

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

LUCAS QUADROS OBRZUT

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE ESCOAMENTO LÍQUIDO-SÓLIDO
PARA O CONTROLE DE FUGA DE FLUIDO EM CANAL FRATURADO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2015

LUCAS QUADROS OBRZUT

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE ESCOAMENTO LÍQUIDO-SÓLIDO
PARA O CONTROLE DE FUGA DE FLUIDO EM CANAL FRATURADO**

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

Orientador: Prof. Dr. Silvio L. M. Junqueira

Co-Orientador: Me. Eng. Fernando C. De Lai

CURITIBA

2015

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "ANÁLISE EXPERIMENTAL DE ESCOAMENTO LÍQUIDO-SÓLIDO PARA O CONTROLE DE FUGA DE FLUIDO EM CANAL FRATURADO", realizado pelo aluno Lucas Quadros Obrzut, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Silvio Luiz de Mello Junqueira

Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR

Orientador

Prof. Dr. Paulo Henrique Dias dos Santos

Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR

Avaliador

Prof. Dr. Luciano Fernando dos Santos Rossi

Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR

Avaliador

Curitiba, 14 de dezembro de 2015..

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Jair e Marisete, pelo amor, apoio e por sempre me mostrarem que a educação é sempre o melhor caminho, não importa o quão penoso seja.

À minha amada companheira Amanda, por sempre estar ao meu lado, por ser meu suporte em todos os momentos. Obrigado pelo amor, companheirismo e pelos momentos de alegria.

À minha irmã Lauren pela amizade, mesmo nas clássicas brigas entre irmãos.

Aos colegas e amigos que estiveram presente nessa jornada. Obrigado pelas 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 Paulo Santos e Luciano Rossi por todos os conselhos e críticas construtivas que contribuíram no desenvolvimento desse trabalho.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná e todos os professores por me proporcionar um ensino de qualidade.

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

OBRZUT, Lucas Quadros. Análise Experimental de Escoamento Líquido-Sólido para o Controle de Fuga de Fluido em Canal Fraturado, 2015. 120 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso Superior de Engenharia Industrial Mecânica. Curitiba, 2015.

A ocorrência de falhas naturais na formação rochosa ou mesmo aquelas induzidas pelo processo de perfuração de poços de petróleo e gás podem provocar a migração de fluido de perfuração no sentido da formação. Para controlar o fenômeno de fuga de fluido, diversas técnicas são utilizadas. Uma delas consiste na utilização dos denominados materiais de perda de circulação. Neste trabalho, propõe-se estudar experimentalmente o escoamento líquido-sólido em canal fraturado e a formação de leito de partículas no interior da fratura. Para tanto, uma unidade experimental foi projetada, construída e instrumentada nas dependências do CERNN-UTFPR com o intuito de investigar o problema proposto. Para caracterizar o processo de formação de leito de partículas na fratura são investigados o gradiente de pressão no canal, a vazão pelo canal fraturado e a formação do leito (altura, comprimento e posição inicial) ao longo do tempo. Os resultados mostram o efeito da variação do número de Reynolds, concentração de partículas, material particulado e a vazão inicial de fuga de fluido pela fratura sobre a formação do leito de partículas. A partir dos resultados, conclui-se que aumento da concentração de partículas, diminuição do número de Reynolds do escoamento no canal, aumento da vazão de fuga de fluido pela fratura e a utilização de partículas de maior massa específica contribuem para uma formação de leito com maior altura e comprimento.

Palavras-chave: escoamento líquido-sólido; fuga de fluido; análise experimental; canal fraturado; perda de circulação.

ABSTRACT

OBRZUT, Lucas Quadros. Análise Experimental de Escoamento Líquido-Sólido para o Controle de Fuga de Fluido em Canal Fraturado, 2015. 120 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso Superior de Engenharia Industrial Mecânica. Curitiba, 2015.

The natural occurrence of faults in the rock formation or even those induced by the drilling process can cause drilling fluid migration towards the formation. To control the phenomenon of loss of fluid various techniques are used. One is the use of lost circulation materials. In this work, a study experimentally the liquid-solid flow in the fractured channel and the formation of bed of particles within the fracture is proposed. To this end, an experimental apparatus is designed, built and instrumented at CERNN-UTFPR dependencies in order to investigate the proposed issue. To characterize the process of bed formation within the fracture, pressure gradient in the channel, flow rate through the channel and the bed formation (height, length and starting position) are investigated over time. The results show the effect of varying the Reynolds number, concentration of particles, particulate material and the initial fluid loss flow by the fracture over the formation of particle bed. With the analysis of the results it is sought to verify the importance of control methods in the event of loss of fluid through fractures in the set well-formation, and the injection of particulate matter as a possible alternative to control the problem. From the results, it is concluded that increasing the concentration of particles, decreasing the flow Reynolds number in the channel, increasing fluid loss flow through the fracture and the use of particles of higher specific gravity contribute to a bed formation with greater height and length.

Key-words: fluid-solid flow; fluid loss; experimental analysis; fractured channel; lost circulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Representação da presença de fraturas no processo de perfuração.....	14
Figura 1.2 - Regiões da formação que possibilitam a ocorrência da perda de circulação.....	15
Figura 1.3 - Conjunto poço-formação: (a) corte longitudinal e (b) corte transversal..	17
Figura 1.4 - Representação esquemática das etapas do processo de preenchimento de uma fratura ao longo do tempo: (a) injeção de partículas no canal; (b) deposição de partículas na fratura; (c) leito de partículas.....	19
Figura 3.1 - Faixa segura de operação e perfil do poço em função da ECD do fluido de perfuração.....	28
Figura 3.2 - Representação gráfica da pressão em função do tempo em um teste de <i>leakoff</i> para vazão de fluido de perfuração constante.....	31
Figura 3.3 - Programa de gerenciamento de perda de circulação.....	32
Figura 3.4 - Esquema da metodologia de construção de uma curva estática.....	35
Figura 4.1 – Aparato experimental: (a) esquema do circuito hidráulico e (b) projeto tridimensional.....	43
Figura 4.2 - Indicação dos componentes do circuito experimental.....	44
Figura 4.3 - Visão geral do aparato experimental.....	45
Figura 4.4 - Tanque misturador utilizado: (a) exterior do tanque, com o motor elétrico acoplado e (b) detalhe das pás no interior do tanque.....	46
Figura 4.5 - Bomba helicoidal utilizada no experimento.....	46
Figura 4.6 - Projeto do canal da seção de testes com dimensões.....	48
Figura 4.7 - Vistas em corte da seção de teste: (a) transversal e (b) longitudinal.....	48
Figura 4.8 - Visão geral da fratura da seção de testes junto ao canal.....	49
Figura 4.9 - Flange de conexão da fratura com o canal da seção de testes: (a) posição de montagem e (b) projeto tridimensional.....	50

Figura 4.10 - Bocal de saída da seção de testes: (a) vista isométrica e (b) plano de corte	50
Figura 4.11 - Bocal de entrada da seção de testes	51
Figura 4.12 - Detalhe dos bocais da seção de testes: (a) entrada e (b) saída.	51
Figura 4.13 - Medidor de vazão mássica tipo coriolis utilizado no experimento.	52
Figura 4.14 - Transdutores de pressão manométrica: (a) instalados na seção de testes e (b) detalhe de montagem.....	53
Figura 4.15 - Curva de caracterização estática para o medidor de vazão mássica. .	55
Figura 4.16 - Curva de caracterização estática para o transdutor de pressão manométrica I-3.	57
Figura 4.17 - Curva de caracterização estática para o transdutor de pressão manométrica I-2.	58
Figura 4.18 - Interface de trabalho, leitura e controle de dados.	60
Figura 4.19 - Diagrama de blocos programado no LabVIEW.....	61
Figura 4.20 - Partículas utilizadas para os testes de escoamento líquido-sólido: (a) partícula de vidro e (b) partícula de Urea	63
Figura 4.21 - Viscosímetro Brookfield LVDV-II+ Pro.	65
Figura 4.22 - Adaptador UL.....	65
Figura 4.23 - Banho termostático RTE-111.....	65
Figura 4.24 - Interface de controle do viscosímetro.	66
Figura 5.1 - Representação gráfica da viscosidade dinâmica em relação à concentração mássica de glicerina em água	69
Figura 5.2 - Representação gráfica da massa específica em relação à concentração mássica de glicerina em água.....	70
Figura 5.3 - Número de Reynolds em função da vazão mássica para as diferentes concentrações de água-glicerina	70

Figura 5.4 - Representação gráfica dos valores de gradiente de pressão no canal da seção de testes para as concentrações avaliadas.....	71
Figura 5.5 - Representação gráfica do gradiente de pressão em função da concentração de glicerina em água para vazões mássicas de 3, 6 e 12 kg/min	72
Figura 5.6 - Influência da concentração de partículas sobre o gradiente de pressão para concentração de 61,4% de glicerina	73
Figura 5.7 - Influência da concentração de glicerina sobre o gradiente de pressão para concentração de 1% de partículas.....	74
Figura 5.8 - Influência da concentração de glicerina sobre o gradiente de pressão para concentração de 2% de partículas.....	75
Figura 5.9 - Influência da concentração de partículas sobre o gradiente de pressão para concentração de 73,1% de glicerina	75
Figura 5.10 - Comparação da influência da concentração de partículas e glicerina na solução sobre o gradiente de pressão	76
Figura 5.11 - Representação gráfica da variação da temperatura em relação ao tempo de teste	77
Figura 5.12 - Variação da viscosidade dinâmica em função da temperatura do fluido	77
Figura 5.13 - Detalhe da variação da viscosidade dinâmica em relação à faixa de temperatura de operação do fluido	78
Figura 5.14 - Processo de formação do leito de partículas ao longo tempo para $C_p = 2\%$, $Re = 150$ e $Q_v = 0,75$	83
Figura 5.15 – Parâmetros geométricos do leito de partículas.	83
Figura 5.16 - Instantes finais para cada concentração de partículas utilizadas no processo de preenchimento da fratura para $Re = 150$ e $Q_v = 0,75$	84
Figura 5.17 - Gradiente de pressão ao longo do tempo para $Re_{CH} = 150$ e $Q_v = 0,75$	85
Figura 5.18 - Testes de repetibilidade apresentados para $Re = 150$, $C_p = 3\%$ e $Q_v = 0,75$	86

Figura 5.19 - Pressões mensuradas pelo transdutor de pressão manométrica I-3 para $Re_{CH} = 150$, $C_P = 3\%$ e $Q_V = 0,75$.	86
Figura 5.20 - Instantes finais para cada concentração de partículas utilizadas no processo de preenchimento da fratura para $Re = 300$ e $Q_V = 0,75$.	87
Figura 5.21 - Instantes finais para cada concentração de partículas utilizadas no processo de preenchimento da fratura para $Re = 450$ e $Q_V = 0,75$.	88
Figura 5.22 - Instantes finais para cada Reynolds utilizados no processo de preenchimento da fratura para $C_P = 2,5\%$ e $Q_V = 0,75$.	89
Figura 5.23 - Gradiente de pressão ao longo do tempo para $C_P = 2,5\%$ variando Re .	90
Figura 5.24 - Instantes finais para cada concentração de partículas utilizadas no processo de preenchimento da fratura para $Re = 300$ e $Q_V = 1,0$.	91
Figura 5.25 - Gradiente de pressão ao longo do tempo para $Re = 300$ e $Q_V = 1,0$.	91
Figura 5.26 - Instantes finais para cada vazão de fuga utilizada no processo de preenchimento da fratura para $Re = 300$ e $C_P = 4\%$.	92
Figura 5.27 - Gradiente de pressão ao longo do tempo para $Re = 300$ e $C_P = 4\%$.	93
Figura 5.28 - Instantes finais para cada material particulado utilizado no processo de preenchimento da fratura para $Re = 300$, $C_P = 3\%$ e $Q_V = 0,75$.	94
Figura 5.29 - Gradiente de pressão ao longo do tempo para $Re = 300$, $C_P = 3\%$ e $Q_V = 0,75$.	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Classificação da perda de circulação de acordo com sua severidade. .	26
Tabela 3.2 - Tipos de materiais utilizados como LCM, com suas características e exemplos.....	34
Tabela 3.3 – Fator de abrangência em relação ao nível de confiança.	39
Tabela 3.4 - Valores para razão entre o máximo desvio aceitável e o desvio padrão de acordo com o número de medidas	40
Tabela 4.1 - Identificação dos itens do circuito experimental.	44
Tabela 4.2 - Resultados obtidos para ensaios de variação de vazão mássica.	54
Tabela 4.3 - Resultados obtidos para ensaios de variação de coluna d'água para o transdutor de pressão manométrica I-3.....	56
Tabela 4.4 - Resultados obtidos para ensaios de variação de coluna d'água para o transdutor de pressão manométrica I-2.....	58
Tabela 4.5 - Características dos módulos utilizados no sistema de aquisição de dados.	59
Tabela 4.6 - Características das partículas adquiridas para os testes	63
Tabela 5.1 - Valores de concentração de glicerina em água e massa específica da solução interpolados linearmente pela viscosidade dinâmica medida	71
Tabela 5.2 - Dados de medições realizadas em viscosímetro com a solução água-glicerina.....	78
Tabela 5.3 - Concentração de glicerina em água e propriedades.....	79
Tabela 5.4 - Parâmetros do problema.....	80
Tabela 5.5 - Comprimentos de desenvolvimento referentes ao número de Reynolds do escoamento no interior do canal.	81
Tabela 5.6 - Parâmetros variados para os testes de formação do leito de partículas	81

Tabela 5.7 - Parâmetros geométricos do leito de partículas para $Re = 150$ e $Q_V = 0,75$	84
Tabela 5.8 - Parâmetros geométricos do leito de partículas para $Re = 300$ e $Q_V = 0,75$	88
Tabela 5.9 - Parâmetros geométricos do leito de partículas para $C_P = 2,5\%$ e $Q_V = 0,75$	89
Tabela 5.10 - Parâmetros geométricos do leito de partículas para $C_P = 4\%$ e $Re = 300$	92
Tabela A.1 - Exemplos de LCM's granulares	104
Tabela A.2 - Exemplos de LCM's em flocos	105
Tabela A.3 - Exemplos de LCM's em fibras	105
Tabela A.4 - Exemplos de combinações de LCM's	106
Tabela A.5 - Exemplos de LCM's solúveis em ácido	107
Tabela A.6 - Exemplos de LCM's <i>squeezes</i> para elevada perda de fluido	107
Tabela A.7 - Exemplos de LCM's ajustáveis / hidratáveis	108
Tabela A.8 - Exemplos de LCM's nanoparticulados	108
Tabela B.1 - Viscosidade dinâmica da solução água glicerina	109
Tabela B.2 - Massa específica da solução água-glicerina	110

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

CAD	Desenho Assistido por Computador (<i>Computer Aided Design</i>)
CERNN	Centro de Pesquisas em Reologia e Fluidos Não Newtonianos
ECD	Densidade de Circulação Equivalente (<i>Equivalent Circulating Density</i>)
FIT	Teste de Integridade da Formação (<i>Formation Integrity Test</i>)
LCM	Material de Perda de Circulação (<i>Lost Circulation Material</i>)
LOT	Teste de <i>leakoff</i> (<i>Leakoff Test</i>)
NPT	Tempo Não Produtivo (<i>No production Time</i>)
OBF	Fluido a base de óleo (<i>Oil Based Fluid</i>)
PSD	Distribuição de Tamanho de Partículas (<i>Particle Size Distribution</i>)
PWD	Pressão Durante a Perfuração (<i>Pressure While Drilling</i>)
SBF	Fluido de base sintética (<i>Synthetic Based Fluid</i>)
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
WBF	Fluido a base de água (<i>Water Based Fluid</i>)
WSM	Material de Fortalecimento do Poço (<i>Wellbore Strengthening Material</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
Z_{FR}	Profundidade da fratura	[m]
e_{FR}	Espessura da fratura	[m]
h_{FR}	Comprimento da fratura	[m]
P_A	Queda de pressão no espaço anular	[psi]
TVD	Profundidade do poço	[pés]
MW	Massa específica do fluido de perfuração	[lb/gal]
\bar{x}	Média aritmética	-
σ	Desvio padrão	-
k_p	Fator de abrangência	-
P	Probabilidade em uma distribuição normal	-
p	Nível de confiança	-
x_{susp}	Medida suspeita	-
N	Número de medições realizadas	-
d	Desvio de uma medida	-
d_{max}	Desvio máximo aceitável	-
h_{CH}	Largura do canal	[m]
R^2	Coefficiente de regressão linear	-
ρ	Massa específica do fluido	[kg/m ³]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
h	Altura de coluna d'água	[m]
D_h	Diâmetro hidráulico	[m]
Re_{Dh}	Número de Reynolds	-
L_e	Comprimento de desenvolvimento	[m]
A_S	Área de seção transversal de duto não circular	[m]
P_S	Perímetro da seção transversal de duto não circular	[m]
$h_{p,i}$	Posição de início de formação do leito de partículas	[m]
h_p	Comprimento do leito de partículas	[m]

e_p	Altura do leito de partículas	[m]
t_{ip}	Tempo de injeção de partículas	[s]

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	i
ABSTRACT	i
SUMÁRIO	xi
1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Caracterização do Problema	16
1.2 Objetivos	19
1.3 Justificativa	20
2 REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1 Monografias e dissertações	21
2.2 Artigos	23
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	26
3.1 Perda de circulação	26
3.1.1 Zonas de perda de circulação	28
3.1.2 Testes preventivos	30
3.1.3 Controle de perda de circulação	32
3.2 Calibração de instrumentos de medição	34
3.2.1 Distribuição normal ou Gaussiana	38
3.2.2 Incerteza na medição	39
3.2.3 Rejeição de dados experimentais	39
4 MATERIAIS E MÉTODOS	42
4.1 Apresentação do aparato experimental	42
4.2 Aspectos da seção de testes	47
4.3 Instrumentos de medição	52
4.4 Calibração dos instrumentos	53
4.4.1 Caracterização dos instrumentos	53
4.5 Sistema de aquisição de dados	59
4.6 Material particulado	62
4.7 Ensaio reométrico	64
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
5.1 Testes preliminares do escoamento no canal sem fratura	68
5.2 Ensaio em viscosímetro	78
5.3 Processo de formação do leito de partículas	79
5.3.1 Efeito da variação da concentração de partículas	82
5.3.2 Efeito da variação do número de Reynolds	88
5.3.3 Efeito da variação da vazão de fuga	90
5.3.4 Efeito da variação da partícula utilizada	93
6 CONCLUSÕES	96

6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	97
	REFERÊNCIAS	99
	ANEXO A – CLASSIFICAÇÃO DE LCM’S UTILIZADOS NA INDÚSTRIA ...	104
	ANEXO B – PROPRIEDADES FÍSICAS DA SOLUÇÃO ÁGUA-GLICERINA	
	109
	ANEXO C – PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO PARA INICIAR	
	FUNCIONAMENTO DA UNIDADE EXPERIMENTAL	111

1 INTRODUÇÃO

Escoamentos multifásicos envolvendo o transporte de partículas estão presentes tanto na natureza como numa ampla gama de aplicações industriais. Chuva, neve e a presença de poluentes no ar são exemplos de transporte de partículas encontrados na natureza. Já no contexto industrial é possível identificar esse tipo de escoamento em diversas aplicações tecnológicas, como por exemplo (PEKER e HELVACI, 2008): na indústria têxtil (filtragem de partículas), indústria de alimentos (transporte pneumático e armazenamento de grãos), área biomédica (respiração pulmonar, circulação capilar e absorção de medicamentos pelas vias aéreas), engenharia química (catalisadores para redução de poluentes), engenharia mecânica (transporte hidráulico, sinterização de partículas e filtragem acústica), engenharia ambiental (purificação de água e conversores catalíticos para controlar a emissão de fuligem em veículos), hidrogeologia (escoamento e percolação de água e minerais) e na engenharia do petróleo (processos de refino de petróleo, perfuração, produção e recuperação de reservatórios).

Avanços significativos ocorreram em relação à ciência e tecnologia de escoamentos multifásicos devido ao aprimoramento dos recursos tanto computacionais como experimentais (CROWE *et al.*, 1998). Em especial na indústria de petróleo e gás, o estudo de escoamentos envolvendo mais de uma fase é fundamental.

A perfuração de um poço de óleo e gás demanda alto conhecimento técnico para entender os fenômenos que cercam esta atividade. Na perfuração rotativa, por exemplo, as rochas são perfuradas pela ação da rotação e peso aplicados a uma broca existente na extremidade de uma coluna de perfuração (THOMAS, 2004).

Para auxiliar o processo de perfuração, o fluido de perfuração é utilizado com o objetivo de lubrificar e arrefecer a broca e a coluna de perfuração, remover os cascalhos do fundo do poço e conduzi-los à superfície; além de proporcionar a pressão hidrostática necessária para que não haja o colapso do poço.

A operação de perfuração pode causar danos à parede da formação rochosa, como por exemplo o surgimento de trincas e fraturas. Isso se deve aos elevados

gradientes de pressão existentes no processo, o que facilita o fraturamento da matriz porosa resultando na invasão do fluido na formação. Esse fraturamento possibilita o acontecimento de um fenômeno indesejável para a indústria petrolífera: a perda de circulação.

A Figura 1.1 representa a presença de fraturas na formação rochosa durante o processo de perfuração de um poço.

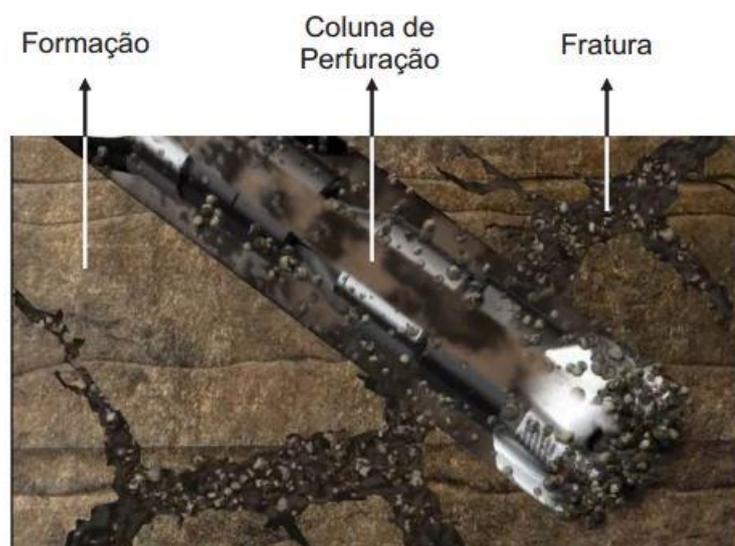


Figura 1.1 - Representação da presença de fraturas no processo de perfuração.
(Fonte: Adaptado de HALLIBURTON, 2013)

A Figura 1.2 apresenta os diferentes tipos de descontinuidades que podem ser encontradas em um processo de perfuração, que podem intensificar o fenômeno de fuga de fluido para a formação rochosa. É essa perda de fluido de perfuração para a formação que define o conceito de perda de circulação no poço.

A maioria das explorações *offshore* atualmente realizadas pela PETROBRAS no Brasil apresentam uma profundidade média de 5500 metros, podendo alcançar, até 7000 metros. Este cenário inclui reservatórios depletados, zonas de pré-sal e formações naturalmente fraturadas. Fraturas naturais, fraturas induzidas pela perfuração e zonas de alta permeabilidade são responsáveis pelo aumento da perda de circulação, que elevam consideravelmente o tempo e o custo da construção de um poço, podendo também afetar a segurança operacional. Normalmente 1/3 dos

poços perfurados pela PETROBRAS apresentam o fenômeno de perda de circulação (CALÇADA *et al.*, 2015).

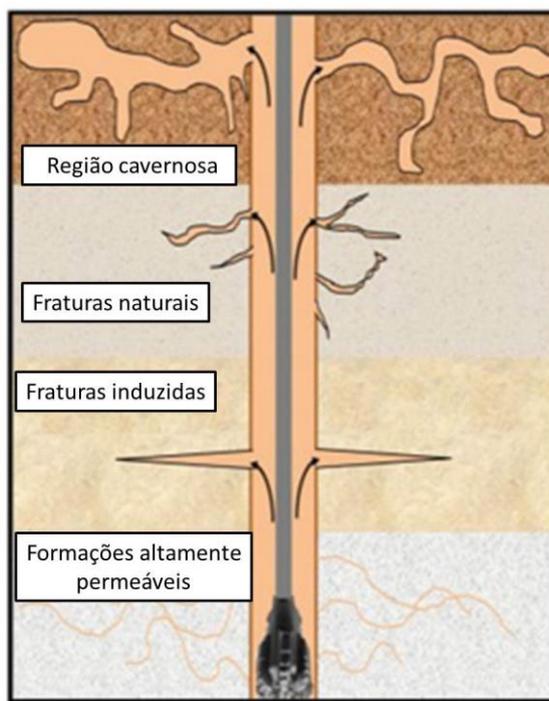


Figura 1.2 - Regiões da formação que possibilitam a ocorrência da perda de circulação.
(Fonte: Adaptado de ALSABA e NYGAARD, 2014)

A perda de circulação de fluidos de perfuração é um dos maiores desafios encontrados durante a perfuração de um poço, gerando custos adicionais e, em extremas circunstâncias, comprometendo todo o processo de perfuração. Isso influencia diretamente o tempo não produtivo (*no production time – NPT*) de um poço e os custos de todos os serviços que circundam o processo de perfuração (CALÇADA *et al.*, 2015).

No Brasil, a condição de *overbalance* é frequentemente utilizada nos processos de perfuração de um poço de óleo e gás. A condição *overbalance* é quando, durante a perfuração, a pressão dentro do poço ultrapassa a pressão de poros da formação. Nessa condição, é possível ocorrer perda de fluido para a formação. A presença de descontinuidades pode intensificar a possibilidade de acontecer a perda de circulação.

Por ser um fenômeno indesejável, a perda de circulação pode ser controlada a partir de diferentes técnicas e processos. Uma das maneiras de controlar a perda de circulação e reestabelecer a circulação de fluido de perfuração no interior do poço consiste em adicionar partículas.

A utilização de partículas pode ser feita de dois modos: no primeiro, conforme ilustrado por Whitfill e Hemphill (2004), é necessário realizar a parada da operação de perfuração e promover a injeção de partículas sem o movimento da coluna. Uma vez que se detecta a perda de fluido de perfuração para a formação, o processo de perfuração é parado, a broca é recolhida até a posição da fratura e as partículas são injetadas diretamente nessa posição. Na segunda abordagem, uma vez detectada a perda de circulação, as partículas são adicionadas ao fluido injetado através coluna de perfuração e seguem até o final do poço, retornando pelo espaço anular compreendido entre a formação rochosa e a coluna de perfuração. Essa abordagem permite controlar o problema sem que haja a necessidade de manobrar a coluna, reduzindo os custos associados à parada.

Para o atual estudo a abordagem sem a parada do processo de perfuração é a escolhida devido a minimização do tempo não produtivo, e por consequência dos custos envolvidos no processo.

1.1 Caracterização do Problema

Conforme comentado, a perda de fluido para a formação é um problema existente durante o processo de perfuração, influenciando diretamente na produtividade do poço.

A Figura 1.3 ilustra o conjunto poço-formação, referente à perfuração vertical, com a presença de um plano de fratura horizontal. A Figura 1.3 (a) representa um corte transversal no conjunto poço-formação com presença de fratura, na qual é possível identificar Z_{FR} , que é a profundidade da fratura e pode ser representada pelo ângulo ocupado por um plano de fratura em uma seção transversal do poço.

Pode-se visualizar o sentido do escoamento do fluido de perfuração na Figura 1.3(b), na qual o fluido escoar de forma descendente no interior da coluna de

perfuração e retorna ascendentemente até a superfície pelo espaço anular. O parâmetro e_{FR} corresponde à espessura da fratura e representa a descontinuidade na direção axial do poço. O parâmetro h_{FR} representa o comprimento da fratura.

A presença de descontinuidades gera gradientes de pressão suficientes para que o fluido desvie do caminho preferencial e percole a formação. Com isso, as partículas, carregadas pelo fluido, acabam se acumulando no interior da fratura, formando o que é denominado leito de partículas. O acúmulo de partículas pode preencher completamente ou parcialmente a fratura, proporcionando uma resistência ao escoamento nessa região e minimizando ou até mesmo eliminando o fenômeno de perda de circulação.

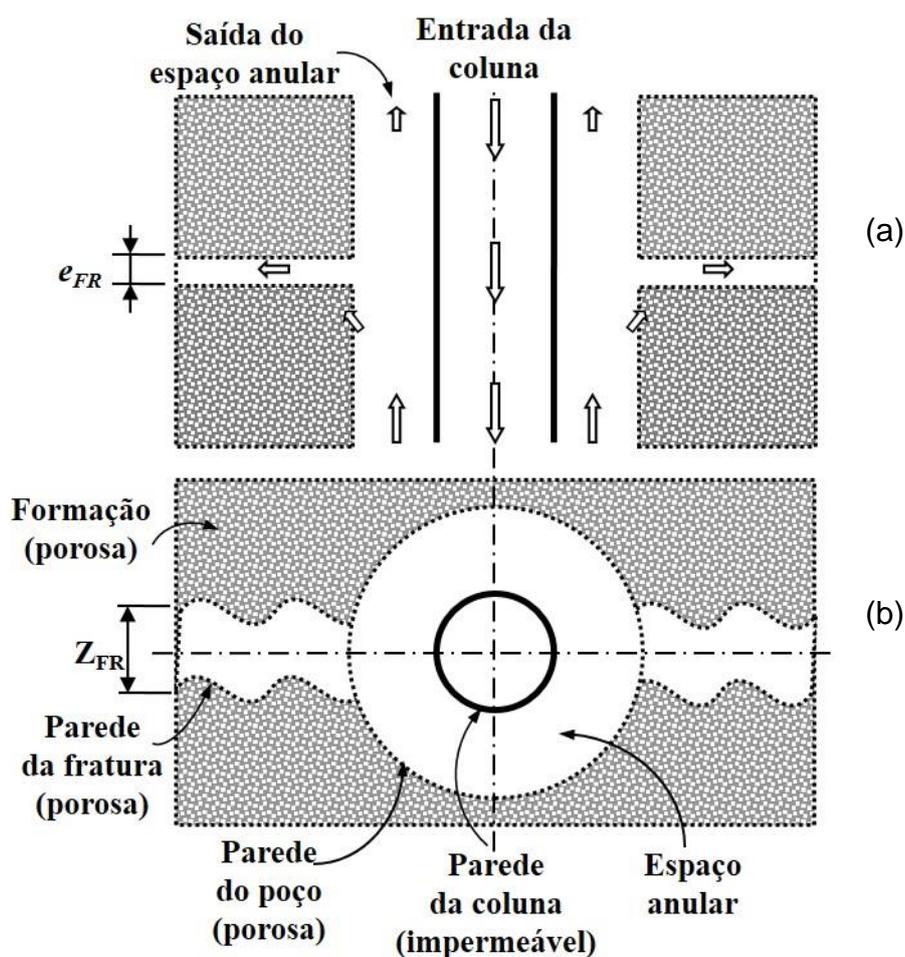


Figura 1.3 - Conjunto poço-formação: (a) corte longitudinal e (b) corte transversal.
(Fonte: DE LAI, 2013)

A Figura 1.4 representa esquematicamente diferentes instantes do processo de preenchimento da fratura, sendo possível observar algumas características, como o escoamento disperso no canal e a deposição das partículas na região da fratura.

O primeiro instante do procedimento de preenchimento da fratura, representado na Figura 1.4(a) é a injeção do material particulado ao fluido de perfuração.

No segundo instante, as partículas começam a adentrar a fratura, devido aos gradientes de pressão e velocidade existentes na região de entrada da fratura. Em seguida, as partículas começam a se depositar na parede horizontal inferior da fratura devido à gravidade, iniciando a formação de um leito fixo, conforme Figura 1.4(b). Nesse instante já é possível verificar uma redução da vazão de fuga devido à resistência que as partículas geram ao escoamento na fratura.

Na Figura 1.4(c), representando o terceiro instante do processo de preenchimento da fratura, observa-se as partículas já empacotadas e o leito fixo formado. Considera-se a fratura preenchida quando o gradiente de pressão verificado inicialmente entre a saída do espaço anular e da fratura sejam equilibrados pela perda de carga causada pelo acúmulo de partículas na fratura. Com isso, se reestabelece o escoamento preferencial no espaço anular, determinando o instante no qual a injeção de material particulado pode ser finalizada.

Conforme observa-se na Figura 1.4, escoamento vertical homogêneo ocorre na região do espaço anular, enquanto na fratura ocorre escoamento horizontal heterogêneo. As interações partícula-fluido, partícula-partícula e partícula-parede, além do gradiente de pressão, influenciam diretamente no movimento das partículas durante o escoamento.

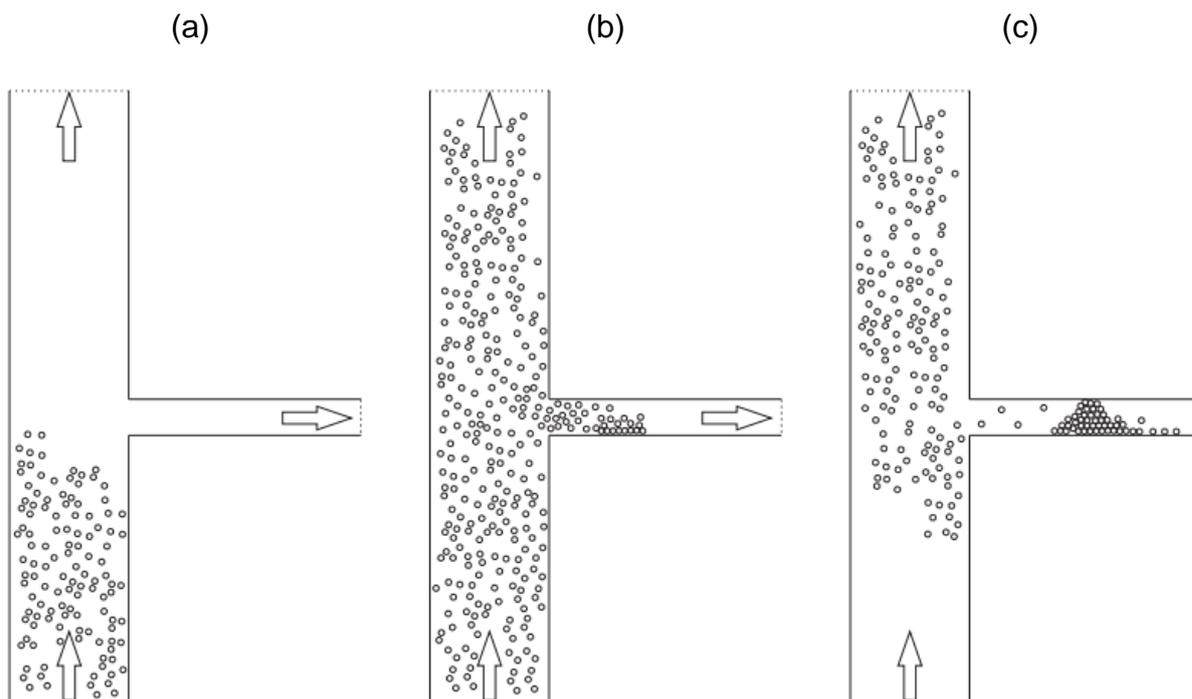


Figura 1.4 - Representação esquemática das etapas do processo de preenchimento de uma fratura ao longo do tempo: (a) injeção de partículas no canal; (b) deposição de partículas na fratura; (c) leito de partículas.

(Fonte: BARBOSA, 2015)

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é estudar experimentalmente o escoamento particulado em um canal fraturado para investigar o processo de formação do leito de partículas ao longo da fratura.

Para a realização deste estudo, serão variados os seguintes parâmetros: concentração de partículas no fluido, tipo de material particulado, vazão inicial de fuga de fluido e número de Reynolds do escoamento no canal. Parâmetros como a geometria do canal e da fratura e o fluido utilizado serão mantidos constantes durante a realização de todos os testes.

São analisadas as pressões na entrada e saída do canal e formação do leito de partículas ao longo do tempo, caracterizando os principais parâmetros geométricos (altura, comprimento, posição inicial e o tempo de injeção). A caracterização do formato do leito de partículas é feita através de imagens coletadas ao longo do preenchimento.

1.3 Justificativa

A perda de fluido de perfuração para a formação, juntamente com problemas de colapso do poço, colunas presas no poço e instabilidades na perfuração de folhelhos representam aproximadamente 44% do tempo não produtivo (COOK *et al.*, 2012).

A perda de circulação é responsável por 10-20% do custo total de um poço produtivo. Os custos de um poço, por sua vez, representam 35-50% do capital total investido em um projeto geotérmico (CARSON e LIN, 1982).

Devido a esta alta taxa de ocorrência do fenômeno de perda de circulação e do alto custo que esse problema gera para as companhias petrolíferas, decidiu-se investigar de forma experimental uma maneira de minimizar esse problema.

É importante salientar a ausência de resultados para verificação de modelos numéricos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Os trabalhos utilizados para embasar o desenvolvimento desta monografia são voltados especificamente ao problema de perda de circulação e escoamento particulado.

Thomas (2004) fornece uma base abrangente em engenharia de petróleo. O livro aborda todas as etapas que envolvem o desenvolvimento de um projeto geotérmico, desde a fase de prospecção até as etapas de processamento de fluidos, passando pelas etapas de perfuração, completação e elevação.

2.1 Monografias e dissertações

Dias (2010) estudou o fenômeno de invasão de fluido na formação através de um canal parcialmente poroso com fratura lateral. Utilizou um modelo matemático e numérico para investigar as pressões no poço e a perda de fluido para a formação através da variação de parâmetros adimensionais do meio poroso e da geometria da fratura. Além disso, utilizou de coordenadas cilíndricas para estudar o problema. Como resultado, caracterizou a fuga preferencial do escoamento pela fratura.

Por sua vez, Andreatta (2011) desenvolveu um modelo matemático e numérico para escoamento em canal parcialmente poroso e fraturado. Estudou também a influência de parâmetros geométricos e hidráulicos no comportamento do escoamento considerando o número de fraturas e a distância entre as mesmas, com foco nos perfis de velocidade, linhas de corrente e vazão que deixa o canal através das fraturas. Abordou o problema a partir de coordenadas cartesianas.

Datwani (2012) estudou em sua dissertação de mestrado a perda de circulação de fluido de perfuração em formações naturalmente fraturadas, formações com fraturas induzidas pela perfuração e mecanismos de prevenção ao fenômeno. Identificou os efeitos da perda de circulação, categorias de perda e características para identificação das zonas de perda. Além disso, comparou diversos modelos existentes capazes de identificar ou estimar o tipo de perda de circulação.

O estudo do fenômeno de invasão e o escoamento líquido-sólido para preenchimento de fratura com material particulado através de simulação numérica foi efetuado por De Lai (2013). O autor caracterizou o preenchimento da fratura através da análise do tempo de injeção no canal e do formato do leito de partículas. Estudou também o efeito da variação da concentração de sólidos da fase dispersa para diferentes parâmetros de monitoramento, dentre eles, vazão de fluido pela saída da fratura, pressão da mistura na entrada do canal e concentração de partículas injetadas no canal. Com os resultados obtidos, verificou que para maiores valores de concentração de partículas no escoamento a vedação da fratura se mostra mais eficiente.

Stahlke e Fritoli (2014) construíram uma bancada experimental capaz de permitir o estudo de escoamentos de diferentes sistemas particulados em seção de teste com seção transversal retangular. Realizaram testes preliminares de determinação de número de Reynolds e de cálculo de perda de carga para validação da bancada e de sua instrumentação. Este aparato simulava apenas o escoamento através do espaço anular, sem a presença de fraturas. O diferencial do presente trabalho é a presença da descontinuidade (fratura) no canal e a possibilidade do estudo da formação do leito de partículas no interior da fratura.

Barbosa (2015) utilizou de simulação numérica para estudar a formação de leito de partículas através da variação de parâmetros como o comprimento da fratura, o número de Reynolds, a viscosidade do fluido, o diâmetro da partícula injetada, o número de partículas injetadas e a razão entre massa específica da partícula e fluido. Esta influência é analisada através do comprimento e posicionamento do leito, além do preenchimento vertical da fratura. Verificou que o comprimento da fratura influencia pouco sobre o leito de partículas, reduzindo o tempo de vedação para fraturas menores. O número de Reynolds possui influência na velocidade de preenchimento e na posição do leito de partículas na fratura. Além disso, o número de partículas injetadas influencia no tempo de vedação da fratura, sendo menor o tempo de vedação para maiores números de partículas injetadas.

2.2 Artigos

Abrams (1977) propôs duas regras para a seleção do tamanho e concentração de partículas utilizadas para controlar perda de fluido em substratos porosos: 1) o tamanho médio das partículas devem ser iguais ou ligeiramente maiores a um terço do tamanho médio dos poros da formação e 2) a concentração em volume das partículas deve ser de pelo menos 5%.

Chatterji *et al.* (1999) propuseram uma metodologia para o controle de perda de circulação no poço denominada Wellbore Stabilization System (WSS). No momento em que se é detectado uma fratura, o processo de perfuração é paralizado e um fluido composto por uma resina e um agente endurecedor é injetado no interior do poço para preencher a fratura. Após o tempo de cura, esse fluido se solidifica e tampona a fratura antes existente e, assim, sendo possível a retomada da perfuração do poço.

Teorias para o dimensionamento das partículas utilizadas para atenuar perda de circulação através de meios permeáveis foram abordadas por Dick *et al.* (2000). Dentre elas, os autores apresentam a regra de Abrams e a *Ideal Packing Theory*. Apresentam também resultados comparativos de ambas teorias e estudos de casos de testes tanto em laboratório quanto em campo e os resultados obtidos para cada teoria. A partir disso, os autores mostram a eficiência superior que a *Ideal Packing Theory* apresentou durante os testes realizados.

Ivan *et al.* (2002) focaram sua pesquisa no controle de fuga de fluido em fraturas induzidas pelo processo de perfuração. Apresentam uma metodologia para seleção de partículas enfocando nas partículas denominadas Polymer-based Cross-linked Pills (PCP). Essas pílulas são fabricadas a partir de um reticulado composto por duas cadeias de materiais poliméricos além de uma mistura de outras partículas utilizadas como material de perda de circulação (LCM). As pílulas PCP são ativadas por agentes reticulados, tempo, temperatura ou através do cisalhamento imposto pela broca de perfuração. Quando ativadas, as pílulas se transformam em uma substância que é muito dúctil, similar a uma borracha ou esponja. Com isso, as pílulas conseguem penetrar e selar as fraturas. Testes reométricos também são realizados nas pílulas PCP.

Experimentos com o objetivo de investigar os danos que a perfuração sobrepessão pode causar na formação durante a perfuração foram conduzidos por Jilani *et al.* (2002). Os autores construíram um aparato experimental para simular o processo de circulação de fluido de perfuração adjacente a face da formação rochosa. Além disso, observaram o comportamento da espessura de penetração do fluido no substrato poroso como função da pressão na qual o fluido escoou.

Whitfill e Hemphill (2004) apresentaram testes de resiliência para partículas de diferentes materiais. Com os resultados obtidos experimentalmente, concluíram que realizar uma pré-mistura do material de perda de circulação (LCM) com o fluido de perfuração antes da perfuração ajuda a garantir a manutenção da distribuição de tamanho de partículas (PSD). Além disso, observaram que uma combinação de materiais de diferentes formas e composições apresenta maior eficácia no controle de perda de fluido para a formação rochosa.

Graf e Therrien (2005) estudam de forma experimental o escoamento líquido-sólido em meio parcialmente poroso com uma única fratura, de modo a avaliar a influência da massa específica do fluido no transporte de soluto.

Kumar e Savari, (2011) abordam os mecanismos de controle de perda de circulação através da utilização de partículas sólidas e as zonas onde a perda de circulação ocorre. Estudaram experimentalmente as propriedades de partículas (razão de aspecto, tamanho, resiliência e resistência) de diferentes materiais utilizados para controlar o fenômeno de invasão e o efeito da variação de cada propriedade com a diminuição da perda de circulação através da fratura. Concluíram que partículas que apresentam maior razão de aspecto, maior resiliência e maior resistência ao esmagamento possuem maior efetividade no selamento das fraturas e no controle da perda de circulação.

Huang *et al.* (2011) desenvolveram um trabalho analítico sobre formações rochosas naturalmente fraturadas e apresentaram uma equação para determinação da espessura de uma fratura a partir de alguns parâmetros de entrada (raio do poço, gradiente de pressão e volume de fluido perdido). Além disso, validaram o método proposto com base em dados apresentados em outros trabalhos publicados.

Conceitos de programa de gestão de perda de circulação, além de fundamentos de perda de circulação são abordados por Cook *et al.* (2012). Os autores apresentam o conceito de densidade de circulação equivalente (ECD) e explicam como é executado um teste de *leakoff*. Explicam também a faixa ECD segura para se perfurar um poço, além dos conceitos de materiais de fortalecimento do poço (WSM) e formação de torta.

Almagro *et al.* (2014) abordam os tipos de perda de circulação de acordo com a vazão de fluido através da fratura, além dos tipos de tratamentos de fissuras e fraturas durante a perfuração e durante a cimentação. Apresentam estudos de casos utilizando diferentes tipos de LCMs para diferentes formações rochosas e seus respectivos resultados.

Uma classificação dos diferentes materiais particulados utilizados no combate a perda de circulação de acordo com geometria, material e características das partículas foi apresentada por Alsaba e Nygaard (2014).

Calçada *et al.* (2015) desenvolveram um aparato experimental para simular o escoamento em fraturas, utilizando partículas de diferentes formas e tamanhos para preenchimento de fraturas de três espessuras distintas. Variaram o fluido e as partículas utilizadas para comparar o desempenho das diferentes soluções no intuito de atenuar a perda de fluido através da fratura. Concluíram que o aparato desenvolvido é capaz de fornecer os dados necessários para analisar a eficiência de cada solução no selamento das fraturas. Esse aparato é semelhante ao aparato utilizado no presente estudo, com diferenças em relação ao circuito, à geometria da fratura e aos materiais utilizados.

A partir dos trabalhos revisados, é possível identificar que o presente estudo, apesar de específico para solucionar o problema de perda de circulação, que é o foco principal do desenvolvimento deste projeto, envolve também diferentes conceitos da engenharia, que abrangem desde conhecimentos básicos de engenharia de petróleo até conhecimentos mais direcionados em relação aos fenômenos de transporte com material particulado em meios fraturados.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordados os conceitos de perda de circulação, as zonas onde esse fenômeno ocorre, métodos de controle e os materiais de perda de circulação (*lost circulation materials* – LCM's). Além disso, conceitos de calibração e caracterização de instrumentos, análise estatística de dados e incerteza de medição também serão discutidos.

3.1 Perda de circulação

A perda de circulação é definida como a perda de fluido de perfuração através dos poros e fissuras das formações rochosas a serem perfuradas (GOINS JR, 1952). Os tipos de perda de circulação podem ser classificados de acordo com sua severidade ou até mesmo de acordo com a sua vazão, conforme Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Classificação da perda de circulação de acordo com sua severidade.

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

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

Nota-se 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 perda quando comparado com fluido a base de óleo (*oil based fluid* – OBF) ou fluido de base sintética (*synthetic based fluid* – SBF).

A Tabela 3.1 classifica as perdas de quatro maneiras: perda pequena ou infiltração, perda parcial, perda severa e perda total. Além disso, a Tabela 3.1 relaciona cada classe de perda com a vazão de perda de acordo com cada fluido e também indica os cenários mais propensos a ocorrer cada tipo de perda.

Quando circulando através do poço, o fluido de perfuração é o responsável por gerar a pressão hidrostática necessária para manter a integridade das paredes da formação. Essa contribuição do fluido pode ser expressa em termos da densidade de circulação equivalente (*equivalent circulating density* – ECD). Em uma condição *overbalance*, a ECD ajuda a criar a pressão hidrostática dentro do poço que é maior que a pressão de poro da formação exposta (COOK *et al.*, 2012). A Eq.(3.1) apresenta como é calculado o valor de ECD.

$$ECD = \frac{P_A}{0,052TVD} + MW \quad (3.1)$$

sendo P_A 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.

O cálculo de ECD auxilia no controle do peso do fluido, uma vez que a ECD do fluido de perfuração utilizada no processo de perfuração deve estar inserida dentro de uma faixa segura de operação, definida pela pressão de poro da formação e a pressão que induz formação de fraturas na rocha, conforme se observa na Figura 3.1.

Nota-se que existe uma faixa de operação na qual não há influxo de fluido da formação no sentido do poço, instabilidades na parede da formação e invasão de fluido do poço para a formação rochosa. Essa situação é caracterizada como sendo uma faixa segura de operação, sem comprometer o fluido de perfuração ou o poço perfurado.

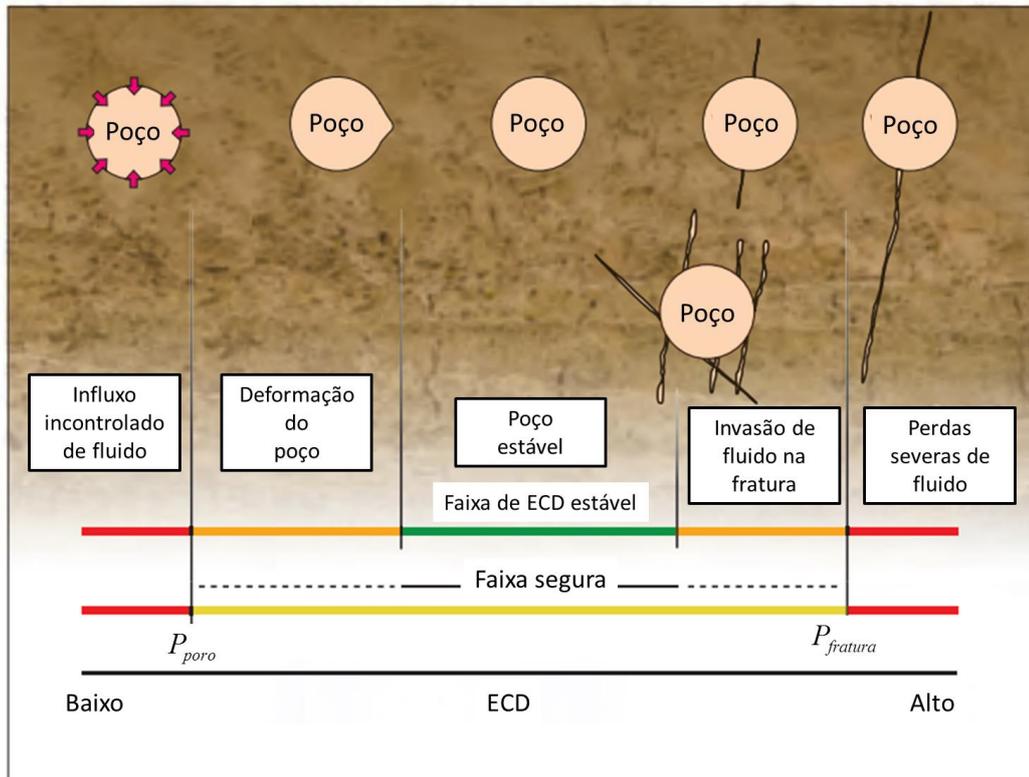


Figura 3.1 - Faixa segura de operação e perfil do poço em função da ECD do fluido de perfuração.

(Fonte: Adaptado de COOK *et al.*, 2012)

3.1.1 Zonas de perda de circulação

É possível dividir as zonas de perda de circulação em três: formações permeáveis, fraturas naturais e fraturas induzidas.

3.1.1.1 Formações permeáveis

As zonas de perda de fluido mais comuns são as formações que apresentam alta permeabilidade. Por causa da alta permeabilidade apresentada e do tamanho elevado de poro, partículas sólidas presentes no fluido de perfuração não conseguem formar uma torta estável, iniciando a perda de fluido para a formação. Dependendo da vazão de fuga, diferentes tipos de soluções podem ser adotadas, porém a mais comum entre elas é a utilização de materiais de perda de circulação (LCM). LCM's devidamente dimensionados são adicionados ao fluido de perfuração com o objetivo de preencher os poros da formação e acabar com as perdas. É

preferível o uso de materiais particulados que possam ser removidos no momento da produção de óleo e gás. Para isso, normalmente são utilizadas partículas solúveis em soluções ácidas, porém esse tipo de partícula nem sempre é efetivo na selagem a formação. Mesmo não sendo interessante, muitas vezes é necessário o uso de partículas não solúveis em soluções ácidas para tratar a perda de circulação (KUMAR e SAVARI, 2011).

3.1.1.2 Fraturas naturais

As formações que apresentam a maior dificuldade no tratamento de perda de circulação são as formações impermeáveis, como por exemplo os carbonatos naturalmente fraturados. A falta de informação do real tamanho da fratura dificulta o dimensionamento da distribuição de tamanho das partículas (*particle size distribution* – PSD). Com isso, o tratamento desse tipo de perda vai além de apenas utilizar LCM's (KUMAR e SAVARI, 2011).

3.1.1.3 Fraturas induzidas

Em formações perfuradas com alta densidade de circulação equivalente (ECD), por causa da pressão no poço, o surgimento de fraturas pode ser induzido. Fraturas induzidas representam um problema ainda mais complicado, uma vez que a forma e a estrutura da fratura estão sempre sujeitas a natureza da formação, aos efeitos da perfuração, assim como às influências geológicas ao longo do tempo.

As fraturas que são induzidas pelo processo de perfuração naturalmente apresentam menor tamanho. No entanto, dependendo da pressão do poço e da pressão de propagação da fratura, o comprimento e a espessura dessas fraturas podem ser alterados drasticamente. Neste caso, soluções comuns de utilização de LCMs normalmente são suficientes para conter o fenômeno de invasão. Porém, devido a variações de pressão no poço, as fraturas podem apresentar propensão de abertura e fechamento (KUMAR e SAVARI, 2011).

3.1.2 Testes preventivos

Verificar a integridade da formação adjacente ao poço é um importante requisito durante o processo de perfuração. Decisões cruciais em relação à determinação da massa específica do fluido de perfuração, por exemplo, são tomadas de acordo com os resultados obtidos a partir dos testes preventivos, como o teste de *leakoff* e o teste de integridade da formação (VAN OORT e VARGO, 2008).

3.1.2.1 Teste de *leakoff* (LOT)

Como a perda de circulação é um fenômeno dependente da pressão no interior do poço em relação à pressão de poros e de fratura da formação rochosa, um teste de pressão é realizado no poço para se conhecer melhor as características da formação geológica perfurada. Esse teste é denominado teste de *leakoff*.

Para determinar a faixa de pressão a se trabalhar, as companhias realizam o teste de *leakoff*. Esse teste consiste em injetar fluido de perfuração dentro do poço com a cabeça do poço fechada, *i. e.*, sem retorno de fluido para a superfície, com o objetivo de monitorar os aumentos e quedas de pressão ao longo do tempo, com uma vazão de injeção de fluido constante. Na Figura 3.2 é possível observar um aumento gradativo de pressão no interior do poço conforme ocorre a injeção de fluido.

Esse aumento linear ocorre até que se atinge a pressão de *leakoff*, que é a pressão na qual o fluido de perfuração começa a invadir e infiltrar a formação rochosa. A pressão no interior do poço continua a subir, porém agora com menor intensidade, até que se atinge a pressão de *breakdown*, que é a pressão na qual se inicia a formação de fraturas na rocha. Com isso, a pressão no poço reduz abruptamente, uma vez que se perde grande quantidade de fluido para a formação através da fratura formada. Neste momento, a bomba de injeção de fluido de perfuração é desligada e é possível então determinar a pressão de fechamento de fratura, uma vez que, como não há mais uma pressão hidrostática elevada forçando a fratura a se propagar, a fratura tende a fechar novamente devido ao peso da

própria formação. A bomba volta a ser ligada e então se determina a pressão de reabertura de fratura (COOK *et al.*, 2012).

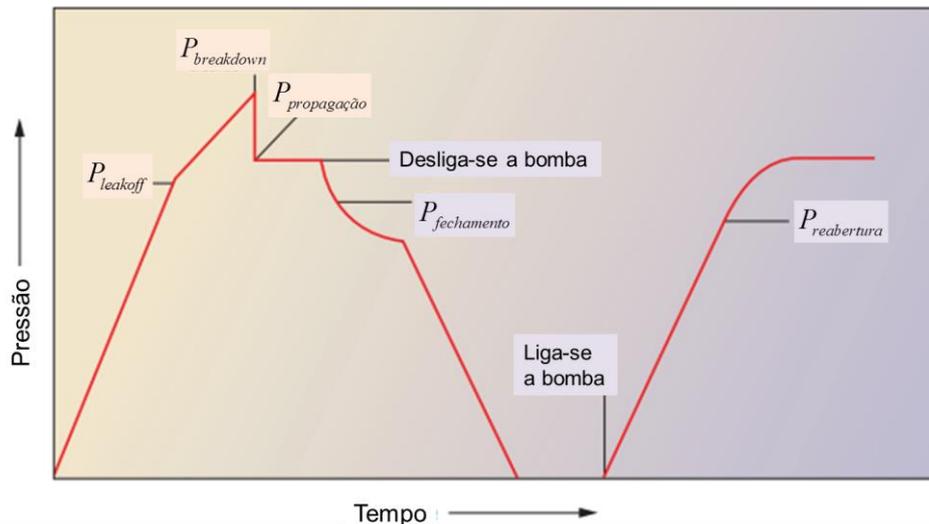


Figura 3.2 - Representação gráfica da pressão em função do tempo em um teste de *leakoff* para vazão de fluido de perfuração constante.

(Fonte: Adaptado de COOK *et al.*, 2012)

Depois de realizado o teste de *leakoff*, pode-se conhecer melhor a formação geológica perfurada e determinar a janela de pressões e ECD a se operar.

3.1.2.2 Teste de integridade da formação (FIT)

Muitas vezes a indústria confunde o teste de *leakoff* (LOT) com o teste de integridade da formação (*formation integrity test* – FIT). Porém, para se obter uma melhor análise de resultados em ambos os testes, é importante compreender a diferença entre os testes.

A metodologia utilizada para a realização do FIT é praticamente a mesma utilizada no LOT. A diferença entre os testes está no objetivo de cada um. Enquanto o LOT tem como objetivo determinar a pressão de ruptura da formação rochosa, o FIT serve para testar a resistência do poço a uma pressão pré-estabelecida. O FIT é executado quando já se conhece a pressão na qual o poço será perfurado (HANNEGAN e ARNONE, 2012).

3.1.3 Controle de perda de circulação

Controlar a perda de circulação de fluido de perfuração durante a construção de um poço vai além de apenas selecionar o tipo apropriado de LCM. Um planejamento completo para contenção do problema se faz necessário (WHITFILL e HEMPHILL, 2003). Esse planejamento inclui ferramentas como:

- Análise de estabilidade do poço;
- Modelagem hidráulica para estimar a densidade de circulação equivalente (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).

De acordo com Cook *et al.* (2012), o programa de gerenciamento de perda de circulação deve ser utilizado para minimizar os efeitos do problema.

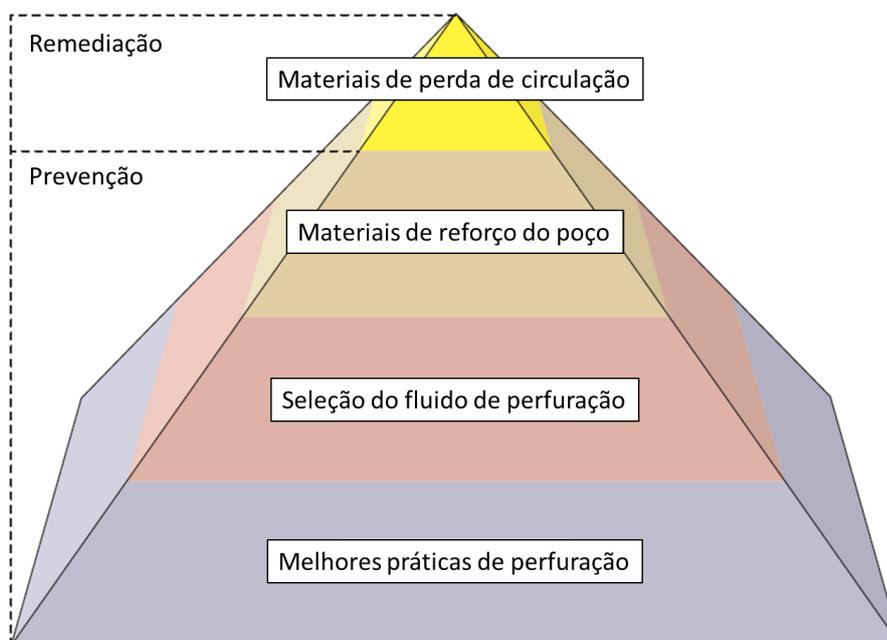


Figura 3.3 - Programa de gerenciamento de perda de circulação.
(Fonte: Adaptado de COOK *et al.*, 2012)

O topo da pirâmide de gerenciamento de perda de circulação representa a utilização de LCM's para o combate a perda de fluido. No entanto, essa é uma medida para remediar o problema. Medidas preventivas, como representadas nas outras três camadas inferiores da pirâmide, devem ser executadas prioritariamente para evitar a ocorrência do fenômeno.

No âmbito do estudo deste trabalho, que é o combate a perda de circulação, uma das alternativas mais utilizadas como medida corretiva é através da utilização de LCM's.

Devido a importância na utilização de LCM's em combater ou prevenir perdas de fluido, aperfeiçoar a habilidade desses materiais em controlar perdas pode impactar significativamente no sentido de reduzir tanto o tempo não produtivo (NPT) quanto os riscos que envolvem o processo de perfuração. Com o aumento na complexidade da perfuração, a indústria tem desenvolvido novas tecnologias para aumentar a eficácia na prevenção ou remediação das perdas de circulação. Essas novas tecnologias incluem o uso de novos materiais desenvolvidos e a otimização de combinações dos LCM's convencionais (ALSABA e NYGAARD, 2014).

Os LCM's podem ser classificados de acordo com sua composição, forma geométrica ou característica durante o processo de combate a perda de fluido. Essa classificação se faz necessária devido ao elevado número de tipos de LCM's disponíveis no mercado. 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 Anexo A apresenta uma lista de alguns LCM's utilizados pela indústria. A lista foi dividida de acordo com a característica do material e apresenta o nome comercial e o fabricante de cada LCM.

Na Tabela 3.2 são apresentados os principais tipos de materiais utilizados como LCM, assim como as principais características e exemplos (ALSABA e NYGAARD, 2014).

Tabela 3.2 - Tipos de materiais utilizados como LCM, com suas características e exemplos.

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

3.2 Calibração de instrumentos de medição

O objetivo de uma medição é determinar o valor do mensurando, isto é, o valor da grandeza específica a ser medida. Uma medição começa, portanto, com uma especificação apropriada do mensurando, do método de medição e do procedimento de medição. Em geral, o resultado de uma medição é somente uma aproximação ou estimativa do valor do mensurando e, assim, só é completo quando acompanhado pela declaração da incerteza dessa estimativa. Em muitos casos, o resultado de uma medição é determinado com base em séries de observações obtidas sob condições de repetibilidade (ABNT e INMETRO, 2003).

Calibração é um procedimento experimental que tem como objetivo correlacionar valores indicados por um sistema de medição com a correspondente grandeza medida (DOEBELIN, 1989).

De acordo com Doebelin (1989), o tratamento das características de desempenho de um instrumento pode ser dividido em características estáticas e dinâmicas.

As características estáticas de desempenho de um instrumento podem ser obtidas através de um processo denominado calibração estática. A calibração estática é a determinação da relação entre os dados de entrada e saída do instrumento quando as condições operacionais são observadas em regime permanente e como resultado tem-se a curva característica estática (KOBAYOSHI, 2012). A curva característica estática é obtida pelos pontos originários dos ensaios de calibração plotados e ajustados através de uma função polinomial, conforme observa-se na Figura 3.4.

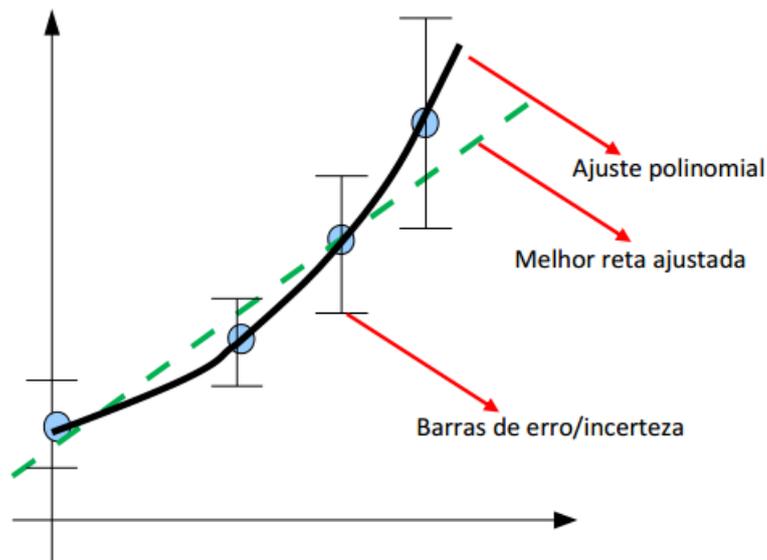


Figura 3.4 - Esquema da metodologia de construção de uma curva estática.
(Fonte: STAHLKE e FRITOLI, 2014)

A calibração estática possui as seguintes características:

1. Com exceção da variável sob teste, todas as demais entradas são mantidas constantes;
2. Varia-se a variável sob teste em diferentes valores constantes, gerando, assim, diferentes valores constantes na saída;

3. A relação entre a entrada e a saída é a calibração estática, a qual é válida somente para as condições estabelecidas nos testes.

Por sua vez, a calibração dinâmica propõe a determinação da relação entre o comportamento transitório do sinal de entrada e de saída. Em geral, são formuladas equações diferenciais para tratar dessa metodologia de calibração. Porém, por se tratar de uma metodologia mais complexa e que ultrapassa a proposta dessa monografia, a calibração dinâmica não será abordada com maior profundidade nem será utilizada para calibrar os instrumentos instalados na unidade experimental.

Para analisar os dados obtidos através das curvas estáticas de calibração são utilizados conceitos estatísticos e de incertezas experimentais.

A incerteza de medição é um valor associado ao resultado da medição que descreve uma faixa na qual é esperado conter o valor verdadeiro da medida, com um determinado nível de confiança. A incerteza é um parâmetro que 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):

- Definição incompleta da grandeza;
- Falhas na definição da grandeza;
- Amostragem não-representativa (a amostra medida pode não representar a grandeza definida);
- Conhecimento inadequado dos efeitos das condições ambientais sobre a medição ou medição imperfeita das condições ambientais;
- Erro de tendência pessoal na leitura de instrumentos analógicos;
- Resolução finita do instrumento ou limiar de mobilidade;
- Valores inexatos dos padrões de medição e materiais de referência;
- Valores inexatos de constantes e de outros parâmetros obtidos de fontes externas e usados no algoritmo para obtenção de dados;
- Aproximações e suposições incorporadas ao método e procedimento de medição;
- 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 Inmetro (2012) 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 adequada de acordo com o grau de credibilidade no qual um evento irá acontecer. Os dois tipos de avaliação provém de distribuições de probabilidade e a incerteza resultante é quantificada através de variância ou desvio 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 (CIPM, 1981).

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

3.2.1 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 \bar{x} e desvio padrão σ , o valor da observação aleatória seja x pode ser obtida pela Eq.(3.2):

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\bar{x}}{\sigma}\right)^2\right]} \quad (3.2)$$

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. (3.3):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.3)$$

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 pela Eq.(3.4) se o número de amostras for maior que 30 e pela Eq.(3.5) caso o número de amostras for menor que 30.

$$\sigma = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \quad (\text{para } n > 30) \quad (3.4)$$

$$\sigma = \left[\frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2} \quad (\text{para } n < 30) \quad (3.5)$$

3.2.2 Incerteza na medição

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

- a melhor estimativa do valor verdadeiro da variável mensurada;
- 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 3.3.

Tabela 3.3 – Fator de abrangência em relação 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%.

3.2.3 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 $\frac{1}{2N}$, onde N é o número de medições realizadas.

O parâmetro $d = x_{susp} - \bar{x}$ representa 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 dados, é dado pela Eq.(3.6):

$$\frac{1}{2N} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{d_{\max}}{\sigma}\right)^2\right] \quad (3.6)$$

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

A Tabela 3.4 apresenta valores para a razão entre o máximo desvio aceitável e o desvio padrão, para diferentes valores de N , obtidos através da Eq.(3.6).

Tabela 3.4 - 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

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

- a) mede-se a variável N vezes e estima-se a média e o 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 seja maior, rejeita-se o ponto e recalcula-se a média e o desvio.

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

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentado com detalhes o aparato experimental utilizado para conduzir os testes de escoamento líquido-sólido e formação de leito de partículas.

Apresenta-se o circuito hidráulico com todos os componentes (bomba, tanque misturador, transdutores de pressão, medidor de vazão, tubulações e válvulas) e as características de cada um.

O projeto e desenvolvimento da seção de testes é apresentado de acordo com as considerações e simplificações feitas, concepção, fabricação e condições de contorno, além da instrumentação da seção de testes.

Um sistema de aquisição de dados é utilizado para obtenção dos resultados das grandezas mensuradas. O *software* utilizado para monitorar os experimentos também é mostrado.

Com relação ao escoamento particulado, que percorrerá o circuito hidráulico do aparato experimental, são abordados diferentes aspectos tanto do material particulado quanto da composição da mistura água-glicerina utilizada nos ensaios. Testes preliminares de sensibilidade desta mistura com partículas serão apresentados na Seção 5.1. Estes ensaios servirão como base para a determinação da mistura do fluido quando investigado o fenômeno de invasão pela fratura. A mistura de água-glicerina possui forças de interação com o material particulado que proporcionam as condições necessárias para que exista o processo de migração das partículas do canal para a região da fratura, e com isso caracterizar o processo de formação do leito de partículas.

4.1 Apresentação do aparato experimental

Uma modificação foi realizada no aparato experimental desenvolvido por Stahlke e Fritoli (2014). Essa reformulação foi realizada a partir do projeto, construção e instrumentação de uma unidade experimental capaz de simular o escoamento particulado e a formação de leito de partículas em canal fraturado.

A Figura 4.1(a) apresenta o esquema do circuito hidráulico da unidade experimental e a Figura 4.1(b) o projeto tridimensional, destacando os principais componentes do aparato.

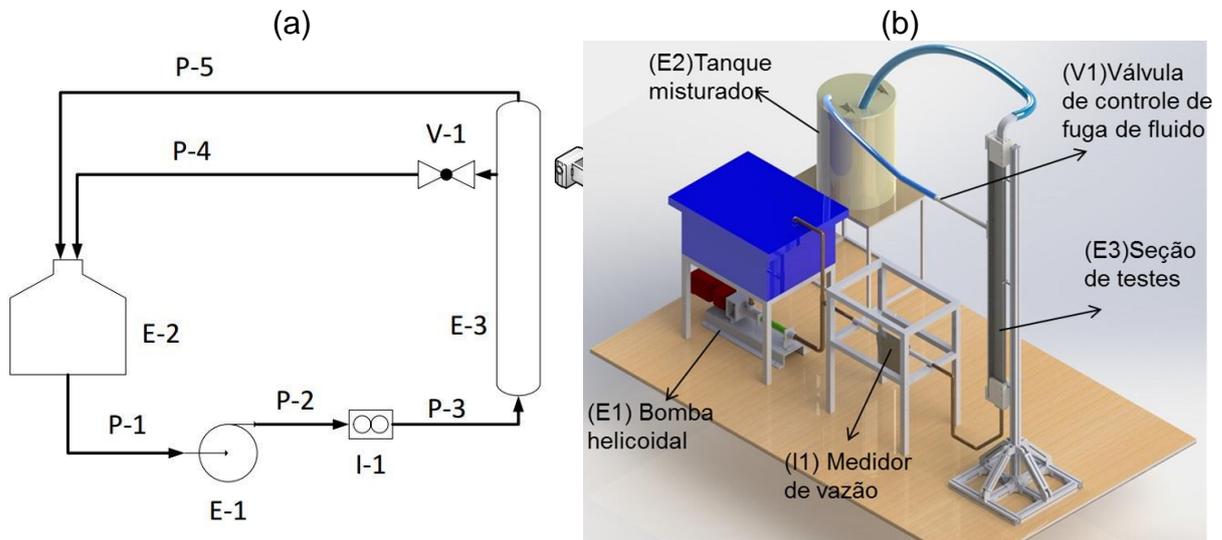


Figura 4.1 – Aparato experimental: (a) esquema do circuito hidráulico e (b) projeto tridimensional¹.

O fluido juntamente com as partículas, são misturados e mantidos homogêneos no tanque misturador (E-2). Então, a mistura é succionada pela bomba (E-1), proporciona o escoamento do fluido através de todo o sistema. Na Figura 4.1(a), as setas indicam a direção do fluxo dentro do circuito. Já na saída da bomba encontra-se o medidor de vazão mássico coriolis (I-1) que mensura em tempo real a vazão total do sistema. Após passar pelo medidor de vazão, a mistura adentra o canal da seção de testes (E-3) e escoam até encontrar a fratura, que proporciona uma espécie de bifurcação ao escoamento. Com isso, parte do fluido escoam pela tubulação que representa a fratura, parte continua escoando através do canal. O fluido que continuou escoando pelo canal retorna ao tanque misturador através da tubulação P-5 e o fluido que escoam pela fratura retorna ao tanque misturador pela tubulação P-4, fechando então o circuito.

Na Figura 4.2 é apresentado o projeto tridimensional em CAD da unidade experimental, fornecendo todos os componentes presentes no aparato. A Tabela 4.1

¹ Figuras e tabelas que não apresentam a fonte de referência são de autoria própria do autor desta monografia.

lista os equipamentos e instrumentos utilizados, assim como as características das tubulações e válvulas.

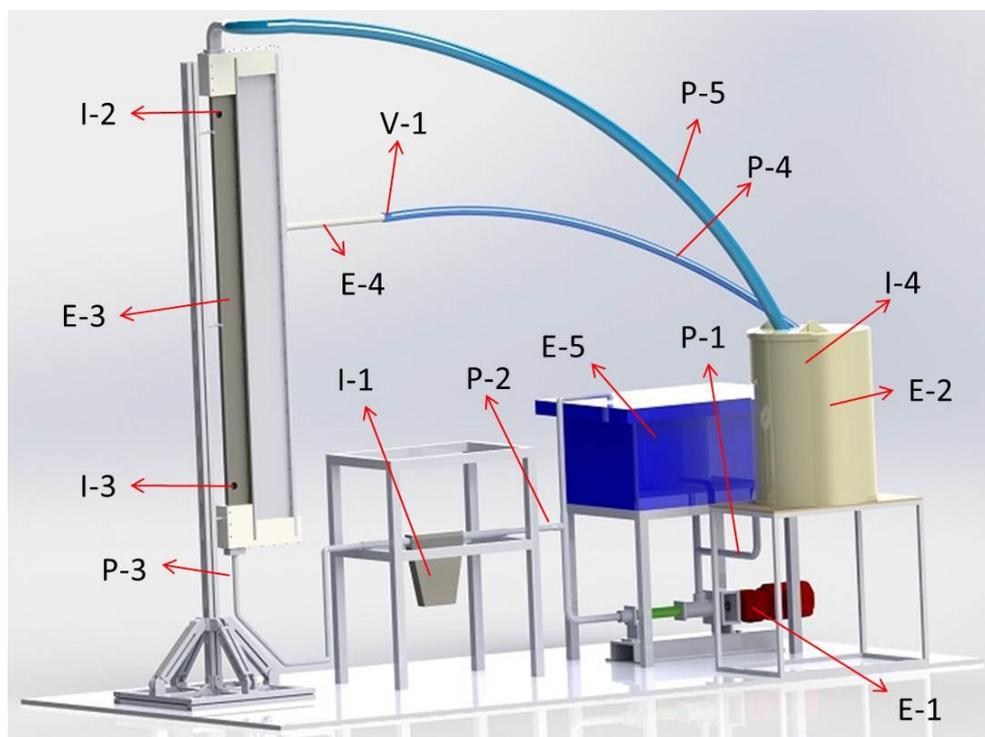


Figura 4.2 - Indicação dos componentes do circuito experimental.

Tabela 4.1 - Identificação 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

A Figura 4.3 apresenta uma visão geral do aparato experimental instalado nas dependências CERNN-UTFPR com as devidas indicações dos principais componentes.

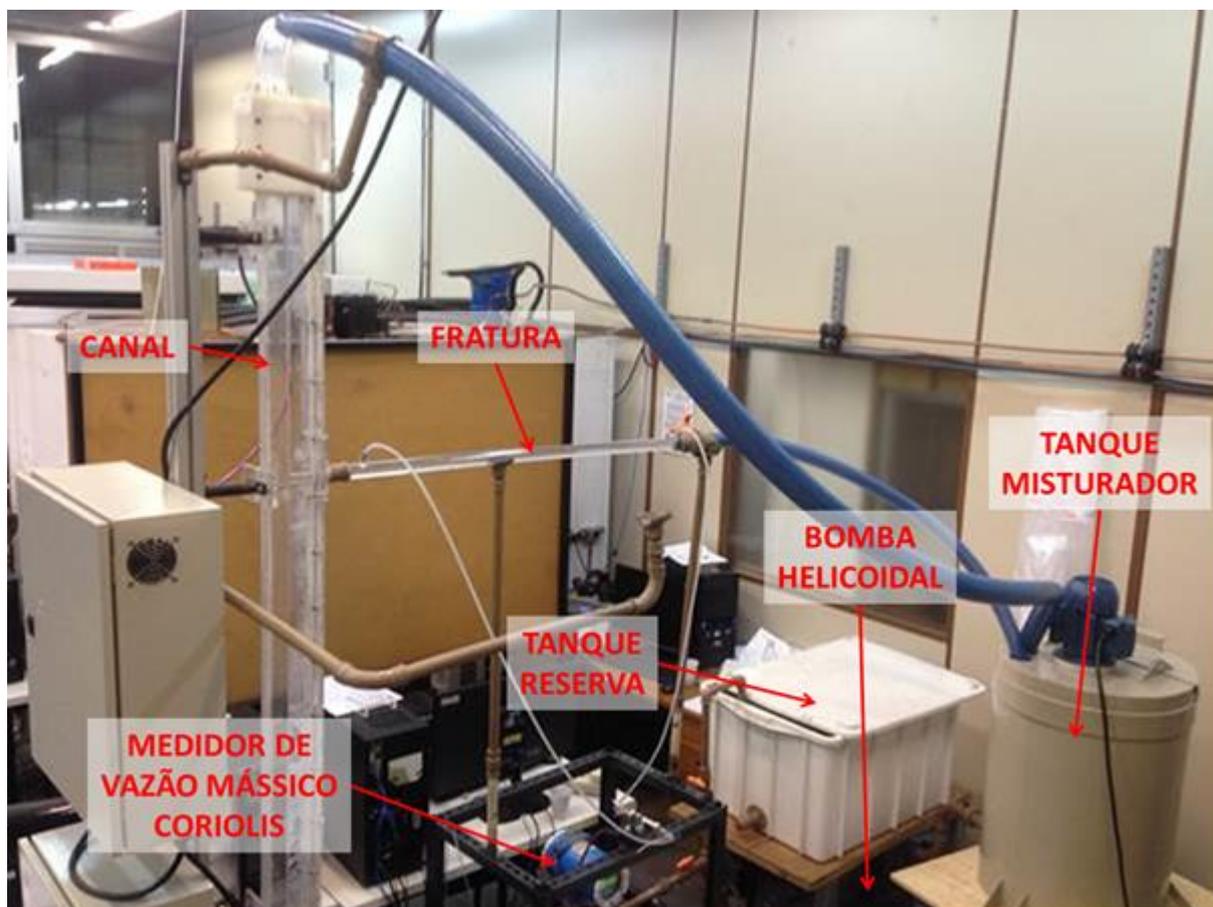


Figura 4.3 - Visão geral do aparato experimental.

Um tanque com misturador modelo BMIX 1,5 DF (BOMBETEC, 2015) com capacidade de 100 litros é utilizado para fornecer uma mistura homogênea, entre as fases dispersa (partículas) e contínua (mistura água-glicerina), para o sistema. A Figura 4.4 apresenta o tanque misturador utilizado.

Uma bomba helicoidal modelo NEMO NM 021BY (NETZSCH, 2006) com faixa de operação de 90 a 730 l/h é utilizada para proporcionar o escoamento fluido-sólido através de todo sistema do aparato. O controle da vazão da bomba é feito através de um inversor de frequência, que permite uma ampla faixa de operação. A Figura 4.5 apresenta a bomba helicoidal utilizada.

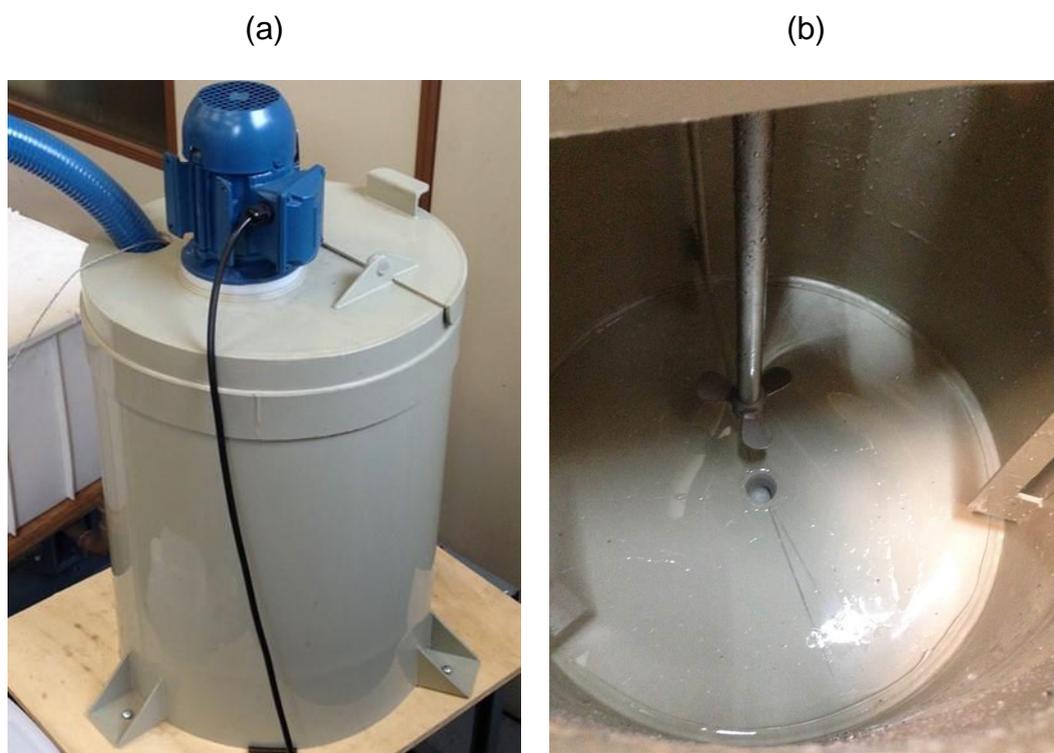


Figura 4.4 - Tanque misturador utilizado: (a) exterior do tanque, com o motor elétrico acoplado e (b) detalhe das pás no interior do tanque.



Figura 4.5 - Bomba helicoidal utilizada no experimento.

Todas as tubulações são fabricadas em PVC. A tubulação de sucção possui diâmetro de 32 mm e as tubulações de recalque e de entrada na seção de testes possuem diâmetro de 25 mm de diâmetro. As tubulações de saída da fratura (P-4) e

saída da seção de testes (P-5) são mangueiras de 2 polegadas e 3 polegadas de diâmetro, respectivamente. O tanque reserva (E-5) é utilizado para escoamentos monofásicos ou para manutenção e limpeza da seção de testes.

4.2 Aspectos da seção de testes

Para definir a geometria utilizada para construção da seção de testes do aparato experimental, algumas considerações foram feitas para simplificar o problema. Considera-se apenas o estudo do escoamento ascendente pelo espaço anular, desprezando o escoamento pelo interior da coluna de perfuração e através da broca. O problema será considerado como simétrico e a fratura discreta disposta transversalmente em relação ao espaço anular. Além disso, a formação rochosa será considerada como impermeável.

Algumas condições de contorno são consideradas para a operação da unidade experimental. Entre elas destacam-se as pressões na saída do canal e na saída da fratura, que são iguais a pressão atmosférica. Além disso, outra condição de contorno considerada é a vazão mássica constante durante a realização de cada teste.

Com isso, a seção de testes foi definida e projetada conforme Figura 4.6. A vista lateral da seção de testes na Figura 4.6 apresenta um corte na região da fratura para visualização do detalhe do início da descontinuidade no canal. Apresenta-se também a seção transversal A-A na Figura 4.6, que pode ser observada detalhadamente na Figura 4.7(a).

A Figura 4.7 mostra o corte transversal (a) e longitudinal (b) da seção de testes. Na Figura 4.7(a) observa-se a indicação da largura do canal h_{FR} e da profundidade da fratura Z_{FR} . Na Figura 4.7(b) observa-se 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.

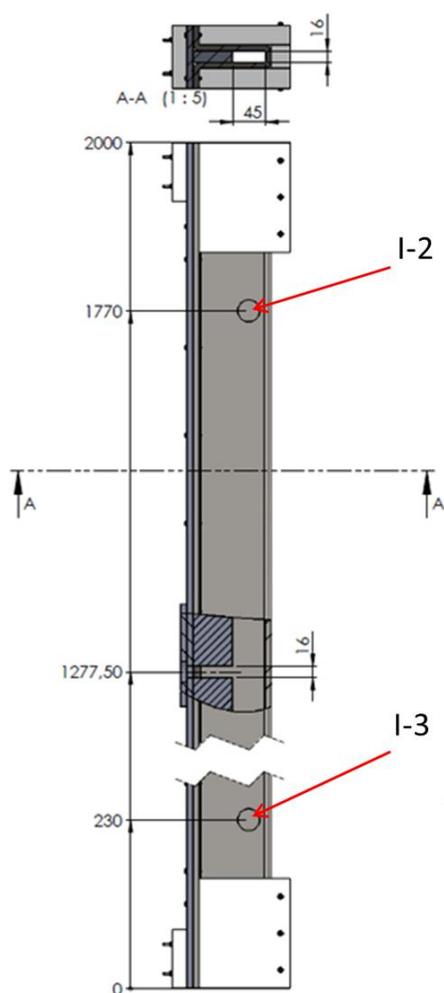


Figura 4.6 - Projeto do canal da seção de testes com dimensões

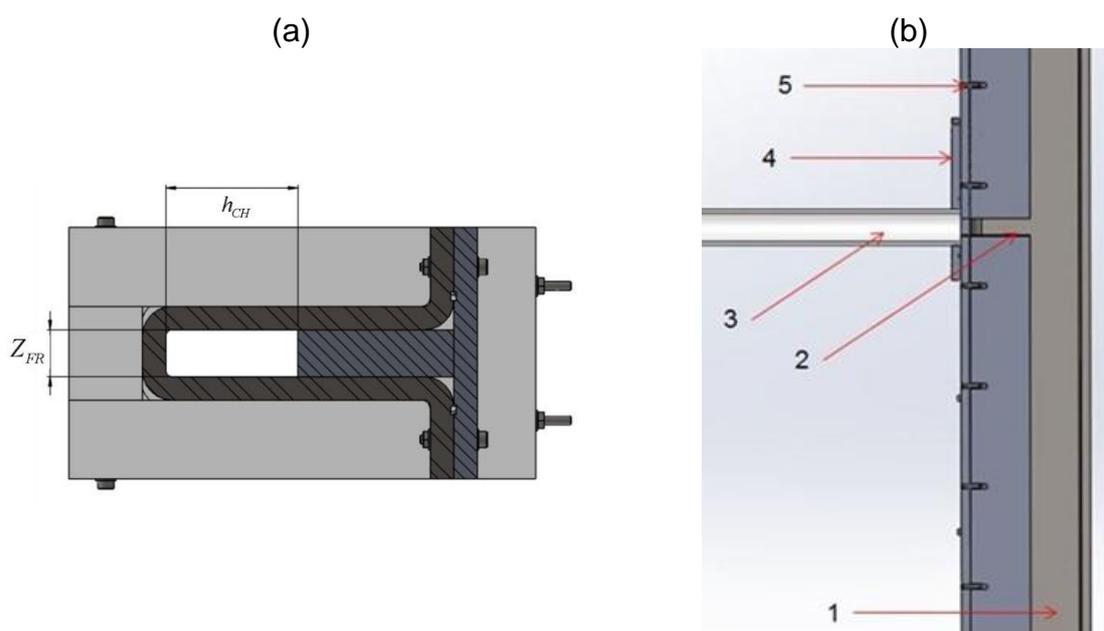


Figura 4.7 - Vistas em corte da seção de teste: (a) transversal e (b) longitudinal

A Figura 4.8 apresenta a fratura utilizada para os testes de formação de leito de partículas e as indicações dos componentes.

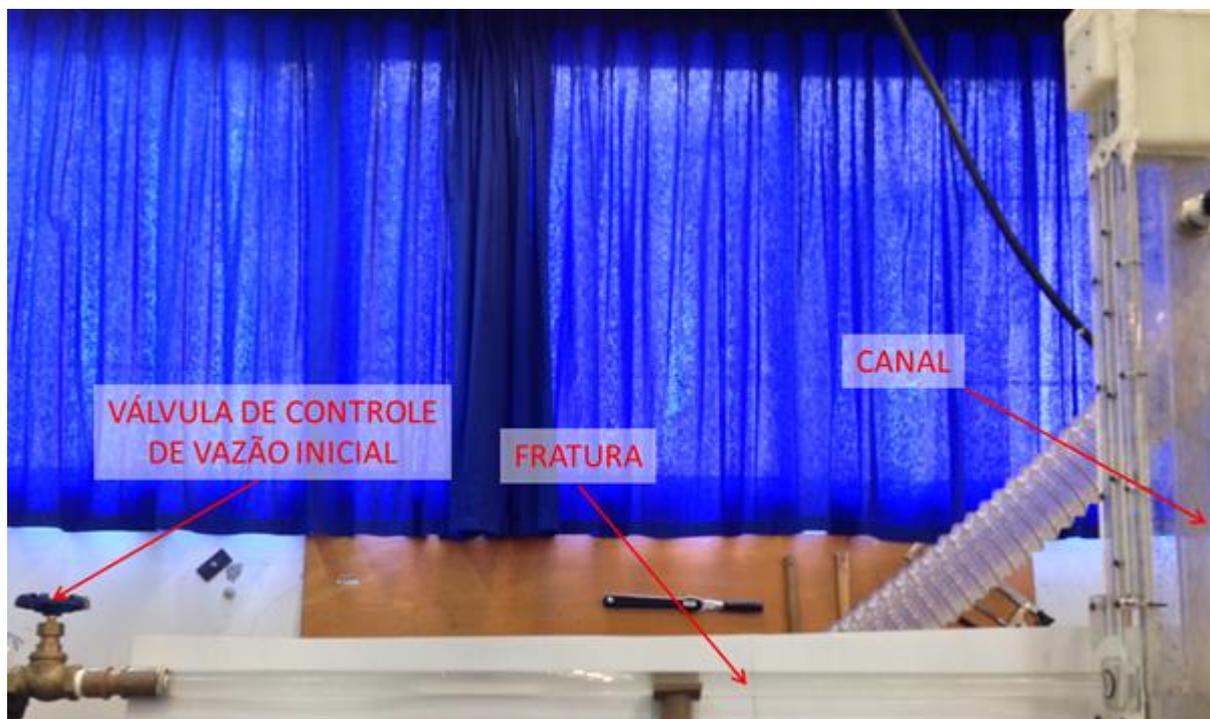


Figura 4.8 - Visão geral da fratura da seção de testes junto ao canal.

A fratura, indicada na Figura 4.2 como E-3, é representada através de um tubo em acrílico para a visualização do pacote de partículas formado durante o processo de preenchimento. O tubo possui 1 m de comprimento e diâmetro interno de 20 mm, com 2,5 mm de espessura de acrílico. Na saída da fratura existe uma válvula para o controle da vazão de fuga do fluido. O retorno do fluido no final da fratura é direcionado para o tanque misturador através de uma mangueira de PVC de 2 polegadas.

A Figura 4.9(a) apresenta a posição da flange, conectando a fratura com o canal principal de escoamento da seção de testes. Esta flange permite a mudança de seção transversal circular da fratura para a seção quadrada do canal. O projeto da flange é apresentado na Figura 4.9(b).



Figura 4.9 - Flange de conexão da fratura com o canal da seção de testes: (a) posição de montagem e (b) projeto tridimensional

A Figura 4.10(a) apresenta a vista isométrica e a Figura 4.10(b) um plano de corte do bocal de saída da seção de testes. Observa-se que a seção transversal do bocal é igual a seção transversal retangular do canal, com o objetivo de evitar qualquer efeito sobre o escoamento. O retorno do fluido na saída do bocal é feito através de uma mangueira de PVC de 3 polegadas, de forma que a condição de contorno de pressão na saída do bocal é igual a pressão atmosférica.

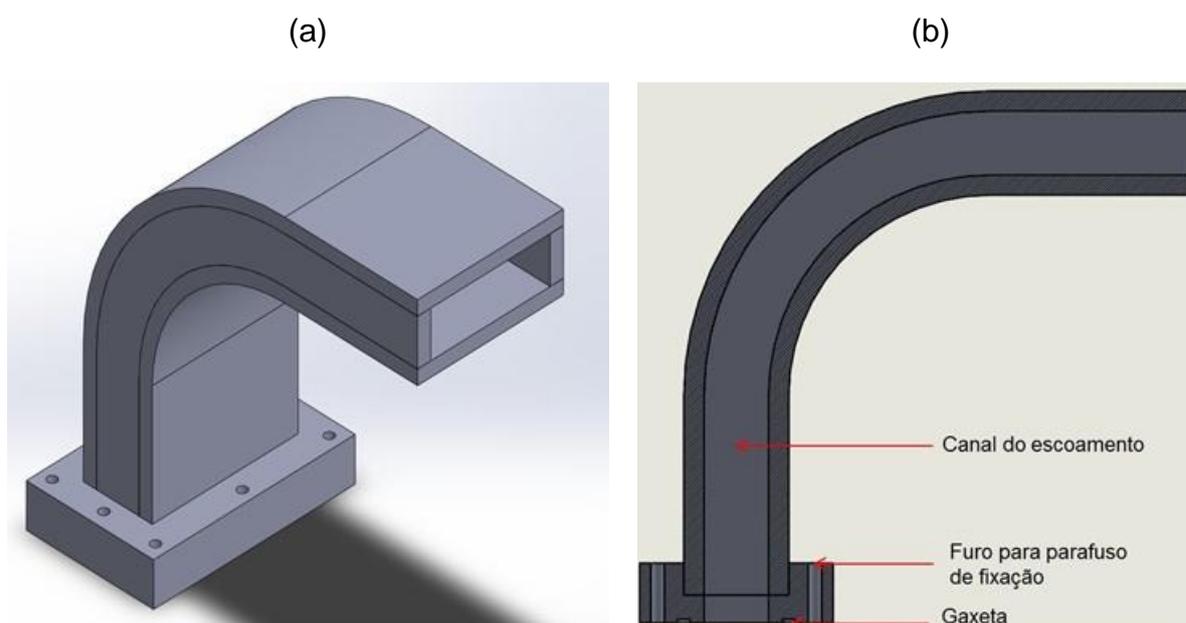


Figura 4.10 - Bocal de saída da seção de testes: (a) vista isométrica e (b) plano de corte

A Figura 4.11 apresenta diferentes vistas e planos de corte do bocal de entrada da seção de testes. Este bocal permite a mudança de seção transversal da tubulação de entrada do circuito hidráulico do aparato para a seção transversal retangular do canal.

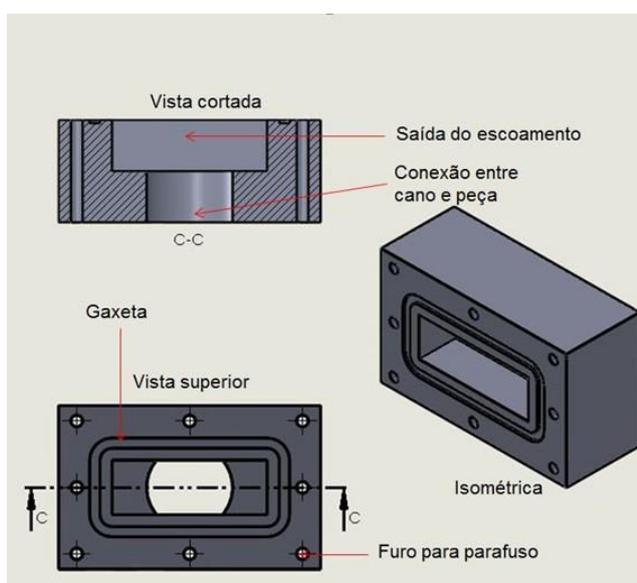


Figura 4.11 - Bocal de entrada da seção de testes

A Figura 4.12 apresenta os detalhes dos bocais de entrada (a) e de saída (b) do canal da seção de testes.



Figura 4.12 - Detalhe dos bocais da seção de testes: (a) entrada e (b) saída.

4.3 Instrumentos de medição

Um medidor de vazão mássica tipo Coriolis modelo RHM-15 (METROVAL, 2007) com faixa de medição de 4 a 200 kg/min foi instalado para a medição da vazão mássica do escoamento em tempo real. A Figura 4.13 apresenta o medidor utilizado.

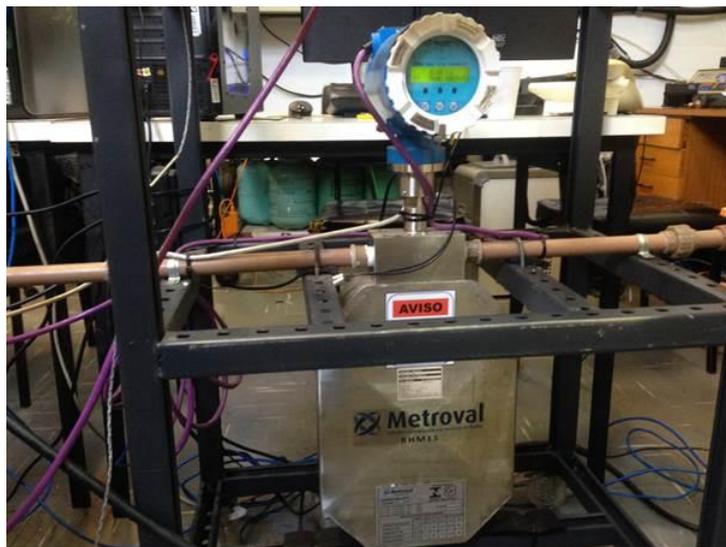


Figura 4.13 - Medidor de vazão mássica tipo coriolis utilizado no experimento.

Dois transdutores de pressão manométrica modelo S-11 (WIKA, 2012) foram instalados na seção de testes, um a montante (I-3) à fratura com faixa de medição de 0 a 0,6 bar e um a jusante (I-2) à fratura com faixa de medição de 0 a 0,4 bar, conforme se observa na Figura 4.14(a), com o objetivo de medir as pressões locais. A Figura 4.14(b) apresenta o detalhe do transdutor instalado no canal.

Um termopar tipo J (THERMOMETRICS, 2013) instalado no tanque misturador com uma faixa de medição de -40°C a 750°C é utilizado para medição da temperatura do fluido no momento do teste, devido à viscosidade do fluido utilizado nos testes realizados para o desenvolvimento do presente trabalho.

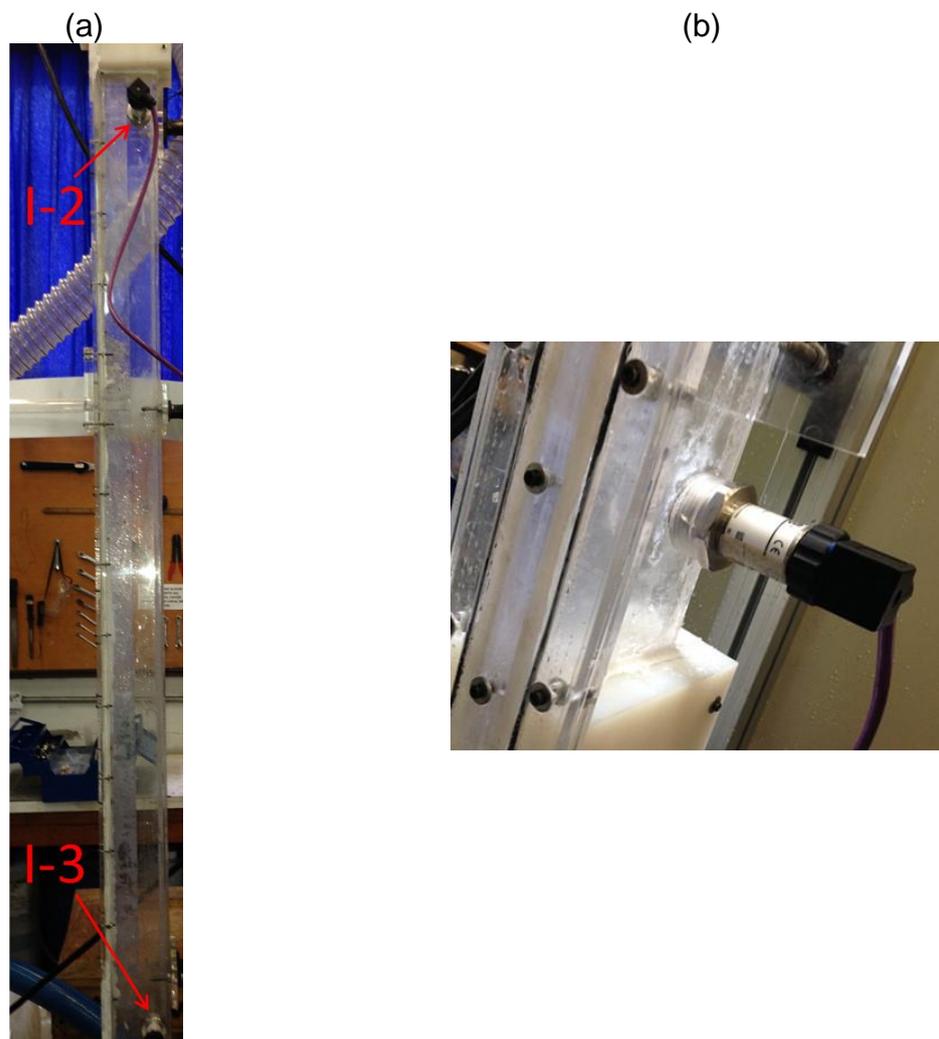


Figura 4.14 - Transdutores de pressão manométrica: (a) instalados na seção de testes e (b) detalhe de montagem.

4.4 Calibração dos instrumentos

Antes mesmo da realização de qualquer teste, os instrumentos de medição foram calibrados e caracterizados. A Seção 4.4.1 apresenta os resultados de calibração e caracterização dos instrumentos de medição presentes na unidade experimental.

4.4.1 Caracterização dos instrumentos

A caracterização dos instrumentos de medição utilizados na unidade experimental se faz necessária para aferir a precisão dos instrumentos e a validade dos dados obtidos.

Esta seção apresenta os resultados de caracterização dos medidores de vazão e de temperatura.

4.4.1.1 Caracterização do medidor de vazão mássica

O primeiro instrumento a ser caracterizado é o medidor de vazão mássica tipo coriolis. Este medidor possui um sistema eletrônico de calibração de acordo com um procedimento apresentado pelo fornecedor. Esse procedimento consiste em preencher o medidor com o fluido a ser escoado, porém sem fluxo, e assim o medidor calcula as propriedades do fluido necessárias para aferir uma medição com eficácia.

Com o medidor calibrado, inicia-se a caracterização do instrumento de medição com o objetivo de converter o sinal elétrico enviado do instrumento para o computador em vazão mássica equivalente. O processo de caracterização do medidor de vazão consiste em manter a bomba proporcionando uma vazão constante durante o período de 60 segundos, verificar a vazão mássica indicada na tela no equipamento e a corrente elétrica indicada no monitor do computador. Relaciona-se então a vazão indicada pelo medidor de vazão com a média dos valores de corrente elétrica indicados no computador a uma taxa de 200 dados gravados a cada segundo. A Tabela 4.2 apresenta os valores obtidos para o ensaio de variação de vazão com a respectiva corrente elétrica média.

Tabela 4.2 - Resultados obtidos para ensaios de variação de vazão mássica.

<u>Vazão mássica (kg/min)</u>	<u>Corrente elétrica (mA)</u>
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

Com os dados obtidos no ensaio, elabora-se um gráfico de dispersão relacionando a corrente elétrica medida com a vazão mássica correspondente, conforme Figura 4.15. Com os pontos plotados, levanta-se uma curva de ajuste de tendência linear entre a vazão mássica e a corrente elétrica. Utilizou-se do método estatístico de regressão linear para levantamento dessa curva (REIS, 1994).

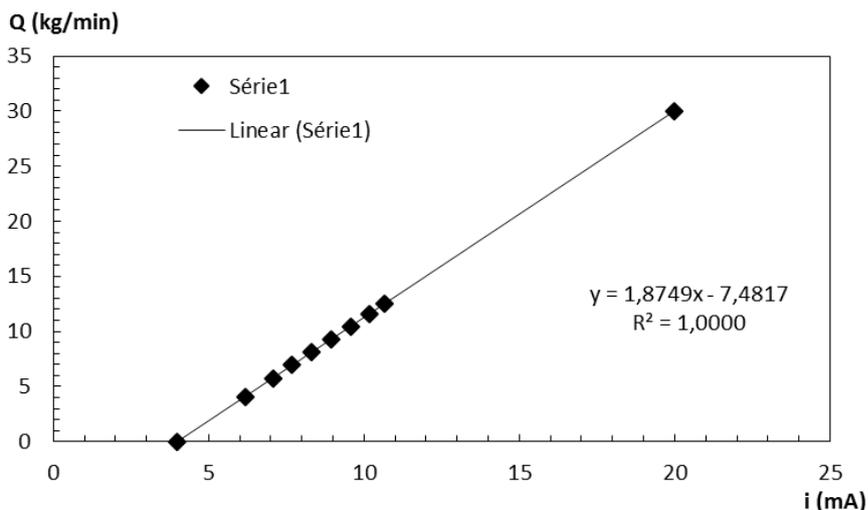


Figura 4.15 - Curva de caracterização estática para o medidor de vazão mássica.

A curva de ajuste de regressão linear resulta na Eq.(4.1), que representa a função que relaciona a corrente elétrica (x) medida em mA com a vazão mássica (y) em kg/min. O coeficiente de regressão linear R^2 é igual a 1.

$$y = 1,8749x - 7,4817 \quad (4.1)$$

O coeficiente de regressão linear R^2 é um parâmetro que varia de 0 a 1 e indica o grau de ajuste do modelo à amostra coletada (DRAPER e SMITH, 1998).

4.4.1.2 Caracterização dos transdutores de pressão manométrica

A metodologia apresentada por Stahlke e Fritoli (2014) para a caracterização dos transdutores de pressão manométrica foi seguida para obtenção das relações entre corrente elétrica e pressão para a leitura dos dados medidos.

Primeiramente, gradua-se a coluna vertical, que constitui todo o canal em acrílico. Adiciona-se uma coluna d'água no interior do canal para cálculo da pressão medida pelo transdutor. Com o auxílio da interface do programa desenvolvido no LabView, obtém-se os valores de corrente elétrica correspondentes a cada coluna d'água mensurada.

Relaciona-se a altura de coluna d'água medida a partir da graduação efetuada no canal vertical da seção de testes com a pressão correspondente a partir da Eq. (4.2), na qual ρ representa a massa específica da água, g a aceleração da gravidade e h a altura de coluna d'água medida.

$$P = \rho gh \quad (4.2)$$

Para cada coluna d'água, foram registrados e catalogados os dados 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 referente. A Tabela 4.3 apresenta os valores medidos de acordo com a variação de coluna d'água para caracterização do transdutor de pressão manométrica I-3.

Tabela 4.3 - Resultados obtidos para ensaios de variação de coluna d'água para o transdutor 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

Com os resultados obtidos no ensaio, plota-se um gráfico de dispersão relacionando a corrente elétrica medida com a pressão devido a coluna d'água correspondente, conforme Figura 4.16. Com os pontos plotados, levanta-se uma curva de ajuste de tendência linear entre a pressão e a corrente elétrica.

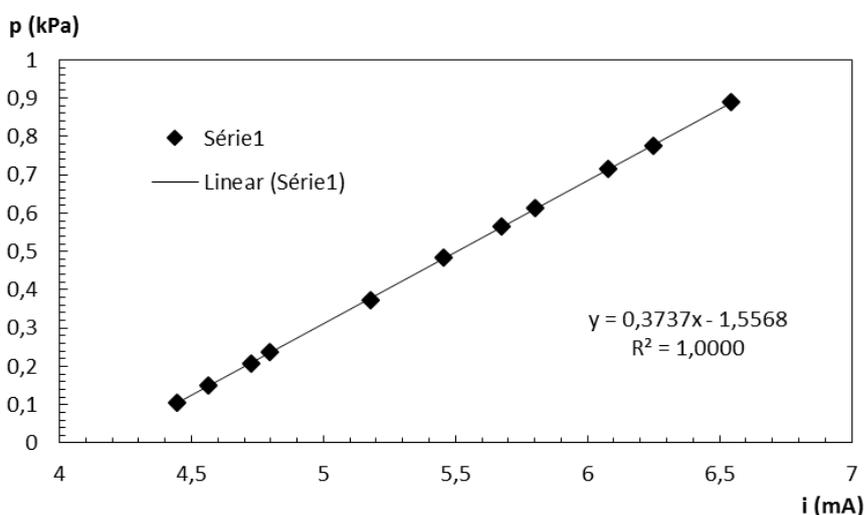


Figura 4.16 - Curva de caracterização estática para o transdutor de pressão manométrica I-3.

A curva de ajuste de regressão linear resulta na Eq. (4.3), 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.

$$y = 0,3737x - 1,5568 \quad (4.3)$$

O mesmo procedimento efetuado para a caracterização do transdutor de pressão manométrica I-3 é utilizado para caracterizar o transdutor de pressão manométrica I-2. A Tabela 4.4 apresenta os valores medidos de acordo com a

variação de coluna d'água para caracterização do transdutor de pressão manométrica I-2.

Tabela 4.4 - Resultados obtidos para ensaios de variação de coluna d'água para o transdutor de pressão manométrica I-2.

Coluna d'água (mm)	Pressão (kPa)	Corrente elétrica (mA)
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 Figura 4.17 apresenta os dados de pressão e corrente elétrica referentes à Tabela 4.4 plotados e com a respectiva curva de regressão linear.

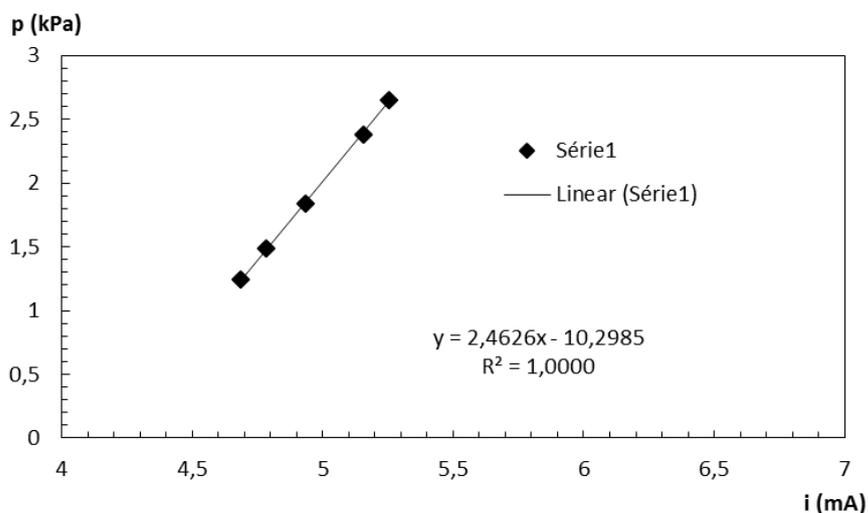


Figura 4.17 - Curva de caracterização estática para o transdutor de pressão manométrica I-2.

A curva de ajuste de regressão linear resulta na Eq.(4.4), 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, corroborando que a relação entre a corrente elétrica e a pressão é linear.

$$y = 2,4626x - 10,2985 \quad (4.4)$$

4.5 Sistema de aquisição de dados

Um sistema de aquisição de dados é utilizado para obter a medição das grandezas. A Tabela 4.5 apresenta a descrição dos itens utilizados no sistema de aquisição do aparato.

Tabela 4.5 - Características dos módulos utilizados no sistema de aquisição de dados.

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 monitorados pelo programa LabVIEW (LABVIEW, 2013) e os dados são analisados utilizando o software 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, tendo destaque o ajuste de frequência de gravação. A Figura 4.18 representa a interface de leitura de dados e controle e a Figura 4.19 o diagrama de blocos programado no LabVIEW.

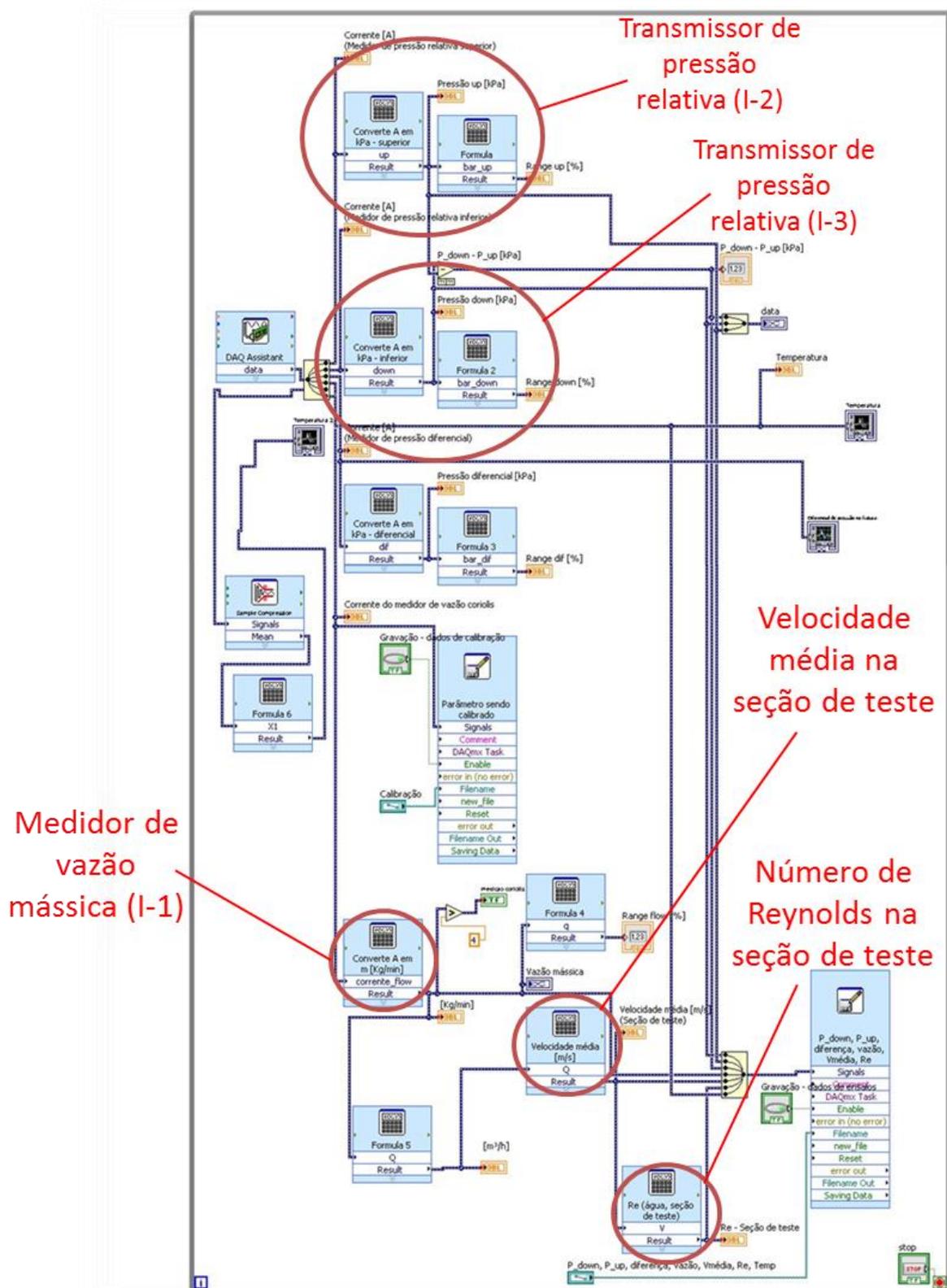


Figura 4.19 - Diagrama de blocos programado no LabVIEW.

4.6 Material particulado

Agora, analisa-se a adição de material particulado ao fluido de teste, que é composto por uma mistura de água e glicerina. Inicialmente é necessário selecionar e especificar o tipo de aditivo particulado a ser utilizado. Por fim, é investigada a influência da concentração de partículas no escoamento em relação ao gradiente de pressão gerado no canal da seção de testes.

Os aditivos particulados são responsáveis pela vedação da fratura. A indústria petrolífera utiliza aditivos chamados de LCM para esse propósito. Estes aditivos são das mais variadas composições com as mais variadas características. As necessidades do escoamento a ser estudado neste projeto acabaram por limitar o tipo de aditivos (partículas) possíveis de serem utilizados no experimento, as quais devem possuir as seguintes características:

- Não devem turvar o fluido de teste;
- Apresentar uniformidade geométrica e granulométrica;
- Não necessitem de aditivos adicionais;
- Apresentar compatibilidade com os fluidos utilizados;
- Não apresentarem quebra ou alteração de formato.

Estas características estão relacionadas com a filmagem e com o efeito do formato das partículas. Os aditivos devem ser compatíveis com os fluidos a serem utilizados de modo a não ocorrer problemas de molhamento, reações químicas, entre outros.

Os aditivos adicionais mencionados podem ser bactericidas, surfactantes, agentes de controle de filtração, entre outros. Quanto maior o número de aditivos adicionais necessário, mais complexo será o experimento, pois mais cuidados deverão ser despendidos com a estocagem, mistura e tratamento desses aditivos.

Os aditivos expansíveis não são de interesse desse projeto, sendo preferível a utilização de partículas uniformes e com tamanho constante.

Dentre os vários tipos e modelos de partículas, foram selecionados inicialmente dois tipos com diferentes propriedades, um abrasivo plástico (Urea) e uma esfera de vidro. As características dos modelos selecionados são apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Características das partículas adquiridas para os testes

Dados	Abrasivo Plástico	Esferas de vidro
Material	Urea	Vidro
Diâmetro	0,8 < diâm. < 1,2 mm	0,18 < diâm. < 0,3 mm
Massa específica a 25°C	1,5-1,6 g/cm ³	2,5 g/cm ³
Coloração	Branca mesclada.	Branca

A Figura 4.20 mostra as imagens das partículas utilizadas. O particulado representado na Figura 4.20(a) são as microesferas de vidro, enquanto o particulado representado na Figura 4.20(b) é o abrasivo plástico.

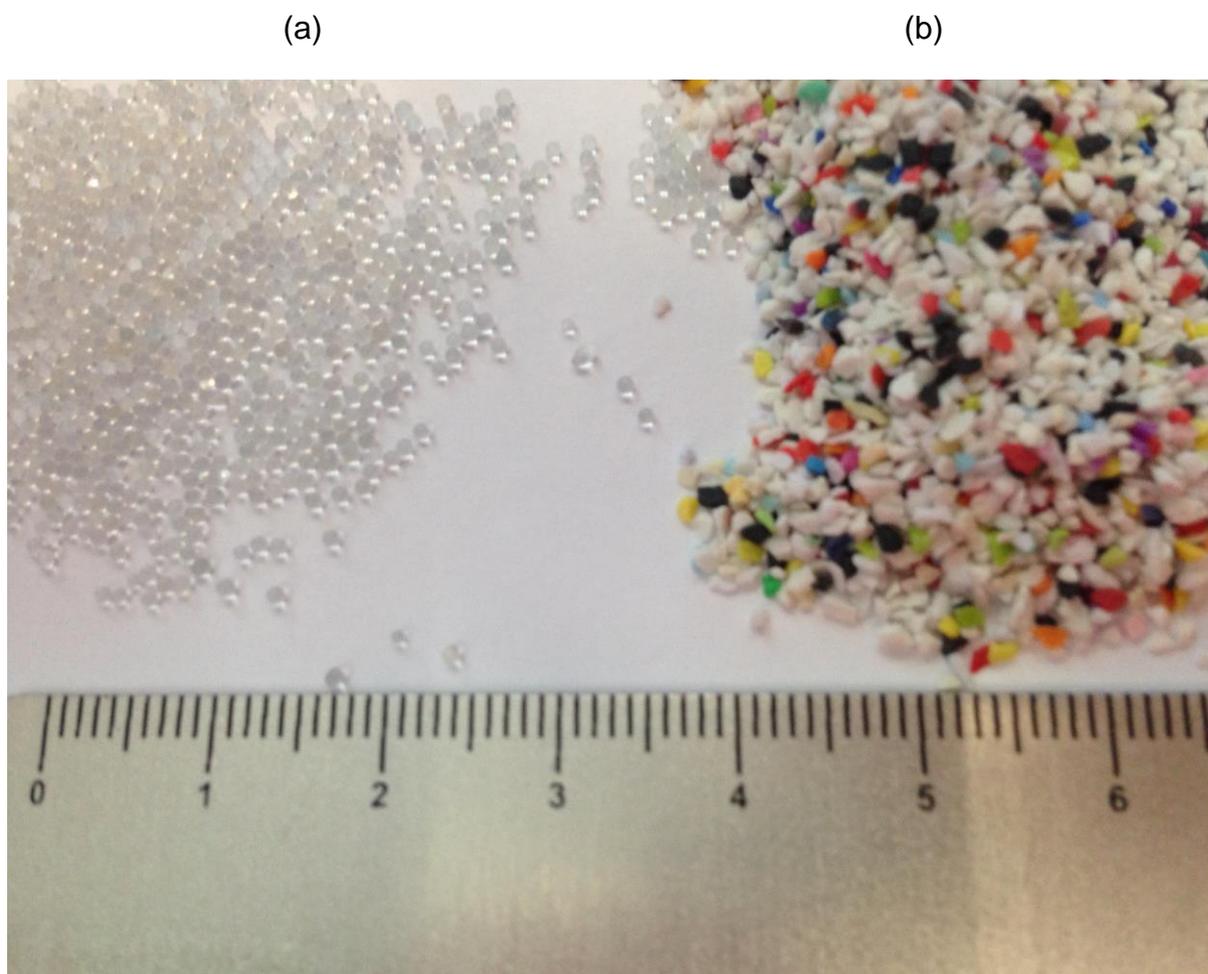


Figura 4.20 - Partículas utilizadas para os testes de escoamento líquido-sólido: (a) partícula de vidro e (b) partícula de Urea.

Foram utilizadas duas partículas com massa específica e forma distintas com o objetivo de avaliar o comportamento de cada um dos materiais durante o escoamento particulado e a formação do leito de partículas.

Além das partículas apresentarem massa específica diferente entre elas, conforme apresentado na Tabela 4.6, outro fator importante a ser salientado é a geometria das partículas. Enquanto as partículas de Urea apresentam um formato granular, as partículas de vidro são esféricas. Esse fator pode influenciar diretamente no escoamento e na formação do leito de partículas no interior da fratura.

4.7 Ensaios reométricos

Para realização dos testes de escoamento particulado e de formação de leito de partículas serão empregadas diferentes misturas água-glicerina, na qual a diferença entre cada fluido será a concentração mássica de glicerina em solução com a água. Serão utilizadas soluções água-glicerina uma vez que a glicerina apresenta viscosidade dinâmica superior a da água pura, garantindo escoamento em regime laminar mesmo para elevadas vazões. Para determinar a composição da solução água-glicerina são realizados ensaios reométricos no fluido para determinação das propriedades da mistura.

Para realizar os ensaios reométricos foi utilizado um viscosímetro modelo LV DV-II Pro (BROOKFIELD, 2010) conforme Figura 4.21. Acoplado ao eixo do viscosímetro foi utilizado o adaptador UL, como mostrado na Figura 4.22. O adaptador UL é um adaptador mais indicado para medições de fluidos de baixa viscosidade, por isso foi escolhido para a realização dos testes com a mistura água-glicerina. O volume de fluido indicado pelo fabricante para a realização dos ensaios é de 16 ml. Além disso, se faz necessária a utilização de um banho termostático para manter a temperatura do fluido constante durante a realização dos testes. O banho termostático RTE-111 (NESLAB, 2000) como mostrado na Figura 4.23.



Figura 4.21 - Viscosímetro Brookfield LVDV-II+ Pro.
(Fonte: Adaptado de BROOKFIELD, 2010)



Figura 4.22 - Adaptador UL.
(Fonte: Adaptado de BYK, 2015)

O acionamento do viscosímetro e a leitura dos dados são feitos através do software Rheocalc. Para dar início aos ensaios, o viscosímetro é zerado acionando o campo indicado como “1” na Figura 4.24. O número de rotações realizado pelo eixo do viscosímetro é controlado através do campo “4”. O campo “2” e o campo “3” indicam a viscosidade medida e o torque aplicado. Quando o torque estiver o mais próximo possível de 100%, então a viscosidade dinâmica é medida.



Figura 4.23 - Banho termostático RTE-111.

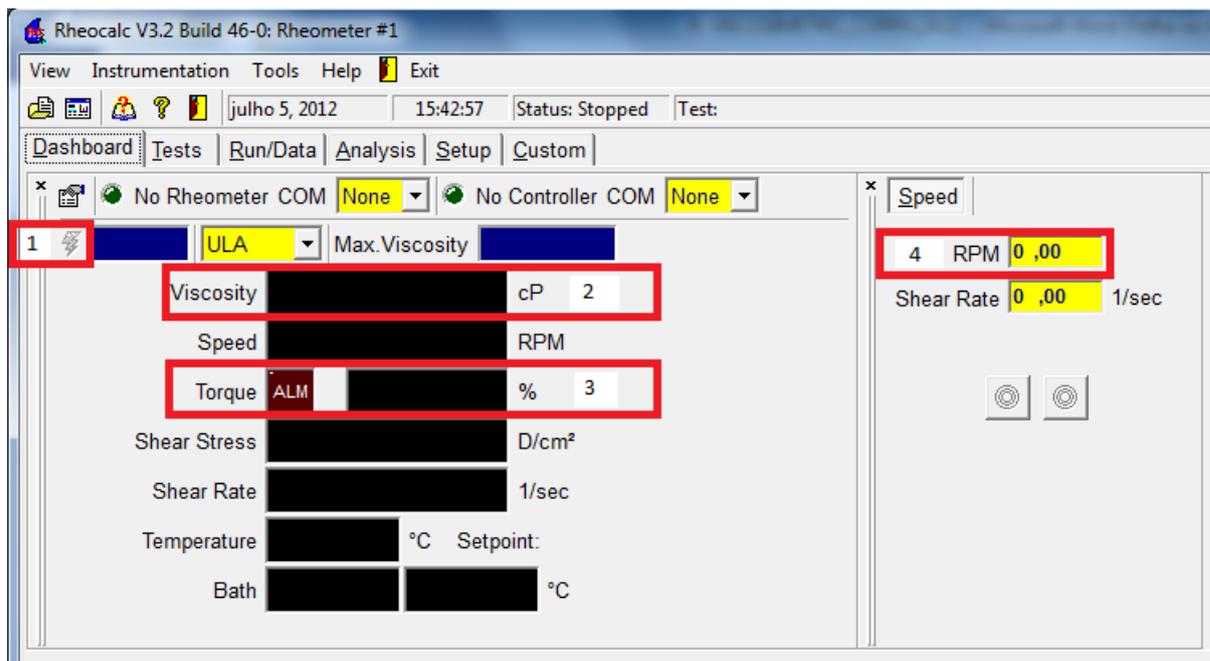


Figura 4.24 - Interface de controle do viscosímetro.

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).

A metodologia adotada para a realização dos testes é a metodologia proposta por Cruz (2012). Todos os testes foram realizados com base nos seguintes procedimentos:

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 5.2.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos para a caracterização dos instrumentos de medição utilizados, para 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 mantidos constantes os parâmetros de geometria do canal e da fratura e a mistura água-glicerina. Serão variados, então, a concentração de partículas no fluido, a vazão inicial de fuga de fluido, o material particulado utilizado e o número de Reynolds do escoamento através do canal.

5.1 Testes preliminares do escoamento no canal sem fratura

Foram realizados testes preliminares de escoamento no canal, sem a presença da fratura com o intuito de observar o efeito da concentração de glicerina em água e o efeito da concentração de partículas sobre as pressões no canal.

Considerando o escoamento no canal com fluidos compostos por uma mistura de água com diferentes concentrações mássicas de glicerina, faz-se necessário a determinação das concentrações através de testes reométricos, conforme procedimento descrito na Seção 4.7, assim como o valor da viscosidade dinâmica. O valor da viscosidade depende da temperatura da mistura, sendo necessário uma verificação experimental para cada concentração de glicerina em água.

A Figura 5.1 mostra a viscosidade dinâmica em relação à concentração mássica de glicerina em água, comparando os valores medidos experimentalmente a 25°C com os obtidos na literatura. Os valores de viscosidade dinâmica de cada concentração de glicerina em água foram determinados em viscosímetro, com a amostra do fluido mantida em banho termostático de 25°C, conforme metodologia apresentada na Seção 4.7.

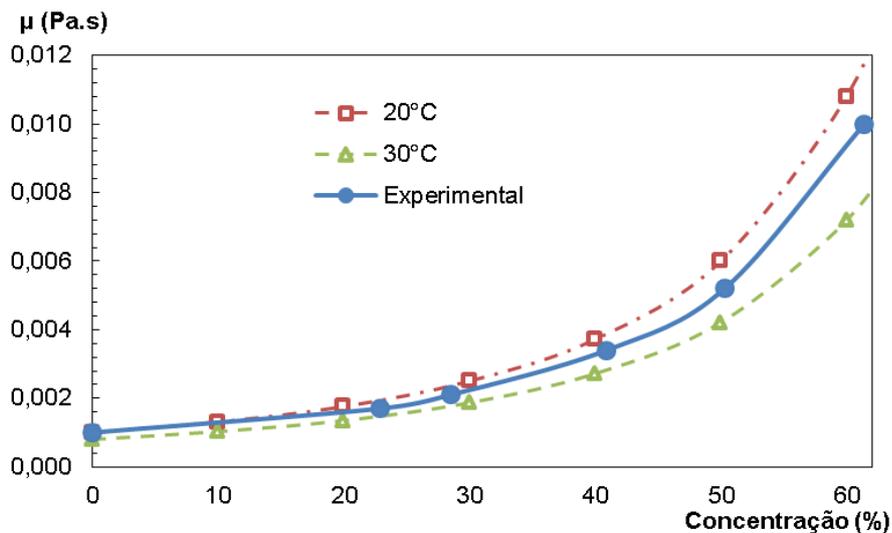


Figura 5.1 - Representação gráfica da viscosidade dinâmica em relação à concentração mássica de glicerina em água

Comparando as curvas das viscosidades dinâmicas medidas com as apresentadas pela literatura, é possível observar o aumento da viscosidade dinâmica conforme se aumenta a concentração mássica de glicerina em água.

É importante ressaltar que com altas concentrações de glicerina em água, o fluido apresenta uma maior sensibilidade em sua viscosidade dinâmica de acordo com variações de temperatura. Devido a isso, é fundamental monitorar a temperatura do fluido durante os testes.

A Figura 5.2 apresenta a relação de massa específica em relação à concentração mássica de glicerina em água. É possível observar que essa propriedade varia linearmente.

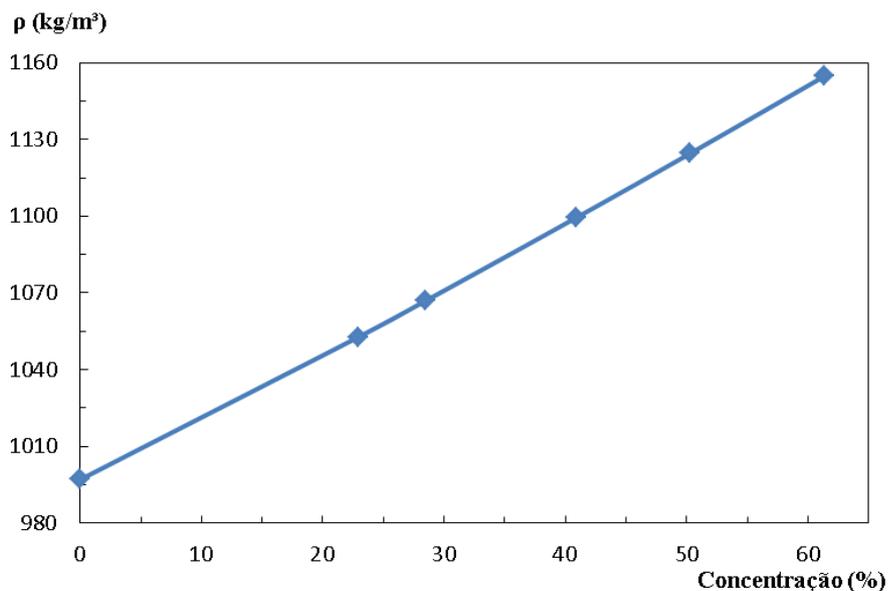


Figura 5.2 - Representação gráfica da massa específica em relação à concentração mássica de glicerina em água

Na Figura 5.3 é possível observar a faixa de variação do número de Reynolds para diferentes concentrações de água-glicerina em função da vazão mássica do sistema. Observa-se que para altas concentrações de glicerina a faixa de escoamento laminar aumenta em relação à faixa de vazão do sistema.

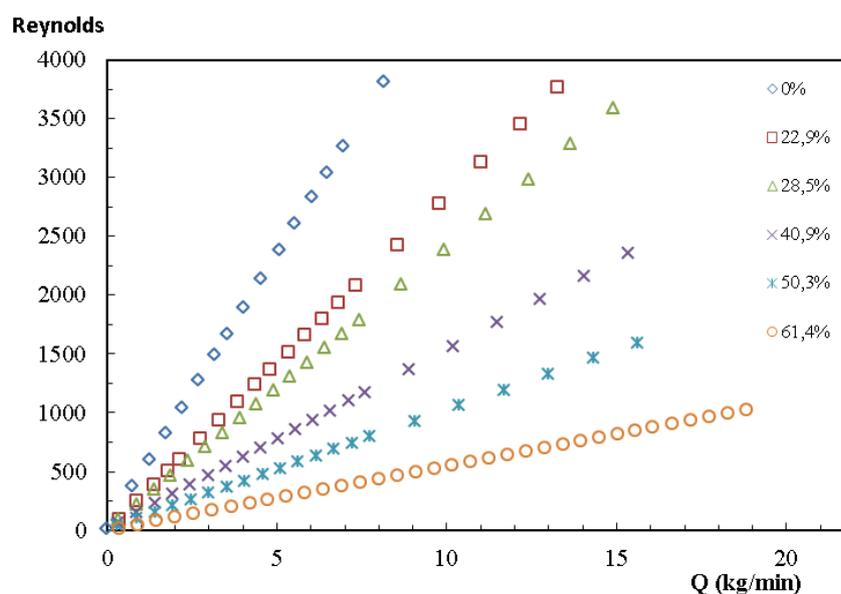


Figura 5.3 - Número de Reynolds em função da vazão mássica para as diferentes concentrações de água-glicerina

A partir do valor determinado para a viscosidade e da temperatura utilizada nos testes reométricos, 25°C, conforme metodologia apresentada na Seção 4.7, utilizou-se as tabelas de propriedades de fluidos (Dorsey, 1940) para determinar a concentração de água e glicerina presente na solução, assim como a massa específica da mistura. Dessa forma, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Valores de concentração de glicerina em água e massa específica da solução interpolados linearmente pela viscosidade dinâmica medida

Viscosidade dinâmica [cP]	Concentração de glicerina na 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 Figura 5.4 mostra a comparação dos resultados do gradiente de pressão no canal da seção de testes para diferentes concentrações de glicerina avaliadas.

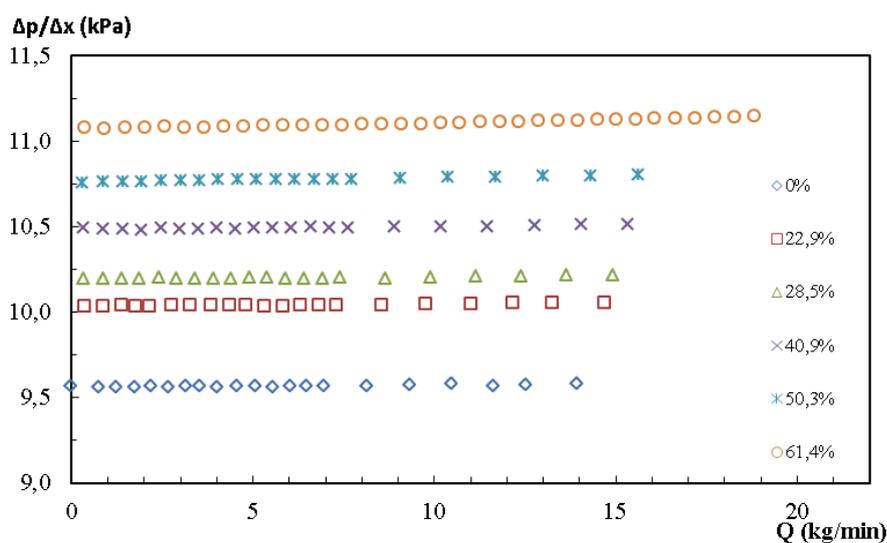


Figura 5.4 - Representação gráfica dos valores de gradiente de pressão no canal da seção de testes para as concentrações avaliadas

O gradiente de pressão é definido como a razão entre a diferença de pressão medida nos dois transdutores e a distância entre os transdutores.

Observa-se que a influência do aumento da concentração, e por consequência da viscosidade dinâmica e da massa específica, aumenta as pressões do sistema.

A Figura 5.5 apresenta a variação do gradiente de pressão em função da concentração de glicerina em água para diferentes vazões de operação (3, 6 e 12 kg/min).

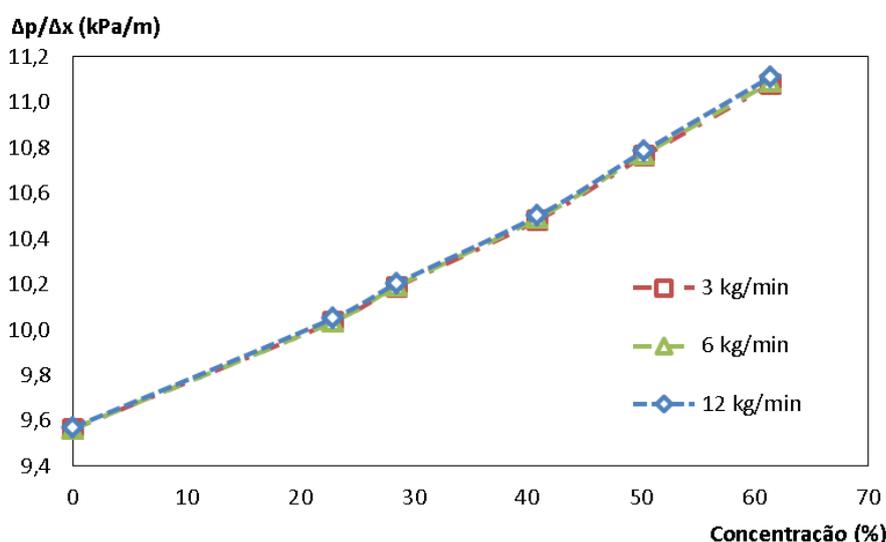


Figura 5.5 - Representação gráfica do gradiente de pressão em função da concentração de glicerina em água para vazões mássicas de 3, 6 e 12 kg/min

O aumento da pressão com o valor de concentração de glicerina se apresenta de forma linear para uma determinada vazão, isto indica que o valor de viscosidade da mistura é constante, verificando que para a mistura água-glicerina o comportamento do fluido é newtoniano.

Após realizados os testes variando a concentração de glicerina, foi adicionado material particulado ao escoamento para avaliar a influência que as partículas possuem sobre o escoamento.

A primeira sequência de testes consiste em adicionar 1% de partículas em relação a massa total do fluido (água- glicerina). A Figura 5.6 mostra a influência no

gradiente de pressão ao longo da seção de testes em comparação com uma mistura (61,4% de glicerina) sem a presença de material particulado.

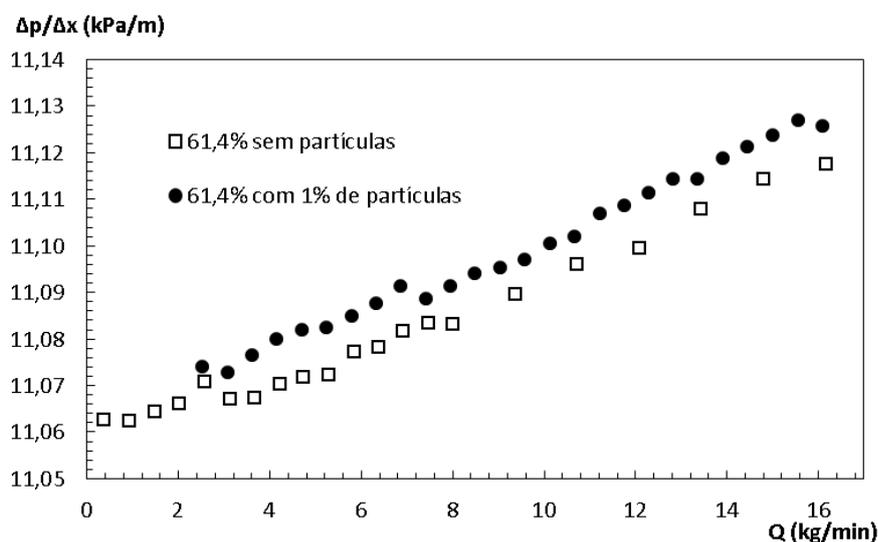


Figura 5.6 - Influência da concentração de partículas sobre o gradiente de pressão para concentração de 61,4% de glicerina

Nota-se influência da presença das partículas no fluido, elevando o gradiente de pressão do escoamento no canal.

A segunda sequência de testes consiste em comparar duas concentrações de gliceras diferentes para uma mesma concentração de partículas no escoamento.

Na Figura 5.7 é possível observar a comparação do gradiente de pressão para duas concentrações de glicerina (61,4 e 73,1%), considerando uma mistura com 1% de partículas.

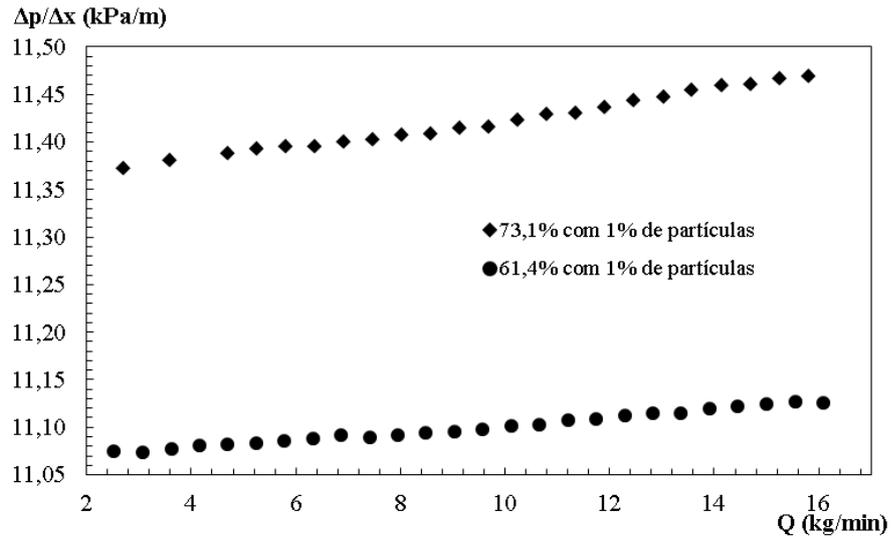


Figura 5.7 - Influência da concentração de glicerina sobre o gradiente de pressão para concentração de 1% de partículas

Após a realização dos testes com 1% de partículas em uma solução de 61,4% de concentração mássica de glicerina em água, adicionou-se mais glicerina à solução para se obter uma concentração mássica de 73,1% de glicerina em água para realização de testes com 1% e 2% de partículas.

Porém, ao tentar retornar à concentração 61,4% de glicerina em água para realização de testes com 2% de partículas, a dificuldade na manipulação dessas substâncias fez com que a concentração de glicerina em água obtida fosse de 59,3%.

Na Figura 5.8 a comparação foi feita para uma mistura com 2% de concentração de partículas no escoamento. Observa-se que a comparação foi feita para as concentrações de 59,3 e 73,1% de glicerina em água devido a ordem de adição de partículas e diluição de glicerina na mistura.

A Figura 5.9 mostra a comparação de duas concentrações de partículas (1 e 2%) para uma mistura de 73,1 % de glicerina em água. Observa-se um aumento do gradiente de pressão ao longo da seção de testes com o aumento de concentração de partículas ao escoamento.

Para a concentração mássica de 73,1% de glicerina em água, não foram realizados testes sem a presença de partículas no escoamento.

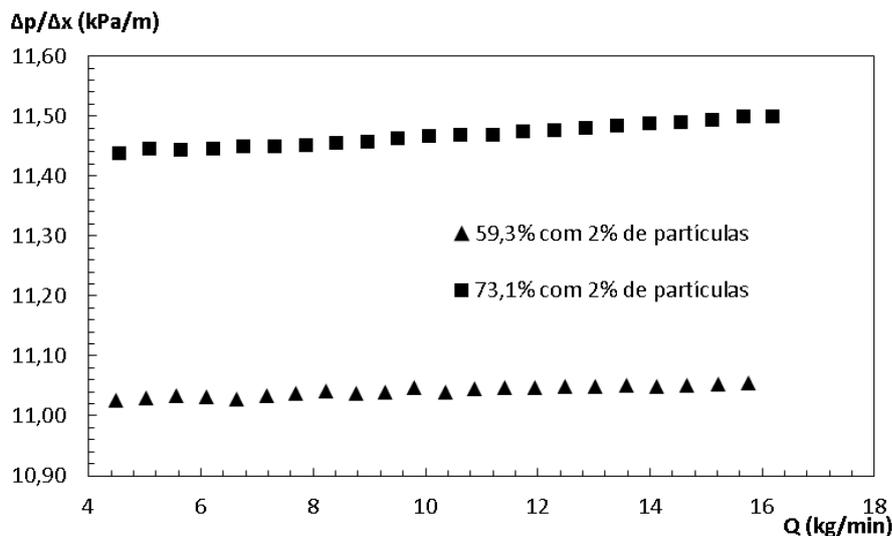


Figura 5.8 - Influência da concentração de glicerina sobre o gradiente de pressão para concentração de 2% de partículas.

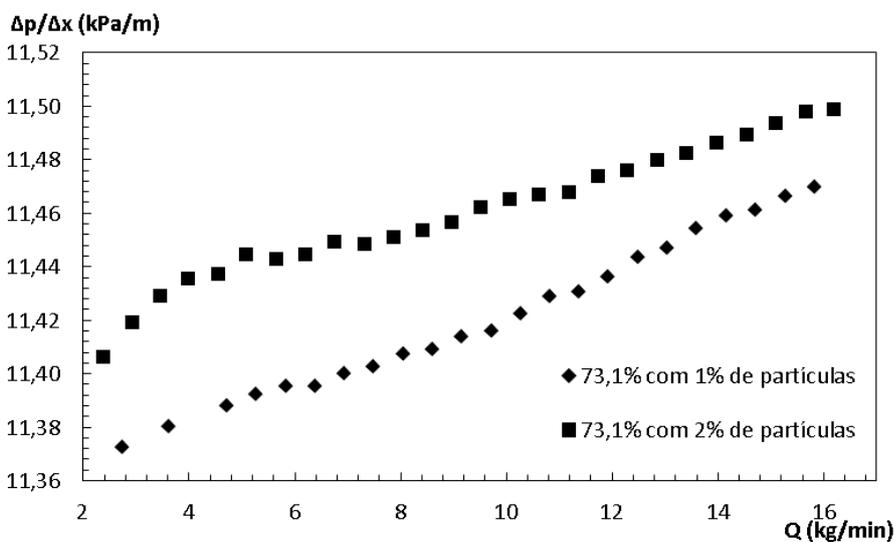


Figura 5.9 - Influência da concentração de partículas sobre o gradiente de pressão para concentração de 73,1% de glicerina

Na Figura 5.10 é possível observar a comparação dos casos com 61,4% de glicerina sem partículas e com 1% de partículas em conjunto com uma solução de 59,3% com 2% de partículas. Fica evidente que, mesmo contendo 2% de partículas a concentração de glicerina em água afetou de forma mais significativa o gradiente de pressão da seção de testes.

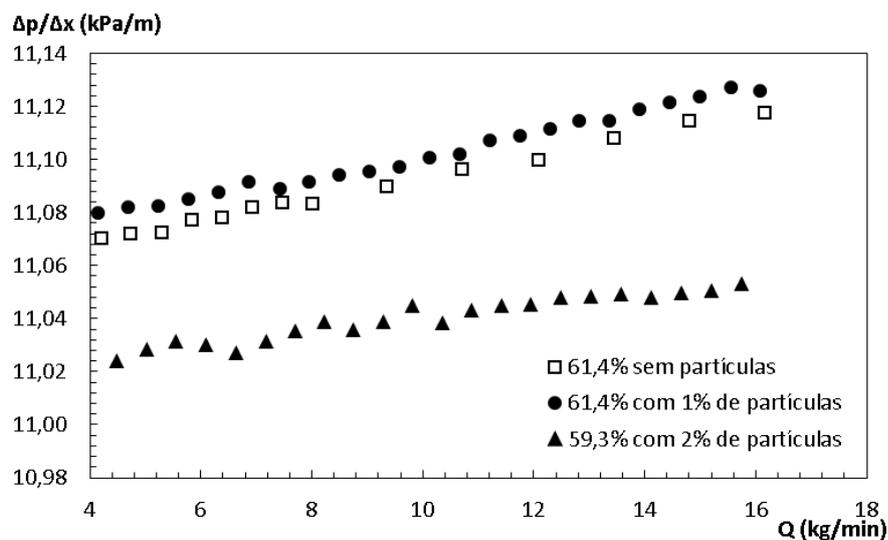


Figura 5.10 - Comparação da influência da concentração de partículas e glicerina na solução sobre o gradiente de pressão

Em seguida, foi avaliado o efeito da temperatura do fluido ao longo dos testes. A Figura 5.11 apresenta o monitoramento da temperatura durante 30 minutos de testes mantendo a vazão da bomba em 13 kg/min. O fluido é composto por glicerina em uma concentração mássica de 59,3% em água e 2% de concentração mássica de partículas. Foi constatado que esse aumento da temperatura dentro desses 30 minutos de teste ocorreu devido ao misturador do tanque, no qual seu motor elétrico aquece com o tempo de funcionamento. A bomba, por outro lado, não foi constatada a transferência de calor para o fluido de forma significativa.

Deve-se ter atenção especial com a temperatura durante a realização dos testes, uma vez que as propriedades do fluido variam significativamente para determinadas concentrações de glicerina em água. Particularmente a viscosidade dinâmica é uma propriedade tenuamente sensível à mudança de temperatura, conforme pode ser observado na Figura 5.12.

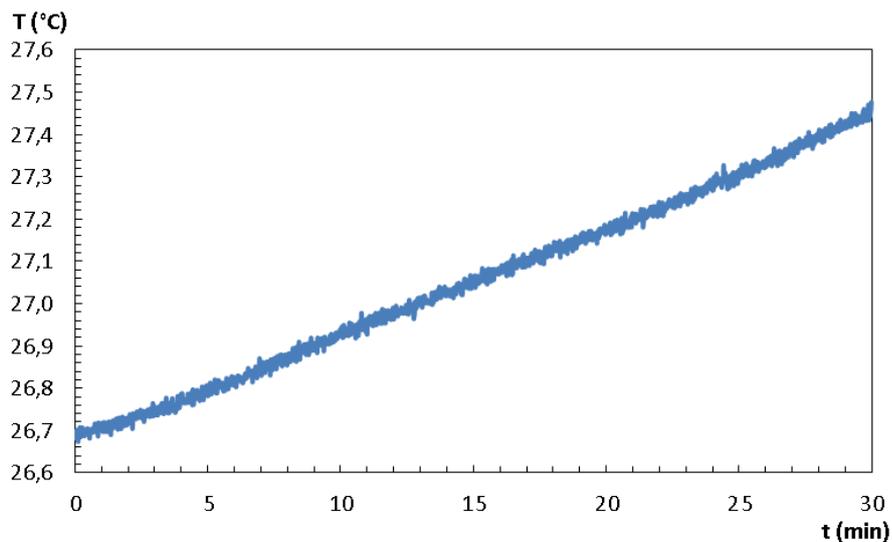


Figura 5.11 - Representação gráfica da variação da temperatura em relação ao tempo de teste

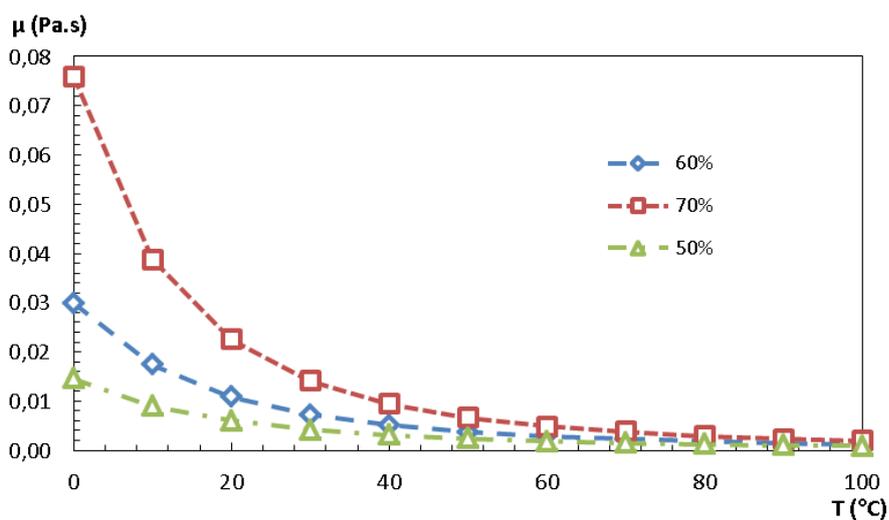


Figura 5.12 - Variação da viscosidade dinâmica em função da temperatura do fluido

Vale ressaltar que o gradiente térmico ao longo do dia pode variar significativamente a viscosidade do fluido em dois períodos de testes, impossibilitando a repetibilidade dos resultados para um mesmo fluido. A Figura 5.13 mostra em detalhe a faixa de variação de temperatura ambiente que o aparato experimental pode estar exposto.

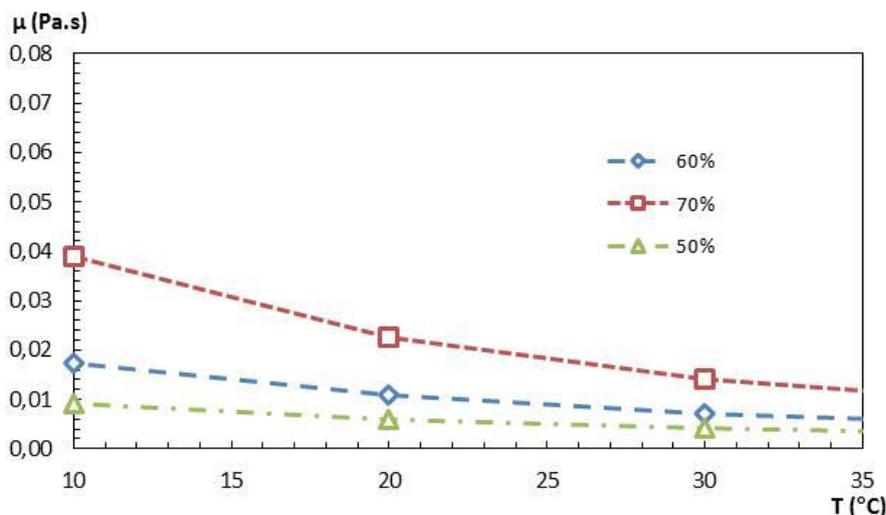


Figura 5.13 - Detalhe da variação da viscosidade dinâmica em relação à faixa de temperatura de operação do fluido

5.2 Ensaio em viscosímetro

Conforme exposto anteriormente, é apresentado em detalhe neste capítulo os resultados para os testes reométricos obtidos em viscosímetro.

Para determinar a concentração de glicerina em água da solução utilizada para os testes de formação de leito de partículas, um ensaio em viscosímetro foi efetuado para tal propósito.

O experimento com a solução água-glicerina foi efetuado de acordo com os procedimentos descritos na Seção 4.7. 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.

A Tabela 5.2 apresenta os resultados obtidos através dos ensaios reométricos.

Tabela 5.2 - 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	17,64	34,00	100,0	0,734	41,58	25,0
2	17,65	33,95	99,9	0,733	41,52	25,0
3	17,66	33,90	99,8	0,732	41,46	25,0

4	17,65	33,95	99,9	0,733	41,52	25,0
5	17,67	33,95	100,0	0,734	41,52	25,0
6	17,67	33,95	100,0	0,734	41,52	25,0
7	17,65	33,95	99,9	0,733	41,52	25,0
8	17,67	33,95	100,0	0,734	41,52	25,0
9	17,67	33,95	100,0	0,734	41,52	25,0
10	17,65	33,95	99,9	0,733	41,52	25,0
11	17,65	33,95	99,9	0,733	41,52	25,0
12	17,65	33,95	99,9	0,733	41,52	25,0
13	17,67	33,95	100,0	0,734	41,52	25,0
14	17,67	33,95	100,0	0,734	41,52	25,0
15	17,67	33,95	100,0	0,734	41,52	25,0

A viscosidade dinâmica média obtida nas medições 6 a 15 é de 17,662 cP, que corresponde a $17,662 \times 10^{-3}$ 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 C.2 contida no Anexo C 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 5.3 apresenta o fluido utilizado e suas propriedades.

Tabela 5.3 - Concentração de glicerina em água e propriedades.

Concentração mássica de glicerina em água (C_G)	Viscosidade dinâmica a 25°C	Massa específica a 25°C
69,5%	$17,662 \times 10^{-3}$ Pa.s	1177,025 kg/m ³

5.3 Processo de 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 descrita no Procedimento Operacional Padrão CERNN-LAMP-POP001, contido no Anexo C.

Para a realização destes testes são considerados alguns parâmetros como constantes para todos os ensaios. Os valores destes parâmetros estão resumidos na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Parâmetros do problema

Concentração mássica de glicerina em água	C_G	69,50%
Espessura da fratura	e_{FR}	20 mm
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 chega a fratura. Calcula-se o comprimento de desenvolvimento para escoamento laminar em dutos a partir da Eq. (5.1) (WHITE, 1991), na qual $C_1 = 0,5$, $C_2 = 0,05$, D_h corresponde ao diâmetro hidráulico, Re_{Dh} corresponde ao número de Reynolds do escoamento e L_e correspondendo ao comprimento de desenvolvimento.

$$\frac{L_e}{D_h} = C_1 + C_2 Re_{Dh} \quad (5.1)$$

O número de Reynolds Re_{Dh} pode ser calculado através da Eq.(5.2):

$$Re_{Dh} = \frac{\rho \bar{V} D_H}{\mu} \quad (5.2)$$

Por conveniência, o Re_{Dh} será denominado apenas como Re .

Como será observado escoamento em canal de seção transversal não circular, para cálculo do número de Reynolds deve ser usado o conceito de diâmetro hidráulico, que para o canal da seção de testes é 23,6 mm, conforme Eq.(5.3):

$$D_H = \frac{4A_s}{P_s} \quad (5.3)$$

sendo A_s a área de seção transversal e P_s o perímetro da seção transversal do duto não circular.

A Tabela 5.5 apresenta os valores de comprimento de desenvolvimento em relação ao número de Reynolds do escoamento.

Tabela 5.5 - Comprimentos de desenvolvimento referentes ao número de Reynolds do escoamento no interior do canal.

Re	L_e
150	0,189 m
300	0,366 m
450	0,543 m

De acordo com a Figura 4.6, observa-se que a distância entre a entrada do canal e a entrada da fratura é de 1,28 m. Com isso, se verifica que com todos os diferentes números de Reynolds utilizados nos testes, o escoamento atinge a altura da fratura já completamente desenvolvido.

De acordo com White (1991), o número de Reynolds no qual ocorre a transição de regime de escoamento para turbulento é em torno de $Re_{Dh} = 2000$, garantindo o regime de escoamento laminar para todos os testes executados.

Para o atual trabalho é investigada a influência dos parâmetro contidos na Tabela 5.6 sobre a formação do leito de partículas no interior da fratura. A Tabela 5.6 resume os valores adotados para cada parâmetro variado.

Tabela 5.6 - Parâmetros variados para os testes de formação do leito de partículas

Concentração de partículas	C_p	2% - 4%
Abertura da válvula de vazão inicial da fratura	Q_v	0,75 – 1,00
Material particulado	-	Grãos de Urea e esferas de vidro
Número de Reynolds	Re	150 - 450

5.3.1 Efeito da variação da concentração de partículas

Nesta etapa, é avaliada a formação do leito de acordo com a variação da concentração de partículas no fluido. Todos os testes apresentados nesta seção foram executados mantendo-se constante a abertura da válvula de vazão inicial (Q_v) da fratura (0,75), que corresponde a 75% de abertura de uma volta completa. Outro parâmetro constante é o material particulado (Urea).

Os resultados do processo de formação do leito de partículas é caracterizado 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 Figura 5.14 apresenta o processo de formação do leito de partículas ao longo do tempo para uma configuração de 2% de concentração de partículas no fluido e número de Reynolds igual a 150.

Observa-se na Figura 5.14 que o processo de preenchimento de partículas na fratura possui uma taxa de deposição que, conforme o tempo passa, 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, conforme apresentado em detalhes na Figura 5.15.

t [s]

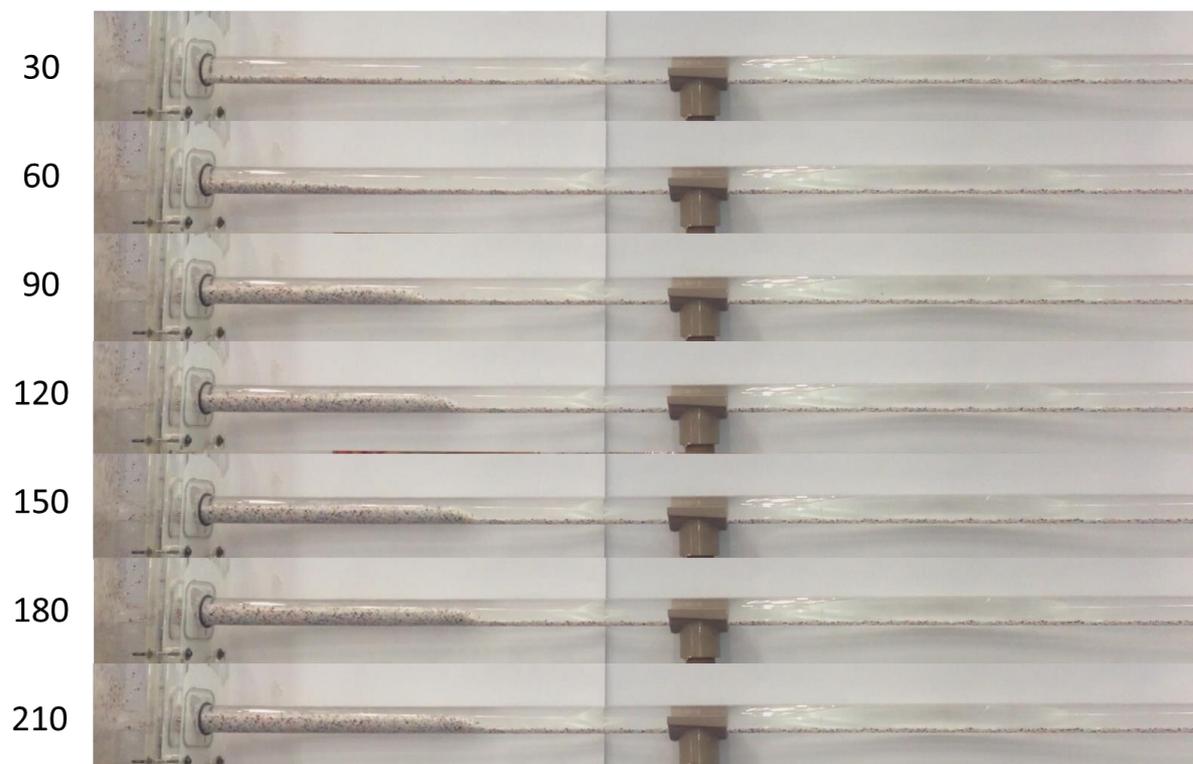


Figura 5.14 - Processo de formação do leito de partículas ao longo tempo para $C_p = 2\%$, $Re = 150$ e $Q_v = 0,75$.



Figura 5.15 – Parâmetros geométricos do leito de partículas.

Na Figura 5.16 são apresentados os instantes finais do processo de formação do leito para a variação da concentração de partículas, considerando $Re = 150$.



Figura 5.16 - Instantes finais para cada concentração de partículas utilizadas no processo de preenchimento da fratura para $Re = 150$ e $Q_V = 0,75$.

A Tabela 5.7 apresenta os parâmetros geométricos dos ensaios da Figura 5.16. Observa-se que as posições iniciais dos três testes são semelhantes, assim como o tempo final de injeção no qual o leito não é modificado. Contudo, constata-se que o comprimento e a espessura possuem significativo aumento conforme aumenta-se a concentração de partículas. Isso se deve ao peso efetivo do fluido a jusante a fratura que promove uma maior entrada de partículas na região da fratura.

Tabela 5.7 - Parâmetros geométricos do leito de partículas para $Re = 150$ e $Q_V = 0,75$.

C_P (%)	$h_{p,i}$ (mm)	h_p (mm)	e_p (%)	t_{ip} (s)
2	10	291	35	210
2,5	10	574	60	210
3	10	674	70	210

A Figura 5.17 apresenta o gradiente de pressão medido no canal ao longo do tempo dos testes da Figura 5.16 e Tabela 5.7.

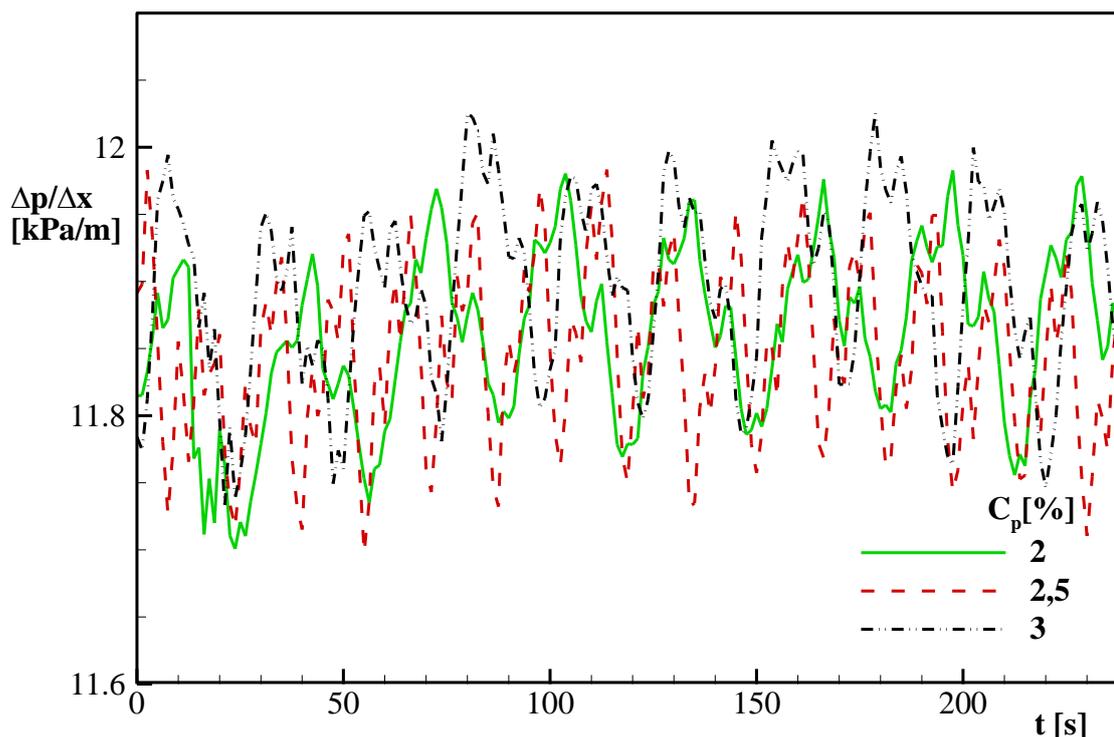


Figura 5.17 - Gradiente de pressão ao longo do tempo para $Re_{CH} = 150$ e $Q_V = 0,75$.

Na Figura 5.17 é possível observar que o gradiente de pressão possui um pequeno aumento do gradiente de pressão com o aumento da concentração de partículas, corroborando com o que foi apresentado na Seção 4.4.1.

Para cada configuração determinada, os testes são executados três vezes, com o objetivo de se verificar repetibilidade entre eles. A Figura 5.18 apresenta os três testes feitos com configuração de número de Reynolds de 150 e concentração de partículas de 3%.

Teste

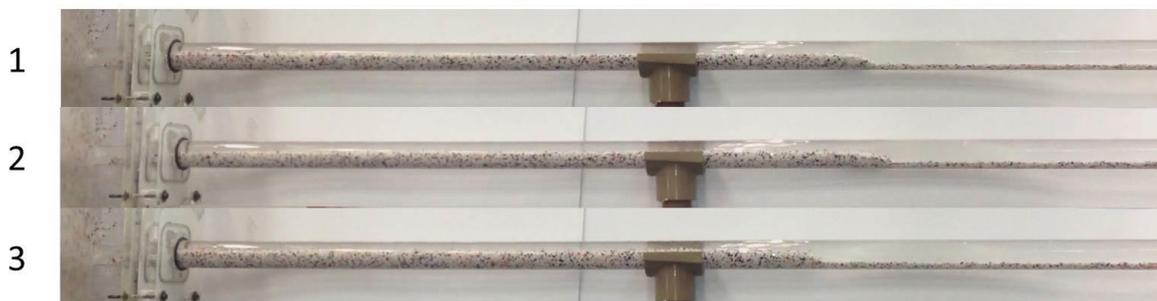


Figura 5.18 - Testes de repetibilidade apresentados para $Re = 150$, $C_P = 3\%$ e $Q_V = 0,75$.

Observa-se na Figura 5.18 a semelhança entre os três testes em relação aos parâmetros geométricos do leito.

A Figura 5.19 mostra os três testes para os valores de pressão manométrica do transdutor I-3 (entrada do canal).

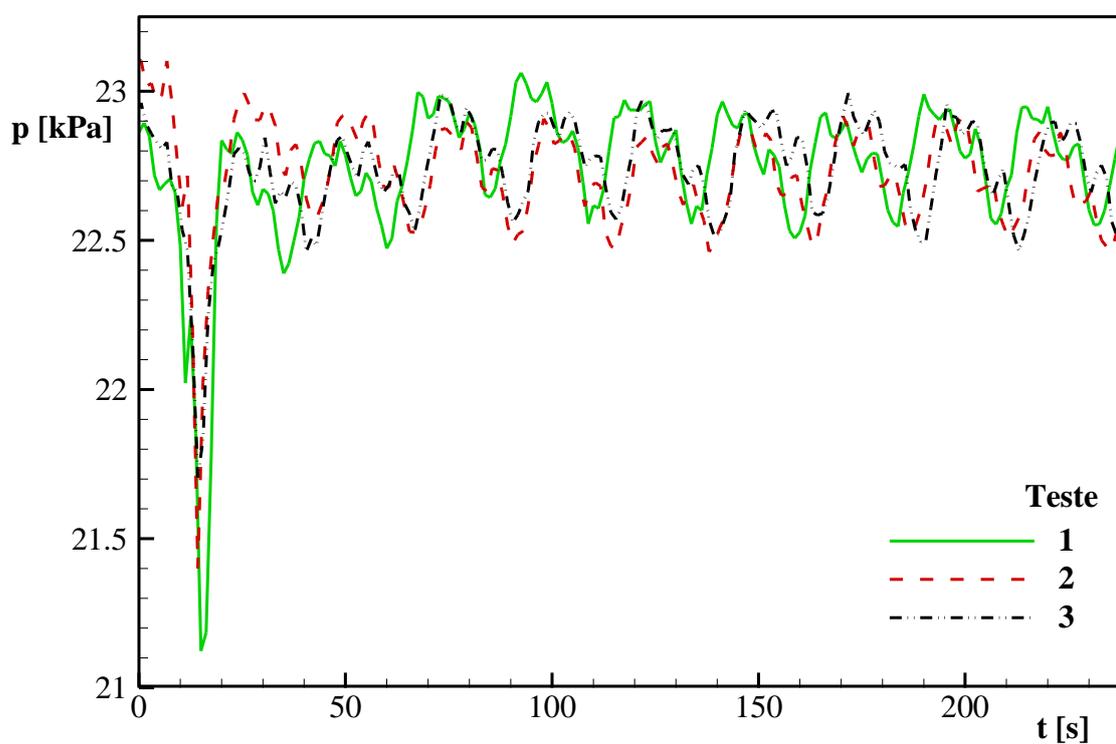


Figura 5.19 - Pressões mensuradas pelo transdutor de pressão manométrica I-3 para $Re_{CH} = 150$, $C_P = 3\%$ e $Q_V = 0,75$.

Observa-se na Figura 5.19 que a descontinuidade constatada em $t \approx 10s$, refere-se ao momento da abertura da válvula localizada no final da fratura. A intensidade desta descontinuidade varia conforme a velocidade de abertura da válvula, que é feita manualmente. Pode-se constatar ainda a semelhança da variação da pressão ao longo do tempo para os três testes de preenchimento.

Na Figura 5.20 são apresentados os resultados do instante final do leito para variação da concentração de partículas considerando um aumento do número de Reynolds para $Re = 300$.



Figura 5.20 - Instantes finais para cada concentração de partículas utilizadas no processo de preenchimento da fratura para $Re = 300$ e $Q_V = 0,75$.

A Tabela 5.8 apresenta os parâmetros geométricos dos ensaios da Figura 5.20. Observa-se que para a configuração de $Re = 300$ é possível constatar uma posição inicial de formação do leito diferente para baixas concentrações. Isto é devido a maior velocidade na região da fratura proporcionada pelo aumento do número de Reynolds considerando uma mesma abertura de válvula. Outro fator que diferenciou foi o tempo final de injeção, que diminuiu significativamente com o aumento da concentração. Com relação ao formato final da geometria do leito, principalmente para o comprimento, constatou-se uma tendência indefinida. Este fato pode ser explicado considerando os valores de temperatura para cada teste. Na Seção 5.1 foi exposta a sensibilidade das propriedades da mistura água-glicerina com relação a variação da temperatura. Para os respectivos testes, as temperaturas monitoradas

são: $C_p = 2\%$ ($T = 22,9^\circ\text{C}$), $2,5\%$ ($T = 23,4^\circ\text{C}$), $3,5\%$ ($T = 25,5^\circ\text{C}$) e 4% ($T = 26,3^\circ\text{C}$). Esta variação é devido ao dia de realização do teste.

Tabela 5.8 - Parâmetros geométricos do leito de partículas para $Re = 300$ e $Q_v = 0,75$.

C_p (%)	$h_{p,i}$ (mm)	h_p (mm)	e_p (%)	t_{ip} (s)
2	35	217	35	105
2,5	23	324	40	90
3,5	10	182	60	60
4	10	292	65	45

A Figura 5.21 mostra os resultados para o efeito da concentração de partículas, considerando $Re = 450$. Observa-se que para essa intensidade de escoamento as forças de interação fluido-partículas não são capazes de promover uma significativa entrada de partículas na região de fratura, devido a alta inércia das partículas na região do canal.

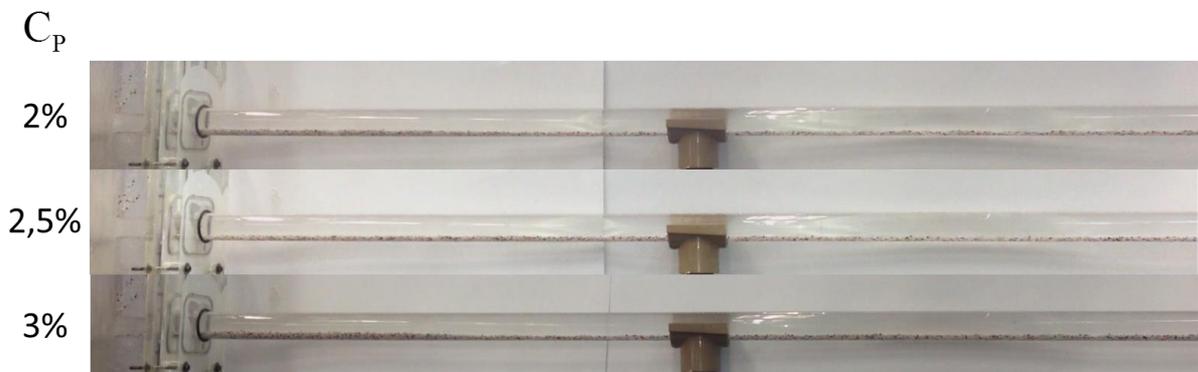


Figura 5.21 - Instantes finais para cada concentração de partículas utilizadas no processo de preenchimento da fratura para $Re = 450$ e $Q_v = 0,75$.

5.3.2 Efeito da variação do número de Reynolds

Para observar a influência do número de Reynolds sobre a formação do leito de partículas, comparou-se os leitos formados para três números de Reynolds distintos, utilizando uma mesma concentração de partículas no fluido ($2,5\%$), conforme Figura 5.22.



Figura 5.22 - Instantes finais para cada Reynolds utilizados no processo de preenchimento da fratura para $C_P = 2,5\%$ e $Q_V = 0,75$.

A Tabela 5.9 apresenta os parâmetros geométricos dos ensaios da Figura 5.22.

Tabela 5.9 - Parâmetros geométricos do leito de partículas para $C_P = 2,5\%$ e $Q_V = 0,75$.

Re_{Dh}	$h_{p,i}$ (mm)	h_p (mm)	e_p (%)	t_{ip} (s)
150	10	574	60	210
300	23	324	35	90
450	-	-	-	-

Para esta variação do número de Reynolds é possível identificar com facilidade o efeito das forças de interação fluido-partícula. Conforme o aumento do Re observa-se que existe uma menor entrada de partículas na região da fratura, devido ao aumento da inércia na região do escoamento vertical no canal. Outro fato constatado é em relação a posição inicial de formação do leito, que aumenta significativamente com o aumento de Re , devido a alta inércia que as partículas também possuem no interior da fratura.

A Figura 5.23 apresenta o gradiente de pressão ao longo do tempo de teste para diferentes números de Reynolds.

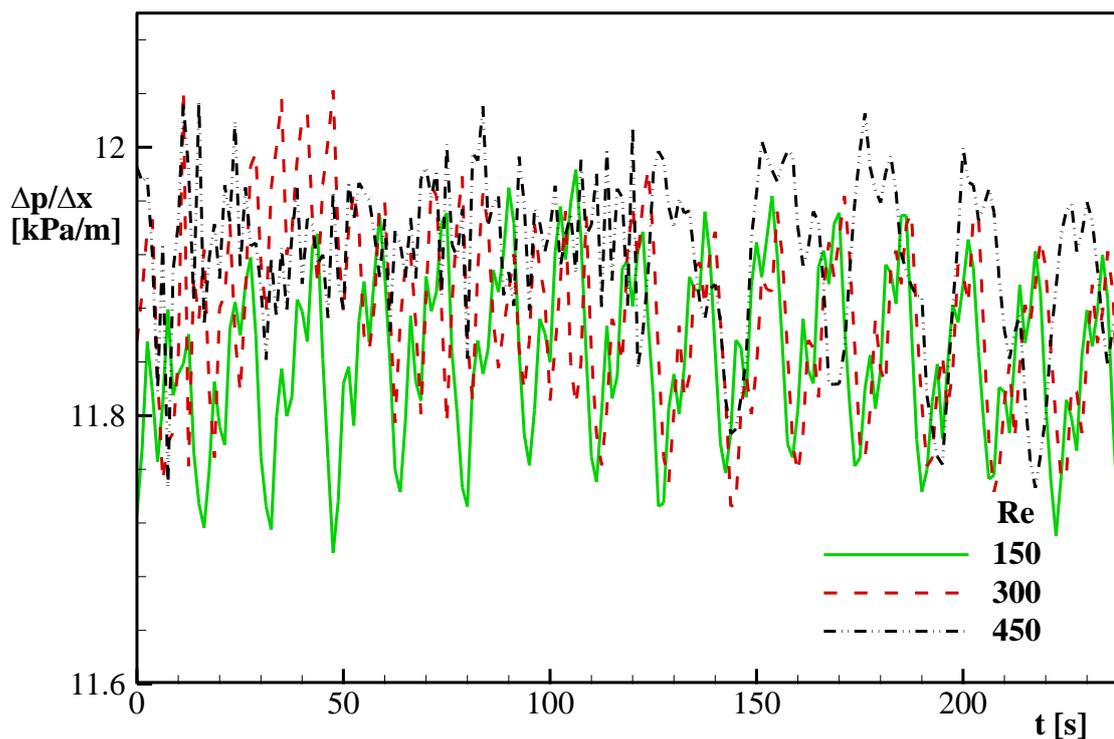


Figura 5.23 - Gradiente de pressão ao longo do tempo para $C_P = 2,5\%$ variando Re .

De acordo com a Figura 5.23, observa-se que o gradiente de pressão apresenta um aumento pouco significativo com o aumento do número de Reynolds.

5.3.3 Efeito da variação da vazão de fuga

Inicialmente, é apresentado o efeito da concentração para uma vazão de fuga maior que a apresentada na Figura 5.20.

A Figura 5.24 apresenta a formação do leito de partículas para $Re = 300$ e $Q_V = 1,0$.

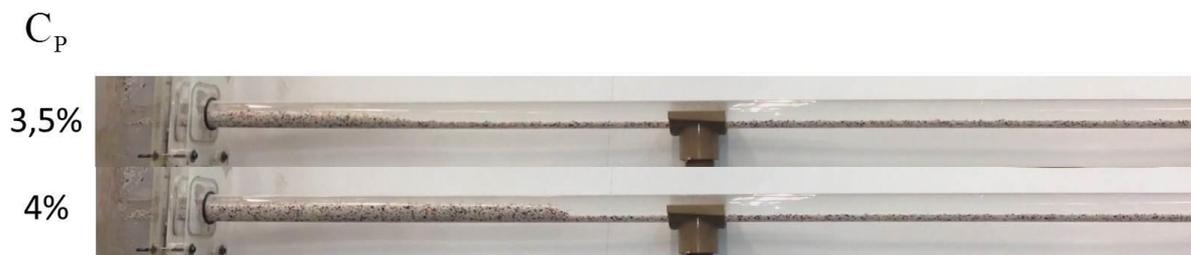


Figura 5.24 - Instantes finais para cada concentração de partículas utilizadas no processo de preenchimento da fratura para $Re = 300$ e $Q_V = 1,0$.

Observa-se na Figura 5.24 que existe uma maior entrada de partículas na fratura devido a maior vazão inicial de fuga de fluido.

Para essa abertura, observa-se que o gradiente de pressão apresenta maior instabilidade devido a maior concentração de partículas, e por consequência, maior peso do fluido.

A Figura 5.25 apresenta o gradiente de pressão ao longo do tempo para $C_P = 3,5\%$ e $C_P = 4\%$.

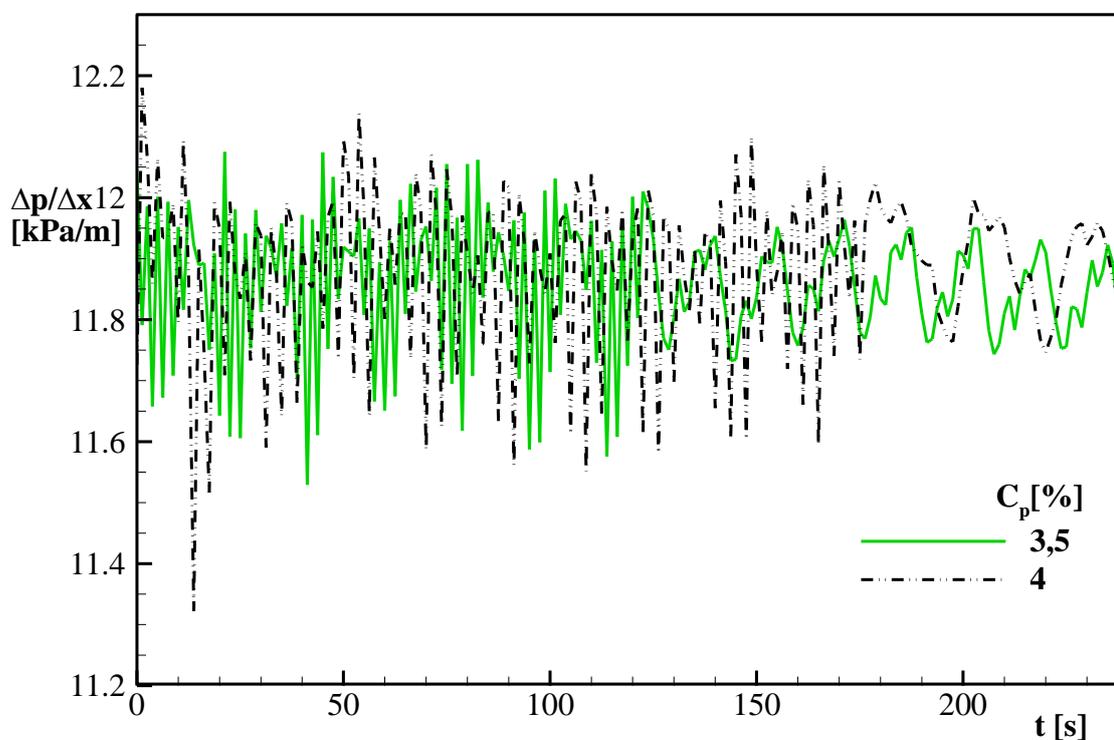


Figura 5.25 - Gradiente de pressão ao longo do tempo para $Re = 300$ e $Q_V = 1,0$.

Observe que na Figura 5.25 que existe uma diminuição da oscilação do gradiente de pressão no momento que o canal entra em regime. Isso se deve ao instante que não há mais entrada de partículas na fratura e a homogeneização do escoamento vertical no canal.

Avalia-se na Figura 5.26 o efeito da variação da vazão de fuga para $Re = 300$ e $C_P = 4\%$.



Figura 5.26 - Instantes finais para cada vazão de fuga utilizada no processo de preenchimento da fratura para $Re = 300$ e $C_P = 4\%$.

Observa-se na Figura 5.26 que existe uma maior entrada de partículas na fratura devido ao aumento da vazão de fuga.

A Tabela 5.10 apresenta as dimensões dos leitos formados para a configuração de número de Reynolds igual a 300 e concentração de partículas de 4%.

Tabela 5.10 - Parâmetros geométricos do leito de partículas para $C_P = 4\%$ e $Re = 300$.

Q_V	$h_{p,i}$ (mm)	h_p (mm)	e_p (mm)	t_{ip} (s)
0,75	10	292	12	60
1	4	379	15	90

A Figura 5.27 apresenta o gradiente de pressão ao longo do tempo para $Re = 300$ e $C_P = 4\%$.

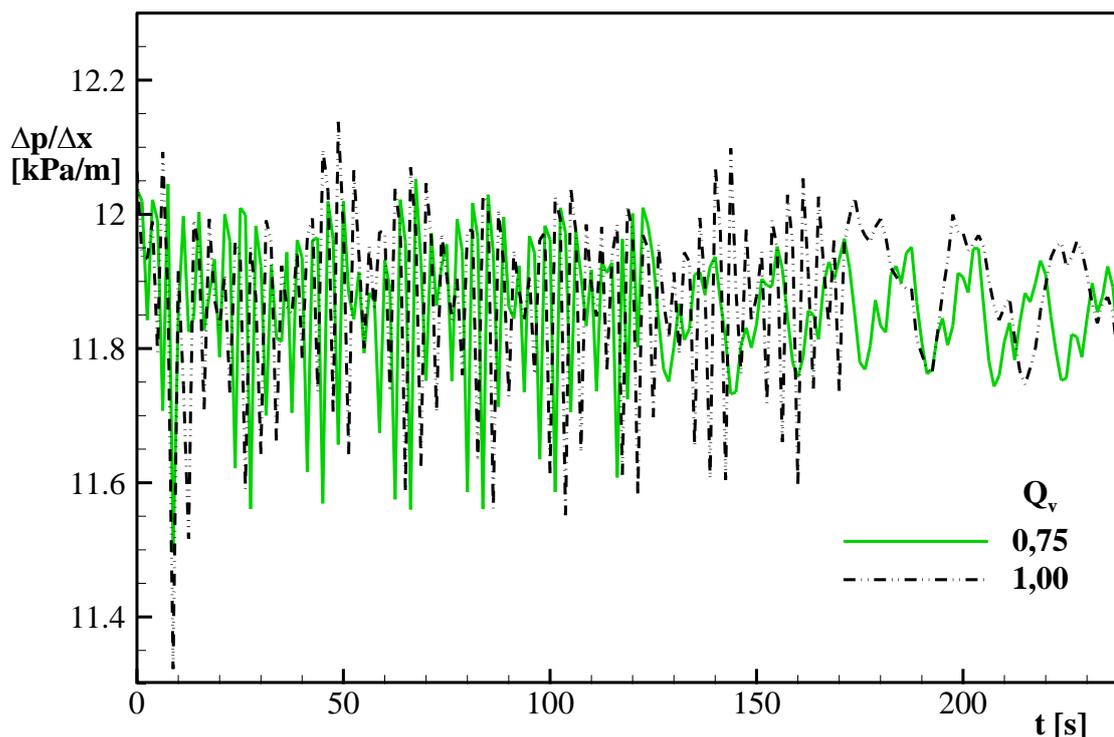


Figura 5.27 - Gradiente de pressão ao longo do tempo para $Re = 300$ e $C_P = 4\%$.

Observa-se na Figura 5.27 a mesma estabilização na oscilação da pressão detectada na Figura 5.25, devido a homogeneização do escoamento após a parada de entrada de partículas na fratura.

5.3.4 Efeito da variação da partícula utilizada

Nesta seção é apresentado o efeito da variação do material particulado utilizado para avaliar o processo de preenchimento da fratura. Comparou-se as partículas granulares de Urea com as esferas de vidro.

Avalia-se na Figura 5.28 os leitos formados utilizando dois diferentes materiais particulados, porém com os mesmos parâmetros $Re = 300$ e $C_P = 3\%$.



Figura 5.28 - Instantes finais para cada material particulado utilizado no processo de preenchimento da fratura para $Re = 300$, $C_P = 3\%$ e $Q_V = 0,75$.

Observa-se na Figura 5.28 que o leito de partículas formado pelas esferas de vidro apresenta maior comprimento e altura em relação ao leito formado por Urea. Isso se deve ao fato de que o fluido composto com esferas de vidro é mais pesado que o composto por Urea, proporcionando maior entrada de partículas na fratura.

A Figura 5.29 apresenta o gradiente de pressão ao longo do tempo para as partículas de Urea e de vidro, considerando $Re = 300$, $C_P = 3\%$ e $Q_V = 0,75$.

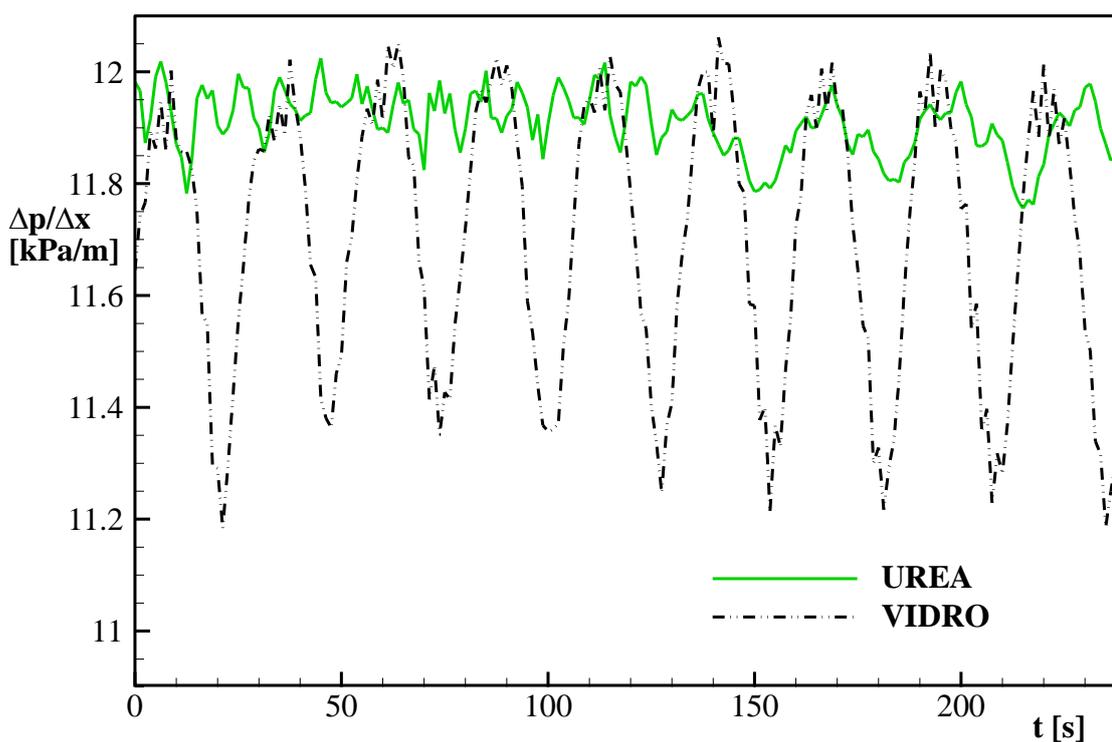


Figura 5.29 - Gradiente de pressão ao longo do tempo para $Re = 300$, $C_P = 3\%$ e $Q_V = 0,75$.

Observa-se na Figura 5.29 uma maior oscilação de pressão do escoamento contendo partícula de vidro. Isso se deve também ao maior peso efetivo do fluido quando comparado ao fluido que contém partícula de Urea.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou uma proposta de pesquisa e o projeto de reformulação de uma unidade experimental já existente nas dependências do CERNN-UTFPR. Além disso, efetuaram-se testes preliminares de escoamento líquido-sólido ascendente pelo canal e testes de formação de leito de partículas em fratura.

Conceitos envolvendo o fenômeno de perda de circulação e processos de calibração de instrumentos foram expostos detalhadamente no sentido de embasar o problema estudado e os resultados apresentados.

Visando uma maior confiabilidade dos dados obtidos através dos testes, todos os instrumentos de medição passaram por procedimento de caracterização para então ser possível determinar a incerteza de medição de cada medida realizada.

Foram apresentados também todos os componentes da unidade experimental utilizada para o desenvolvimento deste trabalho, desde bomba, tanque, instrumentos de medição instalados, seção de testes e também o fluido e o material particulado utilizado.

Ensaio reométrico foram necessários para determinar a composição da solução água-glicerina utilizada nos testes.

Resultados preliminares de escoamento líquido-sólido somente no canal vertical foram apresentados no sentido de mostrar a influência da composição do fluido e da concentração de partículas na mistura sobre as pressões mensuradas na seção de testes.

Analisou-se então o processo de preenchimento da fratura com a utilização de material particulado variando-se quatro parâmetros: concentração de partículas no fluido, número de Reynolds, vazão de fuga de fluido e material particulado.

Constatou-se que maiores concentrações de partículas resultam num fluido mais pesado, e por consequência, geram maiores leitos de partículas.

Observou-se que menores números de Reynolds do escoamento vertical no canal proporcionam maior entrada de partículas na fratura, resultando num maior preenchimento da fratura.

Maiores vazões de fuga também facilitam a entrada de partículas na fratura, resultando num maior leito formado.

Além disso, materiais particulados com maior massa específica tendem a tornar o fluido mais pesado e facilitar a entrada das partículas na fratura e o preenchimento da fratura.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A primeira sugestão a ser apontada é o estudo de formação de leito de partículas variando a geometria da fratura.

Outra sugestão diz respeito à instrumentação do aparato experimental. A instalação de um medidor de vazão posicionado na saída da fratura é de suma importância para a medição da vazão de fuga transiente ao longo do teste de preenchimento da fratura e, assim, poder determinar quantitativamente a eficácia do método proposto para controle de perda de circulação. Além do medidor de vazão, transdutores de pressão instalados na fratura para monitoramento da pressão na fratura ao longo da formação do leito são interessantes.

Sugere-se, também, a utilização de materiais particulados comerciais empregados como LCM nos testes de formação de leito de partículas.

No sentido de se aproximar cada vez mais do problema real, sugere-se a instalação de um meio poroso adjacente ao canal, uma vez que a formação rochosa geralmente é composta por uma matriz porosa. 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.

Outra sugestão seria no sentido da utilização de um fluido não-newtoniano para realizar os testes de escoamento particulado e formação de leito de partículas.

Por fim, sugere-se o estudo de outras formas de perda de circulação, como por exemplo as formações altamente permeáveis, mesmo sem a presença de fraturas. Neste sentido, seria possível estudar o escoamento particulado em meio poroso e

até mesmo a deposição das partículas na interface porosa, processo conhecido na indústria petrolífera como formação de torta.

REFERÊNCIAS

ABRAMS, A. Mud Design To Minimize Rock Impairment Due To Particle Invasion. **Journal of Petroleum Technology**, 1977.

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.

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

BLAND, J. M.; ALTMAN, D. G. **Statistics notes**: measurement error. *BM*, 1996.

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.

BYK. Rotational Viscometers, 2015. Disponível em: <<https://www.byk.com/en/instruments/products/download.php?doc=184>>. Acesso em: 08 nov. 2015.

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**, Rio de Janeiro, Abril 2015.

CARSON, C. C.; LIN, Y. T. The impact of common problems in geothermal drilling and completion. **Geothermal Resources Council Transactions**, 1982.

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

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

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.

DARLEY, H. C. H.; GRAY, G. R. **Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids**. Houston: Gulf Publishing Company, 1988.

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 (Mestrado). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2013.

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

DICK, M. A.; HEINZ, T. J.; SVOBODA, C. F. . A. M. Optimizing the Selection of Bridging Particles for Reservoir Drilling Fluids. **SPE Symposium on Formation Damage**, Louisiana, 2000.

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.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied Regression Analysis**. [S.l.]: Wiley-Interscience, 1998.

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

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

FALCONE, G.; HEWITT, G. F.; ALIMONTI, C. **Multiphase Flow Metering: Principles and Applications**. 1ª. ed. Oxford: Elsevier, v. 54, 2009.

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 7ª. ed. [S.l.]: LTC, 2010.

GIDASPOW, D. **Multiphase Flow and Fluidization**. Academic Press, 1994.

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

GRAF, T.; THERRIEN, R. Variable-density groundwater flow and solute transport in porous media containing nonuniform discrete fractures. **Advances in Water Resources**, Quebec, v. 28, p. 1351-1367, Junho 2005.

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

HANNEGAN, D.; ARNONE, M. Dynamic FITs verify changing integrity of complex. **Drilling It Safely**, 2 November 2012.

HUANG, J.; GRIFFITHS, D. V.; WONG, S.-W. Characterizing Natural-Fracture Permeability From Mud-Loss Data. **SPE Journal**, 2011.

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

IVAN, C. D. et al. Making a Case for Rethinking Lost Circulation Treatments in Induced Fractures. **SPE Annual Technical Conference and Exhibition**, San Antonio, 2002.

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

KOBAYOSHI, M. **Calibração de Instrumentos de Medição**. SENAI-SP, 2012.

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, 2001.

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.

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

REIS, E. **Estatística Descritiva**. 2ª. ed. Lisboa: Edições Sílabo, 1994.

RÜCKEN. Rücken Instrumentação e Automação Industrial. **Transmissor de pressão diferencial modelo RTP420-DIF**, São Paulo, 2014.

SOLIDSTRIP. Solidstrip Plastic Abrasives. **Material Data Safety Sheet - Urea Plastic Abrasive**, Isle of Man, 2006.

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.

STOKES, C. R. On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums. **Transactions of the Cambridge Philosophical Society**, v. IX, p. 8, 1850.

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.

TRAN, T. V.; CIVAN, F.; ROBB, I. Correlating Flowing Time and Condition For Perforation Plugging By Suspended Particles. **SPE Drilling & Completion**, September 2009.

VAN OORT, E.; VARGO, R. Improving Formation-Strength Tests and Their Interpretation. **SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition**, Amsterdam, 20-22 February 2008.

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

WHITFILL, D. L.; HEMPHILL, T. All Lost-Circulation Materials and Systems Are Not Created Equal. **SPE Annual Technical Conference and Exhibition**, Denver, Colorado, USA, 5-8 October 2003.

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.

ANEXO A – CLASSIFICAÇÃO DE LCM'S UTILIZADOS NA INDÚSTRIA

Este anexo apresenta alguns LCM's utilizados na indústria, seu nome comercial e o fabricante. Os LCM's foram classificados de acordo com sua geometria, material ou característica. As tabelas apresentadas a seguir foram adaptadas do trabalho desenvolvido por Alsaba e Nygaard (2014).

A Tabela A.1 lista exemplos de materiais granulares utilizados como LCM durante a perfuração de um poço de óleo e gás que apresenta o problema de perda de circulação.

Tabela A.1 - Exemplos de LCM's granulares

LCM granular		
Nome comercial	Fabricante	Aplicação
WALL-NUT	Halliburton	Usada como pílula concentrada. Normalmente utilizada para controle de perdas pequenas (infiltração), parciais e totais.
MIL-PLUG	Baker Hughes	
NewPlug	NEWPARK	
WALNUT HULLS	GEO Drilling Fluids	
NUTSHELL	Anchor Drilling Fluids	
MESUCO-PLUG	Messina Chemicals	Pode ser usada como pré-tratamento ou como pílula concentrada, dependendo da taxa de perda de fluido. Usada também como WSM.
STEELSEAL	Halliburton	
G-SEAL	MI SWACO	
C-SEAL	MI SWACO	
LC-LUBE	Baker Hughes	
NewSeal	NEWPARK	Pode ser usada como pré-tratamento ou como pílula concentrada.
SURE-SEAL	Drilling Specialties	
TORQUE-SEAL	Drilling Specialties	Pode ser usada como pré-tratamento, para perdas pequenas ou severas.
EZ-PLUG	Halliburton	
BARACARB	Halliburton	Usada como agente selante de poros para problemas de perda de circulação. Também utilizada como WSM.
SAFE-CARB	MI SWACO	
NewCarb	NEWPARK	
FLOW-CARB	Baker Hughes	
MIL-CARB	Baker Hughes	
W. O. 30	Baker Hughes	Usada para perdas severas.

A Tabela A.2 lista exemplos de materiais em formato de flocos utilizados como LCM durante a perfuração de um poço de óleo e gás que apresenta o problema de perda de circulação.

Tabela A.2 - Exemplos de LCM's em flocos

LCM em flocos		
Nome comercial	Fabricante	Aplicação
MILFLAKE	Baker Hughes	Usada em conjunto com outros LCM's dependendo da severidade da perda.
MESUCO-FLAKE	Messina Chemicals	
MILMICA	Baker Hughes	Usada como medida preventiva para perdas pequenas (infiltração).
MESUCO-MICA	Messina Chemicals	
SOLUFLAKE	Baker Hughes	Usada para perdas pequenas (infiltração) ou severas.

A Tabela A.3 lista exemplos de materiais em formato de fibras utilizados como LCM durante a perfuração de um poço de óleo e gás que apresenta o problema de perda de circulação.

Tabela A.3 - Exemplos de LCM's em fibras

LCM em fibras		
Nome comercial	Fabricante	Aplicação
BAROFIBRE	Halliburton	Pode ser usada como tratamento preventivo ou pílula concentrada para controle de perdas pequenas (infiltração) a severas.
M-I-X II	MI SWACO	
VINSEAL	MI SWACO	
CHEK-LOSS	Baker Hughes	
MESUCO-FIBER	Messina Chemicals	Usada para tratamento normal de perdas por infiltração ou como pílula concentrada.
CyberSeal	NEWPARK	
FIBER SEAL	GEO Drilling Fluids	
DYNARED	Drilling Specialties	
DYNA-SEAL	Drilling Specialties	
M-I CEDAR FIBER	MI SWACO	
FIBER PLUG	Anchor Drilling Fluids	Pode ser usada como tratamento preventivo ou pílula concentrada.
PLUG-GIT	Halliburton	
MIL-CEDAR	Baker Hughes	Pode ser usada como pré-tratamento ou como pílula concentrada.
N-SEAL	Halliburton	
CAVI-SEAL-AS	Messina Chemicals	
MAGMA FIBER	GEO Drilling Fluids / Anchor Drilling Fluids	

A Tabela A.4 lista exemplos de combinações de materiais utilizados como LCM durante a perfuração de um poço de óleo e gás que apresenta o problema de perda de circulação.

Tabela A.4 - Exemplos de combinações de LCM's

Combinações de LCM's		
Nome comercial	Fabricante	Aplicação
STOPPIT	Halliburton	
PRIMA SEAL	GEO Drilling Fluids	Usada como pílula concentrada.
STOP-FRAC S	Halliburton	
WELL SEAL	Drilling Specialties	Usada para tratamento de perdas pequenas (infiltração).
BARO-SEAL	Halliburton	
STOP-FRAC D	Halliburton	
M-I SEAL	MI SWACO	Pode ser usada como tratamento preventivo ou pílula concentrada para controle de perdas pequenas (infiltração) a severas.
MIL-SEAL	Baker Hughes	
CHEM SEAL	Anchor Drilling Fluids	
KWIK-SEAL	Messina Chemicals	
MESUCO SEAL	Messina Chemicals	
EZ-PLUG	Halliburton	Pode ser usada como pré-tratamento, para perdas pequenas ou severas.
QUIK-WEDGE	Sharp-Rock Technologies, Inc.	Pode ser usada como pré-tratamento ou como pílula concentrada.
STRESS-SHIELD	Sharp-Rock Technologies, Inc.	Pode ser usada como pré-tratamento ou como pílula concentrada.

A Tabela A.5 lista exemplos de materiais solúveis em ácido utilizados como LCM durante a perfuração de um poço de óleo e gás que apresenta o problema de perda de circulação.

Tabela A.5 - Exemplos de LCM's solúveis em ácido

LCM's solúveis em ácido		
Nome comercial	Fabricante	Aplicação
EZ-PLUG	Halliburton	Pode ser usada como pré-tratamento, para perdas pequenas ou severas.
N-SQUEEZE	Halliburton	Usada como <i>squeeze</i> ajustável para perdas severas.
N-SEAL	Halliburton	
CAVI-SEAL-AS	Messina Chemicals	Pode ser usada como pré-tratamento ou como pílula concentrada.
MAGMA FIBER	GEO Drilling Fluids / Anchor Drilling Fluids	
BARAPLUG	Halliburton	Usada como selante temporário em formações altamente permeáveis.
BARACARB	Halliburton	
SAFE-CARB	MI SWACO	
NewCarb	NEWPARK	Usada como agente selante de poros para problemas de perda de circulação.
FLOW-CARB	Baker Hughes	
MIL-CARB	Baker Hughes	
W. O. 30	Baker Hughes	Usada para perdas severas.
SOLUFLAKE	Baker Hughes	Usada para perdas pequenas (infiltração) ou severas.
HOLE-SEAL-II	Messina Chemicals	Pode ser usada como pré-tratamento ou como pílula concentrada.

A Tabela A.6 lista exemplos de materiais utilizados como LCM *squeeze* durante a perfuração de um poço de óleo e gás que apresenta o problema de perda de circulação.

Tabela A.6 - Exemplos de LCM's *squeezes* para elevada perda de fluido

LCM's <i>squeezes</i> para elevada perda de fluido		
Nome comercial	Fabricante	Aplicação
GEO STOP LOSS	GEO Drilling Fluids	
DIASEL M	Drilling Specialties	
DIAPLUG	Messina Chemicals	Usada como <i>squeeze</i> para elevada perda de fluido.
X-Prima	NEWPARK	
NewBridge	NEWPARK	
ULTRA SEAL	GEO Drilling Fluids	Usada como pílula concentrada.
WEDGE-SET	Sharp-Rock Technologies, Inc.	Usada como <i>squeeze</i> para elevada perda de fluido.
DUO-SQUEEZE	Halliburton	Pode ser usada como <i>squeeze</i> para elevada perda de fluido ou como pílula concentrada.

A Tabela A.7 lista exemplos de materiais hidratáveis utilizados como LCM durante a perfuração de um poço de óleo e gás que apresenta o problema de perda de circulação.

Tabela A.7 - Exemplos de LCM's ajustáveis / hidratáveis

LCM's ajustáveis / hidratáveis		
Nome comercial	Fabricante	Aplicação
HYDRO-PLUG	Halliburton	Usada como pílula hidratável para selar formações cavernosas ou fraturadas.
SUPER-STOP	Messina Chemicals	Usada como pílula dilatável para perdas severas.
N-SQUEEZE	Halliburton	Usada como <i>squeeze</i> ajustável para perdas severas.

A Tabela A.8 lista exemplos de nanopartículas utilizadas como LCM durante a perfuração de um poço de óleo e gás que apresenta o problema de perda de circulação.

Tabela A.8 - Exemplos de LCM's nanoparticulados

LCM's nanoparticulados		
Nome comercial	Fabricante	Aplicação
Iron Hydroxide NP	nFluids Inc.	Usada como pré-tratamento para selar microfraturas e aplicações tipo WSM.
Calcium Carbonate NP	nFluids Inc.	

ANEXO B – 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 B.1 apresenta os valores de viscosidade dinâmica da mistura água-glicerina de em relação a temperatura na qual o fluido se encontra. A Tabela B.2 apresenta os valores de massa específica da solução água-glicerina também em relação a temperatura da solução.

A Tabela B.1 e a Tabela B.2 foram retiradas de Dorsey (1940).

Tabela B.1 - Viscosidade dinâmica da solução água glicerina

Glycerine percent weight	Temperatur e (°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

Tabela B.2 - Massa específica da solução água-glicerina

Glycerine (%)	Density (g/cm ³)					Glycerine (%)	Density (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

ANEXO C – PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO PARA INICIAR FUNCIONAMENTO DA UNIDADE EXPERIMENTAL

Este anexo apresenta o Procedimento Operacional Padrão desenvolvido pelo Laboratório de Meios Porosos do CERNN com o objetivo de padronizar o procedimento 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				

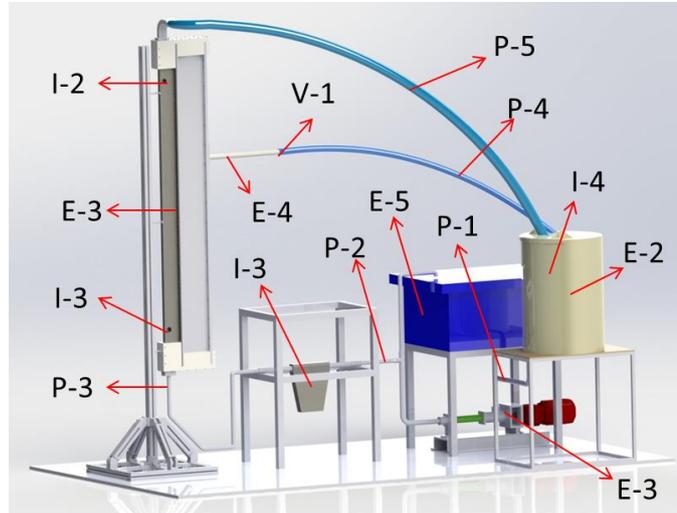


Figura 1 – Projeto do circuito experimental.

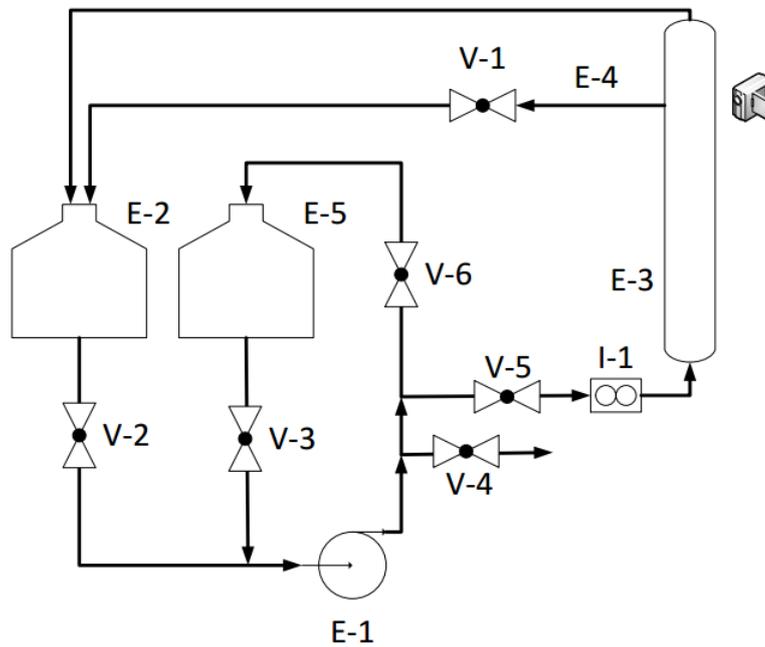


Figura 2 – Esquema hidráulico do circuito experimental.

	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
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

	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				

14. No quadro Q-2, verificar no inversor de frequência F-2 o sentido de rotação da bomba E-1 e ajustar para 'FOWARD'
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