratura, existe uma restrição à entrada de fluido, fazendo com que o escoamento torne a ser parcialmente pela fratura e parcialmente pelo canal.

Para 1 volta e $\frac{1}{4}$ de abertura de válvula ($Q_v = 1,25$) é possível constatar que o gradiente de pressão cai drasticamente assim que a válvula é aberta, aproximadamente em 15 segundos, e não volta a subir. Neste caso a vazão de fuga de fluido é total pela fratura, não ocorrendo a formação de leito independentemente do tempo para a configuração adotada. Entretanto, para uma configuração de Re diferente, com partículas mais pesadas, pode ocorrer a formação de leito e mesmo assim existir fuga total.

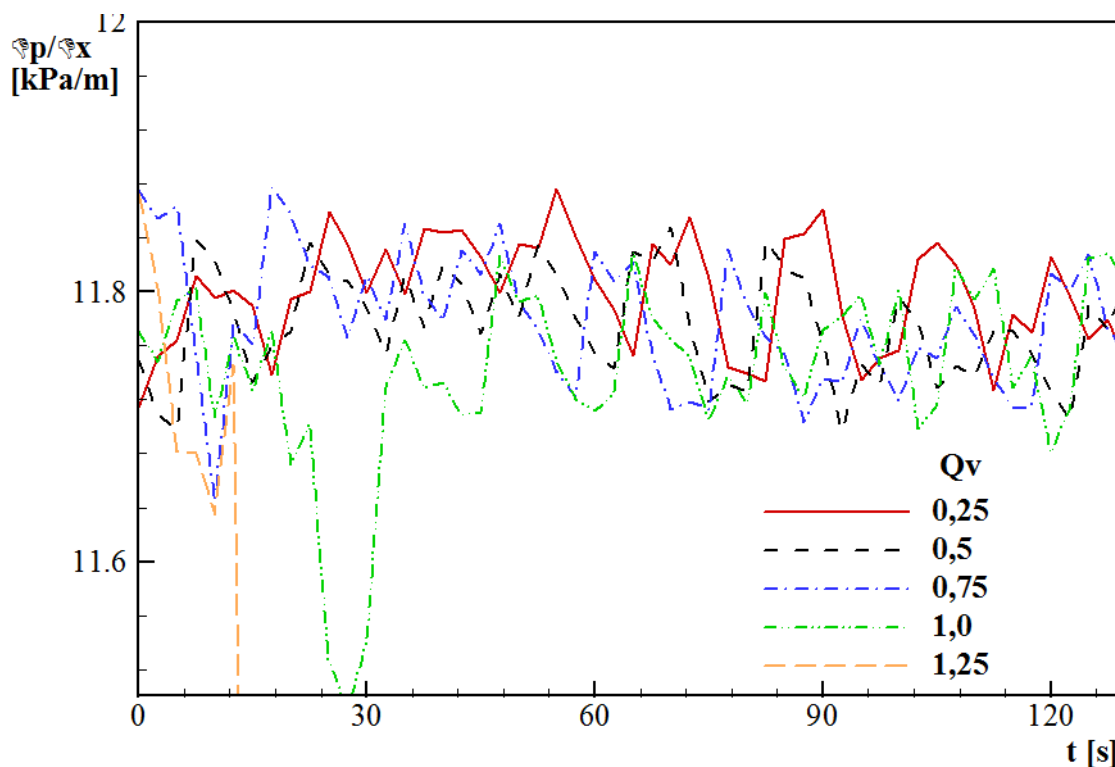


Figura 4.16 - Gradiente de pressão ao longo do tempo para $e_{FR} = 16$ mm e $Re = 150$.

Outros testes, com a mesma variação de vazão de fuga inicial e mesmo número de Reynolds ($Re=150$), foram realizados para a fratura de 20 mm de

espessura, como pode ser visualizado na Figura 4.17. Nesta figura, assim como nos parâmetros geométricos dos leitos, apresentados pela Tabela 4.10, permitem confirmar o aumento do comprimento do leito de partículas com o aumento da vazão de fuga de fluido inicial. Este aumento acontece até uma vazão limite que a partir de um determinado valor ($Q_v = 1,25$ para esta configuração) ocorre a fuga total ou apenas a não formação de leito devido a velocidade do escoamento pela fratura.

Por outro lado, é possível notar tanto na Tabela 4.9 (Figura 4.15) quanto na Tabela 4.10 (Figura 4.17) que, apesar do aumento do comprimento do leito e do tempo de preenchimento, a altura dos leitos dependem da relação da inercia do escoamento horizontal com a quantidade de partículas que entram na região da fratura.

A Figura 4.18 mostra o gradiente de pressão ao longo do tempo, para todos os testes mostrados na Figura 4.17, para escoamento com número de Reynolds 150 e utilizando a fratura com 20 mm de espessura.



Figura 4.17 - Instantes finais para cada vazão de fuga inicial utilizada no processo de preenchimento da fratura para $e_{FR} = 20$ mm e $Re = 150$.

Tabela 4.10 - Parâmetros geométricos do leito de partículas para $e_{FR} = 20$ [mm] e $Re = 150$.

Q_v	$h_{p,i}$ (mm)	h_p (mm)	e_p (%)	t_{ip} (s)
0,25	27	320	65	105
0,5	25	260	58	120
0,75	25	720	60	165
1,0	27	870	64	350
1,25	-	-	-	-

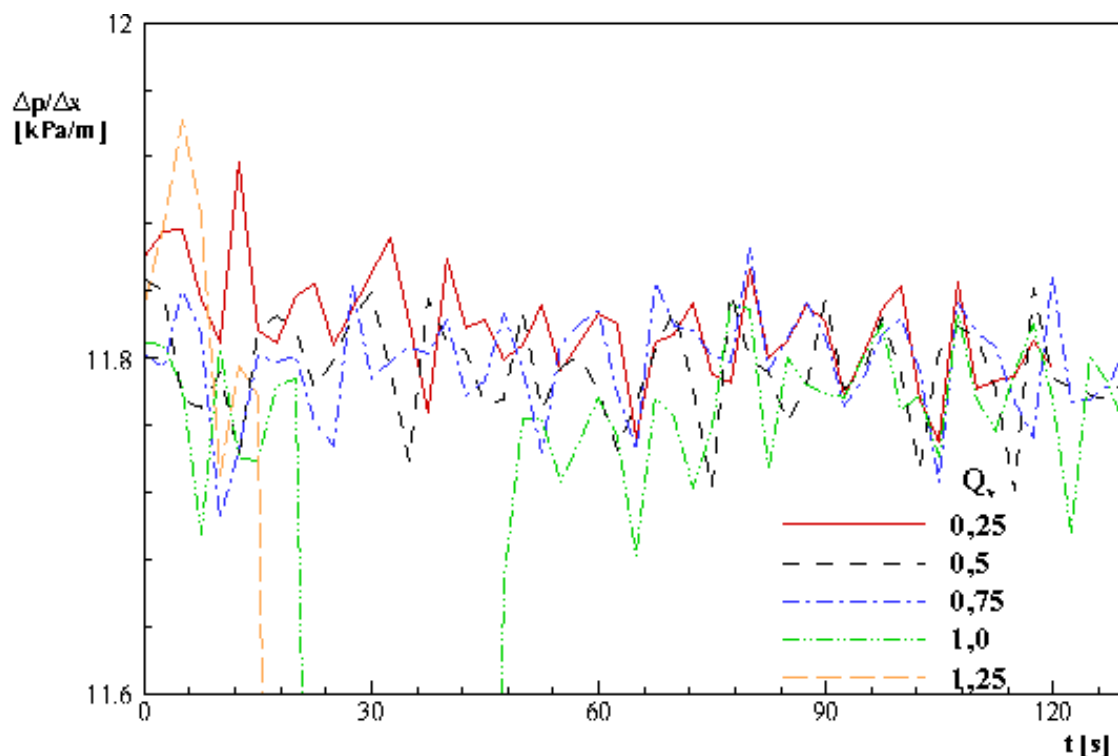


Figura 4.18 - Gradiente de pressão ao longo do tempo para $e_{FR} = 20$ mm e $Re = 150$.

Pode-se confirmar que a variação da vazão de fuga inicial não exerce influência significativa no gradiente de pressão. Vale-se ressaltar o comportamento da curva representando o gradiente de pressão para vazão de fuga inicial de 1 volta de abertura de válvula ($Q_v = 1,0$). Para esta fratura com espessura maior (20 mm), o gradiente de pressão também cai drasticamente, porém leva um tempo maior para retornar a aparecer no gráfico, próximo aos 50 segundos. O aumento da espessura da fratura faz com que seja necessária a entrada de uma quantidade maior de material particulado na fratura para que ocorra uma restrição à entrada de fluido,

fazendo com que o tempo para que o escoamento torne a ser parcialmente pela fratura e parcialmente pelo canal seja mais longo.

4.3.3 Efeito da variação do número de Reynolds

Para observar a influência do número de Reynolds sobre a formação do leito de partículas, foram comparados os leitos formados para três números de Reynolds distintos, utilizando a mesma espessura de fratura e a mesma vazão de fuga inicial.

A Figura 4.19 mostra os instantes finais dos testes realizados, utilizando a fratura de 20 mm de espessura e uma vazão de fuga inicial de $\frac{1}{2}$ volta de válvula ($Q_v = 0,5$), para escoamento no canal com número de Reynolds de 150, 300 e 450. A Tabela 4.11 apresenta os parâmetros geométricos dos leitos formados para estes ensaios.



Figura 4.19 - Instantes finais para cada número de Reynolds utilizado no processo de preenchimento da fratura para $e_{FR} = 20$ mm e $Q_v = 0,5$.

Tabela 4.11 - Parâmetros geométricos do leito de partículas para $e_{FR} = 20$ mm e $Q_v = 0,5$.

Re	$h_{p,i}$ (mm)	h_p (mm)	e_p (%)	t_{ip} (s)
150	25	260	58	120
300	-	-	-	40
450	-	-	-	30

Pode-se observar que com o aumento do número de Reynolds existe uma menor entrada de partículas na região da fratura, isto ocorre devido ao aumento da inércia na região do escoamento vertical no canal. Entretanto, para a configuração apresentada pela Figura 4.19, não houve formação de leito representativa para valores de Re 300 e 450.

A Figura 4.20 mostra os instantes finais de testes realizados com a mesma fratura de 20 mm, porém com uma vazão de fuga inicial maior, $Q_v = 0,75$, a fim de proporcionar uma maior entrada de partículas na região da fratura para a avaliação. A Tabela 4.12 apresenta os parâmetros geométricos dos leitos formados para estes ensaios.



Figura 4.20 - Instantes finais para cada número de Reynolds utilizado no processo de preenchimento da fratura para $e_{FR} = 20$ mm e $Q_v = 0,75$.

Tabela 4.12 - Parâmetros geométricos do leito de partículas para $e_{FR} = 20$ mm e $Q_v = 0,75$.

Re	$h_{p,i}$ (mm)	h_p (mm)	e_p (%)	t_{ip} (s)
150	25	720	60	165
300	50	540	45	135
450	60	240	30	75

Na Figura 4.20 fica evidente, através da altura e do comprimento dos leitos formados, a menor entrada de partículas com o aumento do número de Reynolds, podendo-se observar também que a posição inicial de formação do leito aumenta significativamente com o aumento de Re . O afastamento do início do leito do canal ocorre devido à alta inércia que as partículas também possuem no interior da fratura quando Re é aumentado.

A Figura 4.21 mostra o gradiente de pressão para cada um dos testes da Figura 4.20. Pode-se observar que, quanto maior o número de Reynolds do escoamento no canal, maior também o gradiente de pressão.

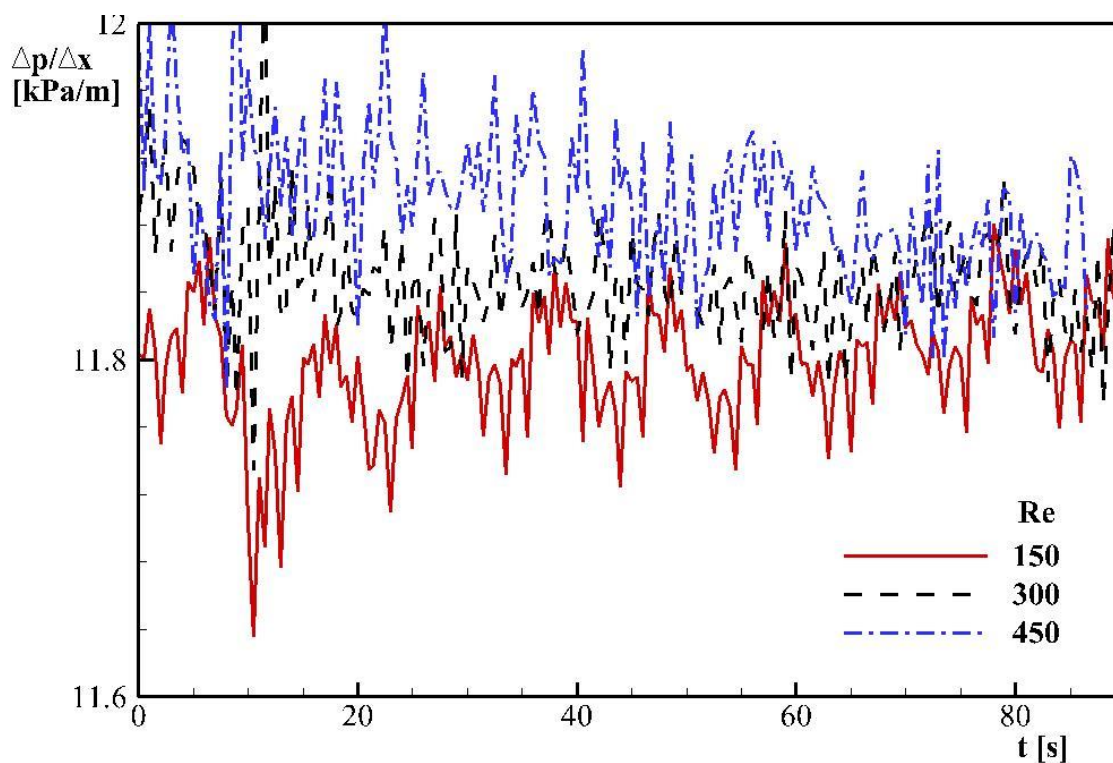


Figura 4.21 - Gradiente de pressão ao longo do tempo para $e_{FR} = 20$ mm e $Q_V = 0,5$.

Outra configuração, Figura 4.22, foi avaliada para uma fratura de maior espessura (26 mm) e vazão de fuga inicial $Q_V = 0,5$. A Tabela 4.13 apresenta os parâmetros geométricos dos leitos formados para estas configurações.

Além de confirmar a formação de leitos mais altos, de comprimento maior e com tempo de formação mais longo para valores mais baixos de número de Reynolds a Figura 4.22 mostra o melhor aproveitamento dentre todos os testes realizados.



Figura 4.22 - Instantes finais para cada número de Reynolds utilizado no processo de preenchimento da fratura para $e_{FR} = 26$ mm e $Q_V = 0,5$.

Tabela 4.13 - Parâmetros geométricos do leito de partículas para $e_{FR} = 26$ mm e $Q_V = 0,5$.

Re	$h_{p,i}$ (mm)	h_p (mm)	e_p (%)	t_{ip} (s)
150	18	176	82	260
300	45	125	40	50
450	60	36	35	40

Destaca-se na Figura 4.22 a configuração de $Re = 150$, $e_{FR} = 26$ mm e $Q_V = 0,5$, que apresentou uma formação de leito com características ideais do ponto de vista de tamponamento de uma fratura, resultando em uma altura de leito mais que 80% da espessura total da fratura, um leito de comprimento de 176 mm e de posição inicial de formação próxima a entrada da fratura (18 mm), representando um resultado efetivo no controle da perda de circulação. Em contrapartida desta configuração está o tempo final para o processo de injeção.

A Figura 4.23 mostra o gradiente de pressão para cada um dos testes da Figura 4.22, confirmando que, quanto maior o número de Reynolds do escoamento no canal, maior é o gradiente de pressão.

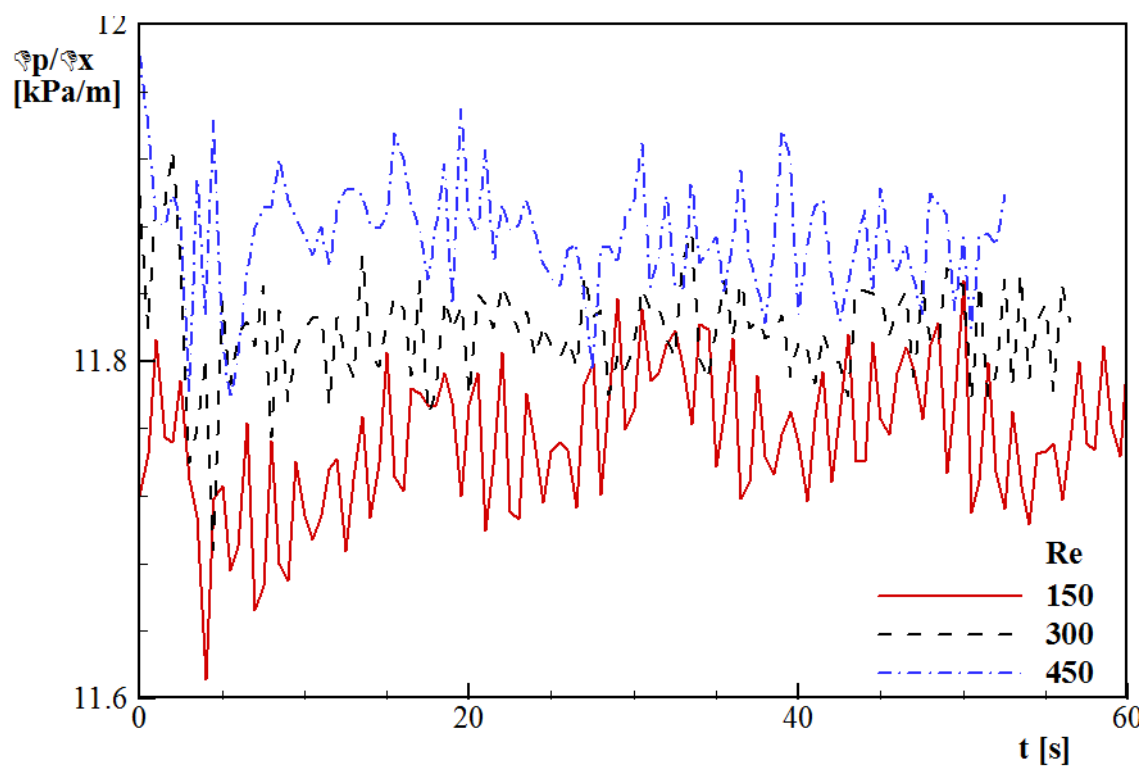


Figura 4.23 – Gradiente de pressão ao longo do tempo para $e_{FR} = 26$ mm e $Q_V = 0,5$.

5 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi apresentada uma proposta de pesquisa e o projeto de reformulação de uma unidade experimental já existente nas dependências do CERNN-UTFPR. A partir da reformulação, foram realizados testes preliminares de escoamento líquido-sólido ascendente pelo canal e testes de formação de leito de partículas em fraturas de diferentes espessuras.

Primeiramente, foram apresentados conceitos básicos referentes à mecânica dos fluidos e definições importantes acerca do fenômeno de perda de circulação e de processos de calibração de instrumentos, visando fundamentar o problema estudado e os resultados obtidos.

Também foram apresentados todos os componentes da unidade experimental utilizada para o desenvolvimento deste trabalho, desde os equipamentos e suas características (bomba, tanque, instrumentos de medição instalados) até a seção de testes e também o fluido e o material particulado utilizado.

Antes de realizar quaisquer testes preliminares, todos os instrumentos de medição foram caracterizados, tendo como objetivo uma maior confiabilidade dos dados obtidos através dos testes. Dessa forma, os valores de vazão mássica e pressão foram ajustados.

Resultados preliminares de escoamento líquido-sólido somente no canal vertical, sem a presença da fratura, foram apresentados a fim de analisar a influência da composição do fluido, água-glicerina, e da concentração de partículas na mistura sobre as pressões mensuradas na seção de testes. A partir destes testes, foi determinada a solução fluido-sólido a ser utilizada nos demais testes de formação de leito de partículas.

Foram realizados então ensaios reométricos, necessários para determinar a viscosidade dinâmica exata da solução água-glicerina utilizada nos testes. A partir da viscosidade dinâmica, foram determinadas também a concentração mássica de glicerina em água e a massa específica da mistura.

Analisou-se então o processo de preenchimento da fratura com a utilização de material particulado variando-se os seguintes parâmetros: espessura da fratura, número de Reynolds e vazão de fuga de fluido inicial pela fratura.

Com a variação da espessura da fratura, constatou-se que o aumento da área de escoamento pela fratura proporciona uma maior entrada de partículas que, devido à gravidade, tendem a se depositar mais próximo da entrada do canal, resultando em leitos mais altos e mais curtos.

Observou-se que quanto maior a vazão de fuga de fluido inicial, maior é o comprimento do leito formado e também o tempo de preenchimento. Com o aumento da vazão de fuga a velocidade na região de entrada da fratura é maior, permitindo uma maior entrada de partículas. Porém, destaca-se a condição de operação com fuga total ou condição que não gera leito, devido à alta inércia do escoamento horizontal pela fratura.

Para a variação do número de Reynolds, verificou-se que valores menores no escoamento vertical no canal proporcionam maior entrada de partículas na fratura, resultando em melhores formatos de preenchimento. O aumento do número de Reynolds resulta no aumento da inércia na região do escoamento vertical no canal, dificultando a entrada de material particulado. Outro fato constatado é o aumento do gradiente de pressão no sistema, que pode ser considerado como um fator restritivo para processos de perfuração, devido à janela de operação de pressão máxima ou pressão de fratura, a qual restringe a aplicação de pressões elevadas no poço perfurado.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

A primeira sugestão apontada remete à instrumentação do aparato experimental. Possibilitar a medição da vazão de fuga pela fratura, transiente ao longo do teste de preenchimento, é de grande importância para poder determinar quantitativamente a eficácia do método proposto para controle de perda de circulação. Uma forma de obter esta vazão seria a instalação de um medidor de vazão posicionado na saída da fratura.

Além do medidor de vazão, transdutores de pressão posicionados na entrada e ao final da fratura, para monitoramento das alterações de pressão na fratura devido à formação do leito de partículas, são de extrema relevância. Tendo em vista que no presente trabalho não foi possível à utilização dos transdutores de pressão disponíveis, pelo fato de possuírem fundo de escala maior do que os valores de perda de carga obtidos na fratura.

Substituir a válvula utilizada atualmente por outra que permita maior controle sobre a vazão de fuga, também seria de grande valia para garantir a repetitividade dos testes com a mesma vazão de fuga inicial. Pode-se utilizar, por exemplo, uma válvula elétrica ou pneumática.

Outra possibilidade de continuação deste estudo seria, também, a utilização de materiais particulados comerciais empregados como materiais de perda de circulação (LCM – *Lost Circulation Materials*) nos testes de formação de leito de partículas. De forma a buscar maior proximidade com a realidade da indústria.

Para tornar o estudo cada vez mais próximo do problema real, a instalação de um meio poroso adjacente ao canal, uma vez que a formação rochosa geralmente é composta por uma matriz porosa, permitiria uma abordagem ainda mais completa do problema da perda de circulação. Com isso, espera-se observar a influência da interface porosa sobre o escoamento no canal, mas principalmente na região próxima a fratura, na qual será possível observar a percolação do fluido do canal no sentido da fratura.

Finalmente, sugere-se também, o estudo de outras formas de perda de circulação, como por exemplo, as formações altamente permeáveis, mesmo sem a presença de fraturas. Com este estudo seria possível analisar o escoamento particulado em meio poroso e, além disso, a deposição de partículas na interface porosa, processo conhecido na indústria petrolífera como formação de torta.

REFERÊNCIAS

ALMAGRO, S. P. B. et al. Sealing Fractures: Advances in Lost Circulation Control Treatments. **Oilfield Review Autumn**, 2014.

ALSABA, M.; NYGAARD, R. Review of lost circulation materials and treatments with an update and classification. **AADE National Technical Conference and Exhibition**, Houston, 2014.

ANDREATTA, L. V. R. **Escoamento em canal parcialmente poroso e fraturado**. Monografia. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2011.

ANSI. **Norma ANSI/ISA-S5.1**, 1992.

Azar, J., & Samuel, G. R. **Drilling Engineering**. Tulsa: PennWell Corporation, 2007.

BARBOSA, M. V. **Análise Paramétrica de Escoamento Particulado Aplicado ao Preenchimento de Fraturas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

BARBOSA, M.V. Numerical Simulation Of Particulate Flow Applied To Fluid Loss Control In Fractured Channels. **Society of Petroleum Engineers**, Macaé, Brasil, jun 2015.

BOMBETEC. Bombetec Bombas Químicas LTDA. **BMX-DF, Agitadores/Misturadores BMIX**. Catálogo Comercial, Diadema, 2015.

BRILL, J. P.; MUKHERJEE, H. **Multiphase Flow in Wells**. 1ª. ed. Richardson: SPE, 1999.

BROOKFIELD. **Brookfield DV-II+ Pro Programmable Viscometer**. Brookfield Engineering Labs. 2010.

CALÇADA, L. A. et al. Evaluation of suspension flow and particulate materials for control of fluid losses in drilling operation. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, n. 131, p. 1-10, Abril 2015.

CHATTERJI, J. et al. Stabilization system consolidates wellbore. **Drilling Contractor**, 1999.

CIPM. **Working Group e Recomendações**. 1981.

CIVAN, F. **A Multiphase Model For Evaluation of Filtration During Drilling and Fracturing of Wells**. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, EUA, 29 Setembro 2002.

COOK, J. et al. Stabilizing the wellbore to prevent lost circulation. **Oilfield Review**, 2012.

CROWE, C. T.; SOMMERFELD, M.; TSUJI, Y. **Multiphase Flows with Droplets and Particles**. CRC Press, 1998.

CRUZ, A. C. B. **Testes de Viscosidade com Óleos e com Água**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 2012.

DATWANI, A. **Review of lost circulation mechanisms with the the the focus on loss to natural and drilling induced fractures**. 2012.

DE LAI, F. C. **Simulação Numérica do Escoamento Particulado para o Preenchimento de Canal Fraturado**. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

DIAS, R. **Análise do escoamento em canais parcialmente porosos e fraturados**. Monografia. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2010.

DIETRICH, P. et al. **Flow and Transport in Fractured Porous Media**. Berlin: Springer, 2005.

DOEBELIN, E. O. **Measurement Systems Application and Design**. 4^a. ed. New York: Mcgraw-Hill College, 1989.

DORSEY, N. E. **Properties of Ordinary Water-Substance**. New York: [s.n.], 1940.

ESTATCAMP. **Análise dos Sistemas de Medição MSA**. 4^a. ed. São Paulo: Consultoria em Estatística e Qualidade, 2010.

ESTERMANN, I. **Methods of Experimental Physics**. New York: Academic Press, v. 1, 1959.

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 7^a. ed. LTC, 2010.

FREUDENRICH, C. **Como funciona a perfuração de petróleo**, 2013. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/25486024/Como-funciona-a-perfuracao-de-petroleo>>. Acesso em: 02 jun. 2015.

GOINS JR, W. C. How to combat circulation loss. **Oil & Gas Journal**, p. 71, Junho 1952.

HALLIBURTON. **The Halliburton Baroid Ecosystem - Lost Circulation**, 2013. Disponível em: <<http://bit.ly/17204oV>>.

Howard, G. C., & Scott Jr., P. An Analysis and the Control of Lost Circulation. **Journal of Petroleum Technology**, Junho de 1951.

INMETRO. **Avaliação de dados de medição - Guia para a expressão de incerteza de medição - GUM 2008**. Rio de Janeiro, 2012.

IVAN, C.; BRUTON, J. **Avoiding Lost Circulation**. E&P, Abril 2005.

JILANI, S. Z. et al. Effect of overbalance pressure on formation damage. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, n. 36, p. 97-109, 2002.

KANG, Y. et al. Constructing a tough shield around the wellbore: Theory and meethod for lost-circulation control. **Petroleum Exploration and Development**, v. 41, n. 4, Agosto 2014.

KOTZ, J. C.; TREICHEL, P. M.; WEAVER, G. C. **Química Geral e Reações Químicas**. 6ª. ed. Cengage Learning, v. I, 2009.

KUMAR, A.; SAVARI, S. **Lost circulation control and wellbore strengthening: looking beyond particle size distribution**. AADE National Technical Conference and Exhibition, Houston, Abril 2011. 12-14.

LABVIEW. **National Instruments: LabVIEW – Help**. 2013.

MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em Sistemas Particulados**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: E-papers, 2002.

MATEX. Matex Control Chemical Corp. **Animated example of loss circulation material DD Xpand**, 2011. Disponível em: <<http://www.matex-ccc.com>>.

METROVAL. Metroval Controles de Fluidos LTDA. **Medidores Mássicos Coriolis**, Nova Odessa, 2007.

NATIONAL INSTRUMENTS. **NI CompactDAQ USB Data Acquisition Systems**, Data Sheet, 2012.

NAYBERG, T. M.; PETTY, B. R. Laboratory study of lost circulation materials for use in both oil-base and water-base drilling muds. **IADC/SPE Drilling Conference**, Dallas, Fevereiro 1986. 10-12.

NESLAB. **RTE Series Refrigerated Bath Circulators**. Thermo NESLAB. 2000.

NETZSCH. Netzsch Fábrica Ind. e Com. Ltda. **BOMBA NEMO BY**, Pomerode, 2006.

Obrzut, L. Q. **Análise experimental de escoamento líquido-sólido para o controle de fuga de fluido em canal fraturado**. Monografia. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

PEKER, S. M.; HELVACI, A. A. **Solid-Liquid Two Phase Flow**. Amsterdam: Elsevier, 2008.

SCHNEIDER, C. L., et al. Estudo Experimental do Preenchimento de Fraturas com Escoamento Particulado em Canal Fraturado. **Encontro Nacional de Hidráulica de Poços de Petróleo e Gás**, Rio Quente, Brasil, ago 2015.

STAHLKE, B. R.; FRITOLI, G. S. **Projeto e construção de bancada experimental para o estudo de escoamento particulado em canal fraturado**. Monografia. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2014.

SUYAN, K.M., BANERJEE, S., DASGUPTA, D. Practical approach for preventing lost circulation while drilling. **Society of Petroleum Engineers**, 2007.

TAYLOR, J. R. **An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements**. 2^a. ed. Sausalito: University Science Books, 1997.

THERMOMETRICS. Thermometrics Corporation. **Revised thermocouple reference tables**, Northridge, 2013.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 2^a. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2004.

WHITE, F. M. **Viscous Fluid Flow**. 2^a. ed. 1991.

WHITFILL, D. L.; HEMPHILL, T. Pre-treating fluids with lost circulation materials. **Drilling Contractor**, 2004.

WIKA. Wika Alexander Wiegang SE & Co. KG. **Flush pressure transmitter for viscous and solids-containing media model S-11**, Klingerberg, 2012.

APÊNDICE A – IMAGENS DOS INSTANTES FINAIS DE CADA TESTE REALIZADO

Neste apêndice são apresentadas as imagens captadas dos instantes finais de cada teste, ou seja, do momento em que o processo de preenchimento na fratura é finalizado, não existindo mais entrada de partículas na fratura. A partir destas imagens, os parâmetros geométricos do leito formado podem ser analisados.

A Figura A.1 mostra todos os leitos formados nos testes realizados com a fratura de 16 mm de espessura, onde foi variada primeiramente a vazão de fuga inicial (Q_v) para um número de Reynolds $Re = 150$ e então foi variado o Re para duas vazões de fuga diferentes $Q_v = 0,75$ e $Q_v = 0,5$.










Re Qv	Instante final do leito de partículas na fratura
150 0,25	
150 0,5	
150 0,75	
150 1	
150 1,25	
300 0,75	
450 0,75	
300 0,5	
4 50 0,5	

Figura A.1 – Instantes finais do leito de partículas para $e_{FR} = 16$ mm.

A Figura A.2 mostra os instantes finais de todos os testes realizados com a fratura de 20 mm de espessura, onde foi adotado o mesmo padrão de variação.

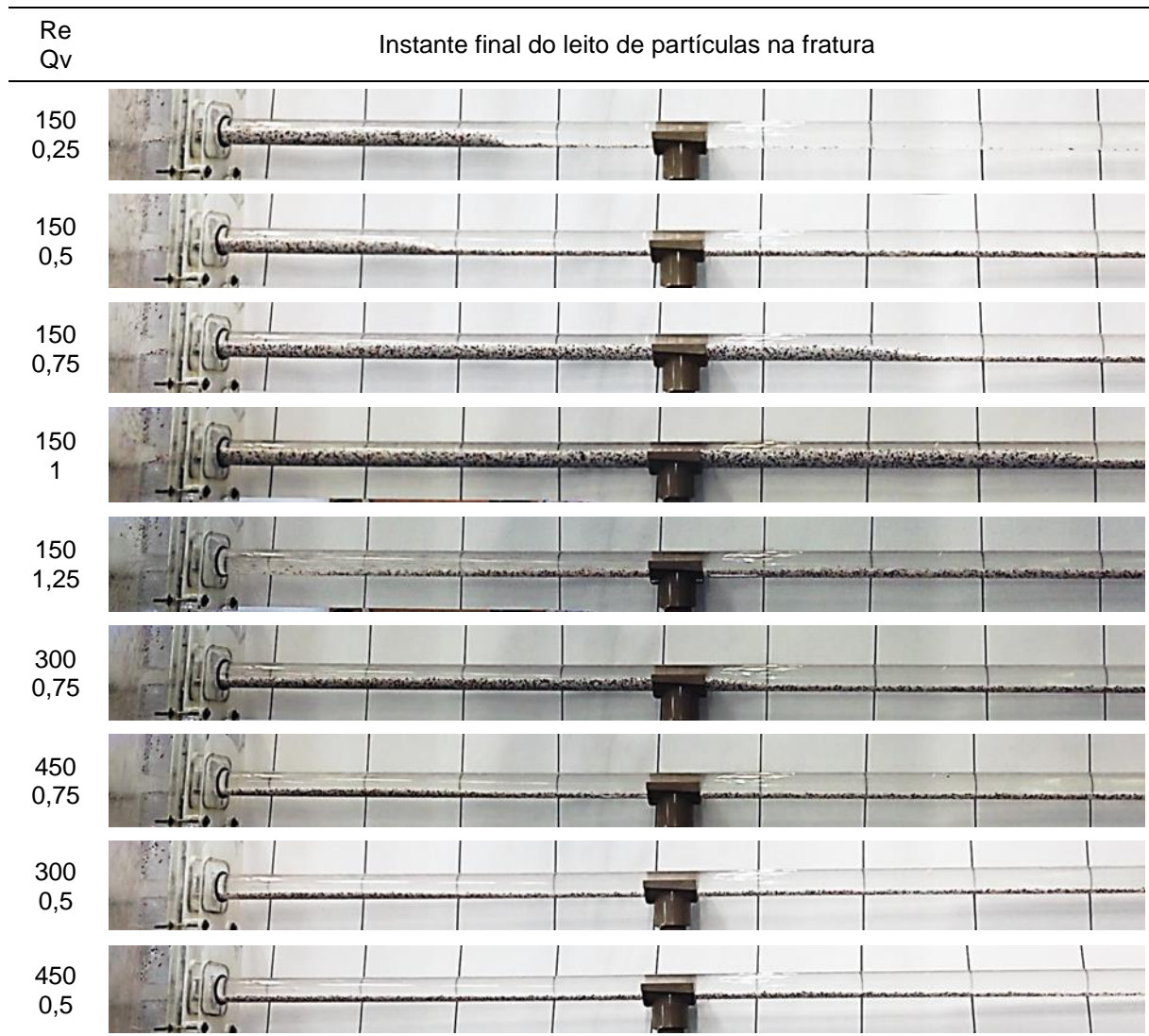


Figura A.2 – Instantes finais do leito de partículas para $e_{FR} = 20$ mm.

A Figura A.3 mostra todos os leitos formados nos testes realizados com a fratura de 26 mm de espessura, onde foi variado o número de Reynolds para duas vazões de fuga diferentes $Q_v = 0,75$ e $Q_v = 0,5$.



Figura A.3 – Instantes finais do leito de partículas para $e_{FR} = 26$ mm.

APÊNDICE B – ORÇAMENTO DOS GASTOS ENVOLVIDOS NA REALIZAÇÃO DO PROJETO

Este apêndice apresenta um orçamento aproximado dos gastos envolvidos com o projeto, abrangendo todos os equipamentos, sistema de aquisição de dados, seção de testes, tubulações e gastos com a solução fluido-sólido. Todos os gastos estão discriminados na Tabela B.1.

Tabela B.1 Gastos envolvidos no desenvolvimento do projeto.

Item	Custo Unitário	Quantidade	Custo Total
Seção de teste	R\$ 4.270,00	1	R\$ 4.270,00
Bomba helicoidal	R\$ 5.000,00	1	R\$ 5.000,00
Tanque misturador	R\$ 3.800,00	1	R\$ 3.800,00
Sistema de aquisição de dados	R\$ 12.500,00	1	R\$ 12.500,00
Medidor de vazão mássica tipo coriolis	R\$ 18.500,00	1	R\$ 18.500,00
Transmissor de pressão diferencial	R\$ 1.800,00	1	R\$ 1.800,00
Transmissor de pressão relativa	R\$ 900,00	2	R\$ 1.800,00
Termopar	R\$ 26,00	1	R\$ 26,00
Glicerina	R\$ 180,00	5	R\$ 900,00
Partículas	R\$ 1.000,00	1	R\$ 1.000,00
Computador	R\$ 5.500,00	1	R\$ 5.500,00
Tubulações e válvulas	R\$ 300,00	1	R\$ 300,00
Tubos em acrílico para fratura	R\$ 300,00	5	R\$ 1.500,00
Custo total do projeto			R\$ 56.896,00

APÊNDICE C – INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Instrumento industrial é todo dispositivo usado para direta ou indiretamente medir e/ou controlar uma variável, incluindo sensores, elementos de controle, dispositivos computacionais e dispositivos elétricos. Podendo ser classificados entre instrumentos de medição (e.g., termômetros, manômetros, medidores de vazão), instrumentos de medição e atuação (e.g., termostatos, pressostatos) e instrumentos de atuação (e.g., válvulas manuais e automáticas, inversores de frequência, bombas) (ANSI, 1992).

Para realizar uma medição, estes dispositivos são capazes de transformar um tipo de sinal em outro. Sinais podem ser classificados em analógicos ou digitais, conforme a natureza do sinal, pois se tratam de informações de estímulo ou resposta.

Estímulo refere-se ao dado de entrada de um instrumento, enquanto que resposta ao dado de saída. Cada instrumento possui uma faixa nominal de utilização que mostra o intervalo de valores que o medidor é capaz de aferir. O maior dos valores absolutos da faixa nominal representa o fundo de escala do instrumento (DOEBELIN, 1989).

Outros conceitos importantes são o de faixa de medição ou faixa de trabalho, resolução e repetitividade. Faixa de trabalho apresenta o intervalo de medição o qual o erro de medição, informado pelo instrumento, se mantém dentro dos limites especificados. Resolução é a menor diferença entre indicações de um instrumento que pode ser significativamente percebida (DOEBELIN, 1989). Repetitividade é a capacidade de um instrumento de fornecer indicações muito próximas, para o mesmo mensurando, sob as mesmas condições de medição e reprodutibilidade tem o mesmo conceito, mas sob diferentes condições de medição (ESTATCAMP, 2010).

- Calibração dos instrumentos

Calibração é um procedimento experimental fundamental que correlaciona valores indicados por um sistema de medição com a correspondente grandeza medida, podendo a caracterização dos instrumentos ocorrer de forma estática ou dinâmica (DOEBELIN, 1989). No presente trabalho a calibração será realizada pela caracterização estática.

Na caracterização estática a determinação da relação entre os dados de entrada e saída do instrumento é feita para condições operacionais em regime permanente, tendo como resultado a curva característica estática, um gráfico com os pontos oriundos dos ensaios de calibração e uma função polinomial que melhor se ajuste aos pontos (STAHLKE e FRITOLI, 2014).

A Figura C. mostra uma curva generalizada de caracterização estática com os pontos provenientes de ensaios em azul e a reta ajustada por regressão linear em vermelho. O conceito de linearidade, em destaque na Figura C.1, é a maior diferença existente entre um ponto da curva de calibração estática e a melhor reta ajustada por regressão linear, no sentido de mínimos quadrados.

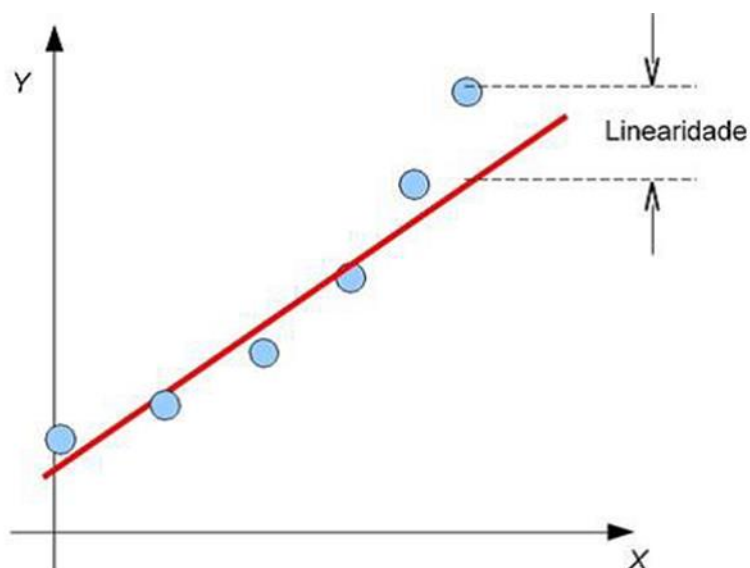


Figura C.1 - Curva estática para um dado instrumento apresentando o conceito de linearidade. (Fonte: STAHLKE e FRITOLI, 2014)

O coeficiente de determinação (R^2) é um parâmetro que varia entre 0 e 1 e mede o quanto um modelo estatístico, utilizado para representar os resultados de

experimentos, se ajusta à amostra de dados coletada. Quanto maior o valor de R^2 de um modelo de regressão linear simples, maior a quantidade da variável dependente consegue ser explicada pela regressão (DOEBELIN, 1989).

- Expressão de incertezas experimentais

A incerteza de medição é um parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser atribuídos ao valor da medida. A incerteza retrata a qualidade de uma medida de forma quantitativa (INMETRO, 2012).

Existem muitas fontes possíveis para incerteza em uma medição, dentre as quais as mais comuns são (ESTATCAMP, 2010):

- a. Definição incompleta da grandeza;
- b. Falhas na definição da grandeza;
- c. Amostragem não-representativa (a amostra medida pode não representar a grandeza definida);
- d. Conhecimento inadequado dos efeitos das condições ambientais sobre a medição ou medição imperfeita das condições ambientais;
- e. Erro de tendência pessoal na leitura de instrumentos analógicos;
- f. Resolução finita do instrumento ou limiar de mobilidade;
- g. Valores inexatos dos padrões de medição e materiais de referência;
- h. Valores inexatos de constantes e de outros parâmetros obtidos de fontes externas e usados no algoritmo para obtenção de dados;
- i. Aproximações e suposições incorporadas ao método e procedimento de medição;
- j. Variações nas observações repetidas da grandeza sob condições aparentemente idênticas.

Uma medição tem imperfeições que originam erro no resultado. Um erro possui dois componentes, um componente aleatório e um componente sistemático.

O erro aleatório se origina de mudanças temporais ou espaciais de grandezas de influência, causando variações em observações repetidas do mensurando. Pode-

se reduzir o erro aleatório aumentando-se o número de observações (INMETRO, 2012).

Já o erro sistemático afeta todos os dados de uma mesma maneira, logo uma mesma correção para toda a amostra é suficiente. Se um erro sistemático se origina de um efeito reconhecido, o efeito pode ser quantificado e, caso seja significativo, uma correção ou fator de correção pode ser aplicado para compensar o efeito (ESTERMANN, 1959).

A norma ISO GUM (2008) propõe a divisão dos componentes de incerteza em dois tipos, "A" e "B". Estas categorias indicam dois métodos diferentes de avaliação da incerteza. A classificação não se propõe a indicar que haja qualquer diferença na natureza dos componentes. Ambos os tipos de avaliação são baseados em distribuições de probabilidade

Uma incerteza-padrão do Tipo A é obtida a partir de uma função densidade de probabilidade derivada de uma distribuição de frequência observada, enquanto que uma incerteza-padrão do Tipo B é obtida de uma função densidade de probabilidade assumida como conveniente e adequada com base no grau de credibilidade de que um evento irá ocorrer. Ambos os tipos de avaliação são baseados em distribuições de probabilidade e os componentes de incerteza resultantes de cada tipo são quantificados por variâncias ou desvios padrão (INMETRO, 2012).

A incerteza-padrão do resultado de uma medição diz respeito à definição estatística de função densidade de probabilidade de uma distribuição de frequência e é o desvio padrão estimado. Quando esse resultado é obtido de valores de várias outras grandezas é denominada incerteza-padrão combinada e designada por u_c (CIPM, 1981).

Para satisfazer as necessidades de algumas aplicações industriais e comerciais, pode ser obtida uma incerteza expandida U pela multiplicação da incerteza-padrão combinada u_c por um fator de abrangência k_p . A incerteza expandida fornece um intervalo em torno do resultado de uma medição que abrange uma grande fração da distribuição de valores atribuíveis ao mensurando. A escolha do fator k_p é baseada na probabilidade de abrangência ou nível da confiança requerido do intervalo (INMETRO, 2012).

Uma vez que neste trabalho as amostras de dados são colhidas a partir dos ensaios, a incerteza padrão é classificada como Tipo A.

- Distribuição normal ou gaussiana

Utilizando a distribuição normal, na qual a maior parte dos valores tende a se concentrar em torno da média aritmética, a probabilidade (P) de que, em uma distribuição com média μ e desvio padrão σ , o valor da observação aleatória seja x pode ser obtida pela Eq.(C.1).

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]} \quad (\text{C.1})$$

A melhor estimativa disponível do valor esperado de uma grandeza x que varia aleatoriamente e, onde n observações independentes x_i foram obtidas, nas mesmas condições, é a média aritmética das n observações, conforme apresenta a Eq.(C.2).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{C.2})$$

O desvio-padrão experimental caracteriza a dispersão dos valores x_i observados em torno de sua média \bar{x} . A estimativa do desvio padrão para amostras finitas é dada por:

$$\sigma = \left[\frac{1}{N} \sum (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \quad \text{para } N > 30 \quad (\text{C.3})$$

$$\sigma = \left[\frac{1}{N-1} \sum (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \quad \text{para } N < 30 \quad (\text{C.4})$$

Para uma distribuição normal de média \bar{x} e desvio padrão σ , a probabilidade de uma medida x_i estar compreendida em uma certa faixa $\pm x_1$ da média é:

$$P(x) = \int_{\bar{x}-x_1}^{\bar{x}+x_1} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} dx \quad (\text{C.5})$$

- Incerteza na medição

Uma notação adequada para uma medição de uma variável deve possuir:

- a melhor estimativa do valor verdadeiro da variável medida;
- uma indicação da magnitude do desvio esperado para esta estimativa, ou seja, a incerteza.

A incerteza experimental é dada pela faixa $\bar{x} \pm k_p \sigma$ onde a média \bar{x} tem a probabilidade de ocorrência relacionada ao valor do fator de abrangência (k_p) escolhido, conforme apresenta a Tabela C.1.

Tabela C.1 - Fator de abrangência relacionado ao nível de confiança.

Nível de confiança p (%)	Fator de abrangência k_p
68,27	1
90	1,645
95	1,960
95,45	2
99	2,576
99,73	3

(Fonte: INMETRO, 2012)

Neste trabalho será utilizado o fator de abrangência igual a 1,96, que corresponde a um nível de confiança de 95%.

- Rejeição de dados experimentais

Algumas vezes, uma medida de uma série de medições parece diferenciar significativamente de todas as outras medidas. Quando isso acontece deve-se decidir se esta medição tem de ser descartada. Um critério que auxilia na decisão sobre a rejeição ou não de um determinado ponto experimental é o critério de Chauvenet. (TAYLOR, 1997).

O critério de Chauvenet estabelece que uma determinada leitura pode ser rejeitada se a probabilidade de obter um desvio particular em relação à média for menor que $1/2N$, onde N é o número de medições realizadas.

Sendo $d = x_{\text{susp}} - \bar{x}$ o desvio de uma medida, onde x_{susp} é a medida suspeita em questão, pelo critério de Chauvenet, o máximo desvio aceitável para uma amostra formada por N pontos, é dado por:

$$\frac{1}{2N} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{d_{\text{max}}}{\sigma}\right)^2\right] \quad (\text{C.6})$$

Caso $d > d_{\text{max}}$, o ponto em questão pode ser rejeitado.

A Tabela C.2 apresenta valores para a razão entre o máximo desvio aceitável e o desvio padrão, para diferentes valores de N , obtidos através da Eq. (C.6).

Para desconsiderar pontos com valores discrepantes seguindo o critério de Chauvenet, procede-se da seguinte forma:

- a) mede-se a variável um número N de vezes e estima-se média e desvio padrão da distribuição.

- b) calcula-se o desvio entre cada medida e a média dividindo-se o resultado por σ
- c) usando um número de leituras N , compara-se o valor de d_i / σ com d_{\max} / σ , caso maior, rejeita-se o ponto e recalcula-se a média e o desvio.

O critério somente deve ser aplicado uma única vez à distribuição.

Tabela C.2 - Valores para razão entre o máximo desvio aceitável e o desvio padrão de acordo com o número de medidas.

Número de medidas (N)	d_{\max} / σ
2	1,15
3	1,38
4	1,54
5	1,65
6	1,73
7	1,80
10	1,96
15	2,13
25	2,33
50	2,57
100	2,81
500	3,29
1000	3,48

ANEXO A – PROPRIEDADES FÍSICAS DA SOLUÇÃO ÁGUA - GLICERINA

Este anexo apresenta propriedades físicas de misturas água-glicerina de acordo com a concentração mássica de glicerina em água. A Tabela A.3 apresenta os valores de viscosidade dinâmica da mistura água-glicerina, para diversas concentrações mássicas de glicerina em água, em função da temperatura na qual o fluido se encontra. A Tabela A.4 apresenta os valores de massa específica da solução água-glicerina também em função da temperatura e da concentração mássica de glicerina em água da solução. Ambas as tabelas foram retiradas de Dorsey (1940).

Tabela A.3 - Viscosidade dinâmica da solução em função da concentração mássica de glicerina e da temperatura.

Percentagem mássica de glicerina	Temperatura (°C)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0 ⁽¹⁾	1.792	1.308	1.005	0.8007	0.6560	0.5494	0.4688	0.4061	0.3565	0.3165	0.2838
10	2.44	1.74	1.31	1.03	0.826	0.680	0.575	0.500	-	-	-
20	3.44	2.41	1.76	1.35	1.07	0.879	0.731	0.635	-	-	-
30	5.14	3.49	2.50	1.87	1.46	1.16	0.956	0.816	0.690	-	-
40	8.25	5.37	3.72	2.72	2.07	1.62	1.30	1.09	0.918	0.763	0.668
50	14.6	9.01	6.00	4.21	3.10	2.37	1.86	1.53	1.25	1.05	0.910
60	29.9	17.4	10.8	7.19	5.08	3.76	2.85	2.29	1.84	1.52	1.28
65	45.7	25.3	15.2	9.85	6.80	4.89	3.66	2.91	2.28	1.86	1.55
67	55.5	29.9	17.7	11.3	7.73	5.50	4.09	3.23	2.50	2.03	1.68
70	76	38.8	22.5	14.1	9.40	6.61	4.86	3.78	2.90	2.34	1.93
75	132	65.2	35.5	21.2	13.6	9.25	6.61	5.01	3.80	3.00	2.43
80	255	116	60.1	33.9	20.8	13.6	9.42	6.94	5.13	4.03	3.18
85	540	223	109	58	33.5	21.2	14.2	10.0	7.28	5.52	4.24
90	1310	498	219	109	60.0	35.5	22.5	15.5	11.0	7.93	6.00
91	1590	592	259	127	68.1	39.8	25.1	17.1	11.9	8.62	6.40
92	1950	729	310	147	78.3	44.8	28.0	19.0	13.1	9.46	6.82
93	2400	860	367	172	89	51.5	31.6	21.2	14.4	10.3	7.54
94	2930	1040	437	202	105	58.4	35.4	23.6	15.8	11.2	8.19
95	3690	1270	523	237	121	67.0	39.9	26.4	17.5	12.4	9.08
96	4600	1580	624	281	142	77.8	45.4	29.7	19.6	13.6	10.1
97	5770	1950	765	340	166	88.9	51.9	33.6	21.9	15.1	10.9
98	7370	2460	939	409	196	104	59.8	38.5	24.8	17.0	12.2
99	9420	3090	1150	500	235	122	69.1	43.6	27.8	19.0	13.3
100	12070	3900	1410	612	284	142	81.3	50.6	31.9	21.3	14.8

(Fonte: adaptado de DORSEY, 1940).


Tabela A.4 - Massa específica da solução em função da concentração mássica de glicerina e da temperatura.

Glicerina (%)	Densidade (g/cm ³)					Glicerina (%)	Densidade (g/cm ³)				
	15°C	15.5°C	20°C	25°C	30°C		15°C	15.5°C	20°C	25°C	30°C
100	1.26415	1.26381	1.26108	1.25802	1.25495	50	1.12870	1.12845	1.12630	1.12375	1.12110
99	1.26160	1.26125	1.25850	1.25545	1.25235	49	1.12600	1.12575	1.12360	1.12110	1.11845
98	1.25900	1.25865	1.25590	1.25290	1.24975	48	1.12325	1.12305	1.12090	1.11840	1.11580
97	1.25645	1.25610	1.25335	1.25030	1.24710	47	1.12055	1.12030	1.11820	1.11575	1.11320
96	1.25385	1.25350	1.25080	1.24770	1.24450	46	1.11780	1.11760	1.11550	1.11310	1.11055
95	1.25130	1.25095	1.24825	1.24515	1.24190	45	1.11510	1.11490	1.11280	1.11040	1.10795
94	1.24865	1.24830	1.24560	1.24250	1.23930	44	1.11235	1.11215	1.11010	1.10775	1.10530
93	1.24600	1.24565	1.24300	1.23985	1.23670	43	1.10960	1.10945	1.10740	1.10510	1.10265
92	1.24340	1.24305	1.24035	1.23725	1.23410	42	1.10690	1.10670	1.10470	1.10240	1.10005
91	1.24075	1.24040	1.23770	1.23460	1.23150	41	1.10415	1.10400	1.10200	1.09975	1.09740
90	1.23810	1.23775	1.23510	1.23200	1.22890	40	1.10145	1.10130	1.09930	1.09710	1.09475
89	1.23545	1.23510	1.23245	1.22935	1.22625	39	1.09875	1.09860	1.09665	1.09445	1.09215
88	1.23280	1.23245	1.22975	1.22665	1.22360	38	1.09605	1.09590	1.09400	1.09180	1.08955
87	1.23015	1.22980	1.22710	1.22400	1.22095	37	1.09340	1.09320	1.09135	1.08915	1.08690
86	1.22750	1.22710	1.22445	1.22135	1.21830	36	1.09070	1.09050	1.08865	1.08655	1.08430
85	1.22485	1.22445	1.22180	1.21870	1.21565	35	1.08800	1.08780	1.08600	1.08390	1.08165
84	1.22220	1.22180	1.21915	1.21605	1.21300	34	1.08530	1.08515	1.08335	1.08125	1.07905
83	1.21955	1.21915	1.21650	1.21340	1.21035	33	1.08265	1.08245	1.08070	1.07860	1.07645
82	1.21690	1.21650	1.21380	1.21075	1.20770	32	1.07995	1.07975	1.07800	1.07600	1.07380
81	1.21425	1.21385	1.21115	1.20810	1.20505	31	1.07725	1.07705	1.07535	1.07335	1.07120
80	1.21160	1.21120	1.20850	1.20545	1.20240	30	1.07455	1.07435	1.07270	1.07070	1.06855
79	1.20885	1.20845	1.20575	1.20275	1.19970	29	1.07195	1.07175	1.07010	1.06815	1.06605
78	1.20610	1.20570	1.20305	1.20005	1.19705	28	1.06935	1.06915	1.06755	1.06560	1.06355
77	1.20335	1.20300	1.20030	1.19735	1.19435	27	1.06670	1.06655	1.06495	1.06305	1.06105
76	1.20060	1.20025	1.19760	1.19465	1.19170	26	1.06410	1.06390	1.06240	1.06055	1.05855
75	1.19785	1.19750	1.19485	1.19195	1.18900	25	1.06150	1.06130	1.05980	1.05800	1.05605
74	1.19510	1.19480	1.19215	1.18925	1.18635	24	1.05885	1.05870	1.05720	1.05545	1.05350
73	1.19235	1.19205	1.18940	1.18650	1.18365	23	1.05625	1.05610	1.05465	1.05290	1.05100
72	1.18965	1.18930	1.18670	1.18380	1.18100	22	1.05365	1.05350	1.05205	1.05035	1.04850
71	1.18690	1.18655	1.18395	1.18110	1.17830	21	1.05100	1.05090	1.04950	1.04780	1.04600
70	1.18415	1.18385	1.18125	1.17840	1.17565	20	1.04840	1.04825	1.04690	1.04525	1.04350
69	1.18135	1.18105	1.17850	1.17565	1.17290	19	1.04590	1.04575	1.04440	1.04280	1.04105
68	1.17860	1.17830	1.17575	1.17295	1.17020	18	1.04335	1.04325	1.04195	1.04035	1.03860
67	1.17585	1.17555	1.17300	1.17020	1.16745	17	1.04085	1.04075	1.03945	1.03790	1.03615
66	1.17305	1.17275	1.17025	1.16745	1.16470	16	1.03835	1.03825	1.03695	1.03545	1.03370
65	1.17030	1.17000	1.16750	1.16475	1.16195	15	1.03580	1.03570	1.03450	1.03300	1.03130
64	1.16755	1.16725	1.16475	1.16200	1.15925	14	1.03330	1.03320	1.03200	1.03055	1.02885
63	1.16480	1.16445	1.16205	1.15925	1.15650	13	1.03080	1.03070	1.02955	1.02805	1.02640
62	1.16200	1.16170	1.15930	1.15655	1.15375	12	1.02830	1.02820	1.02705	1.02560	1.02395
61	1.15925	1.15895	1.15655	1.15380	1.15100	11	1.02575	1.02565	1.02455	1.02315	1.02150
60	1.15650	1.15615	1.15380	1.15105	1.14830	10	1.02325	1.02315	1.02210	1.02070	1.01905
59	1.15370	1.15340	1.15105	1.14835	1.14555	9	1.02085	1.02075	1.01970	1.01835	1.01670
58	1.15095	1.15065	1.14830	1.14560	1.14285	8	1.01840	1.01835	1.01730	1.01600	1.01440
57	1.14815	1.14785	1.14555	1.14285	1.14010	7	1.01600	1.01590	1.01495	1.01360	1.01205
56	1.14535	1.14510	1.14280	1.14015	1.13740	6	1.01360	1.01350	1.01255	1.01125	1.00970
55	1.14260	1.14230	1.14005	1.13740	1.13470	5	1.01120	1.01110	1.01015	1.00890	1.00735
54	1.13980	1.13955	1.13730	1.13465	1.13195	4	1.00875	1.00870	1.00780	1.00655	1.00505
53	1.13705	1.13680	1.13455	1.13195	1.12925	3	1.00635	1.00630	1.00540	1.00415	1.00270
52	1.13425	1.13400	1.13180	1.12920	1.12650	2	1.00395	1.00385	1.00300	1.00180	1.00035
51	1.13150	1.13125	1.12905	1.12650	1.12380	1	1.00155	1.00145	1.00060	0.99945	0.99800
						0	0.99913	0.99905	0.99823	0.99708	0.99568

(Fonte: adaptado de DORSEY, 1940).

ANEXO B - PROCEDIMENTO PARA INÍCIO DO FUNCIONAMENTO DO APARATO EXPERIMENTAL

Este anexo apresenta o Procedimento Operacional Padrão desenvolvido pelo Laboratório de Meios Porosos do CERNN com o objetivo de padronizar a operação de iniciar o funcionamento da unidade experimental utilizada para realização dos testes de escoamento líquido-sólido em canal fraturado e formação de leito de partículas.

	PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO - POP			Página 1
Código CERNN-LAMP-POP001	Data de emissão 21/07/2015	Data de vigência 21/07/2015	Próxima revisão 21/01/2016	Versão nº 001
LABORATÓRIO DE MEIOS POROSOS				
PROCEDIMENTO PARA INÍCIO DO FUNCIONAMENTO DO APARATO EXPERIMENTAL				

OBJETIVO

O objetivo deste procedimento é estabelecer e listar as etapas necessárias para iniciar o funcionamento do aparato experimental pertencente ao Laboratório de Meios Porosos situado nas dependências do Centro de Pesquisas em Reologia e Fluidos Não Newtonianos.

APLICAÇÃO

Este POP aplica-se a todos os alunos que trabalham diretamente com os testes realizados no aparato experimental.

CONTEÚDO

O aparato experimental pertencente ao Laboratório de Meios Porosos do Centro de Pesquisas em Reologia e Fluidos Não Newtonianos é um aparato complexo e que demanda conhecimento técnico sobre os equipamentos que o compõe. Portanto, iniciar o funcionamento deste aparato para a realização de testes requer cuidado com a ordem de execução de cada etapa, conforme é descrito neste POP.

Os componentes do aparato experimental são indicados conforme a Figura 1 e listados na Tabela 1. A Figura 2 apresenta um esquema do circuito hidráulico do aparato experimental.

	PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO - POP			Página 2
	Código CERNN-LAMP-POP001	Data de emissão 21/07/2015	Data de vigência 21/07/2015	Próxima revisão 21/01/2016
LABORATÓRIO DE MEIOS POROSOS				
PROCEDIMENTO PARA INÍCIO DO FUNCIONAMENTO DO APARATO EXPERIMENTAL				

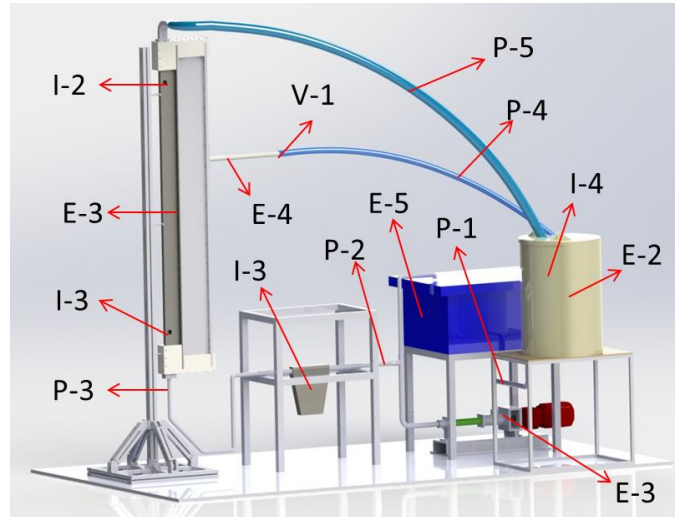


Figura 1 – Projeto do circuito experimental.

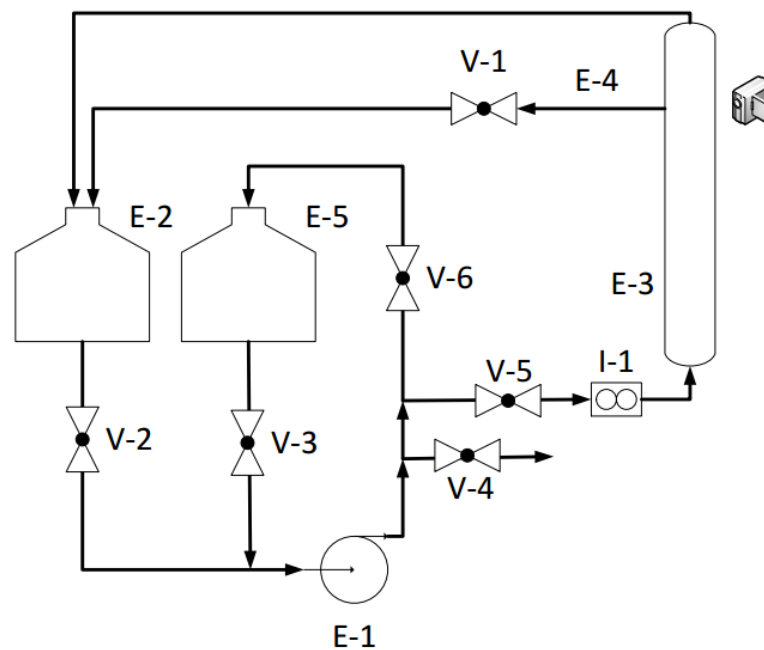


Figura 2 – Esquema hidráulico do circuito experimental.



		PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO - POP			Página 3
Código CERNN-LAMP-POP001	Data de emissão 21/07/2015	Data de vigência 21/07/2015	Próxima revisão 21/01/2016	Versão nº 001	
LABORATÓRIO DE MEIOS POROSOS					
PROCEDIMENTO PARA INÍCIO DO FUNCIONAMENTO DO APARATO EXPERIMENTAL					

Tabela 1 – Descrição dos itens do circuito experimental.

Sigla	Descrição
E-1	Bomba Helicoidal
E-2	Tanque Misturador
E-3	Canal da Seção de Testes
E-4	Tubo Representando a Fratura
E-5	Tanque reserva
I-1	Medidor de Vazão Mássica Coriolis
I-2	Transdutor de Pressão Manométrica
I-3	Transdutor de Pressão Manométrica
I-4	Termopar
P-1	Tubulação de sucção
P-2	Tubulação de recalque
P-3	Tubulação de entrada na seção de testes
P-4	Tubulação de saída da fratura
P-5	Tubulação de saída da seção de testes
V-1	Válvula de controle de vazão na fratura

ETAPAS PARA INICIAÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

1. Fechar válvula V-1
2. Abrir válvula V-2 para o tanque E-2
3. Fechar válvula V-3 para o tanque E-5
4. Fechar válvula V-4
5. Abrir válvula V-5 para o medidor de vazão I-1
6. Fechar válvula V-6 para o by-pass
7. Abrir software LabVIEW
8. No quadro Q-1, ligar disjuntor D-1
9. Iniciar programa “Canal Fraturado” no LabVIEW
10. No diagrama de blocos do LabVIEW, ajustar tempo e frequência de gravação de dados para os valores desejados
11. No quadros Q-2, ligar os disjuntores D-2, D-3, D-4 e D-5
12. No quadro Q-2, ajustar inversor de frequência F-1 para 30Hz e apertar ‘RUN’ para iniciar a homogeneização da mistura no interior do tanque E-2
13. Aguardar a homogeneização por aproximadamente 5 minutos
14. No quadro Q-2, verificar no inversor de frequência F-2 o sentido de rotação da bomba E-1 e ajustar para ‘FOWARD’

	PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO - POP			Página 4
Código CERNN-LAMP-POP001	Data de emissão 21/07/2015	Data de vigência 21/07/2015	Próxima revisão 21/01/2016	Versão nº 001
LABORATÓRIO DE MEIOS POROSOS				
PROCEDIMENTO PARA INÍCIO DO FUNCIONAMENTO DO APARATO EXPERIMENTAL				

15. No quadro Q-2, ajustar frequência de F-2 para a frequência desejada e apertar 'RUN'
16. Manter o escoamento em regime permanente por aproximadamente 2 minutos
17. Abrir válvula V-1 para vazão inicial desejada
18. Iniciar gravação de dados de teste no LabVIEW