

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

FELIPE BARBOZA PEREIRA

**ANÁLISE DO ESCOAMENTO PARTICULADO COM FLUIDO NÃO NEWTONIANO
EM CANAL VERTICAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2019

FELIPE BARBOZA PEREIRA

**ANÁLISE DO ESCOAMENTO PARTICULADO COM FLUIDO NÃO NEWTONIANO
EM CANAL VERTICAL**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Luiz de Mello Junqueira.

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

CURITIBA

2019

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "Análise do Escoamento Particulado com Fluido Não Newtoniano em Canal Vertical", realizado pelo aluno Felipe Barboza Pereira, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Silvio L. M. Junqueira
Departamento, DAMEC
Orientador

Prof. Dr. Cezar O. R. Negrão
Departamento, DAMEC
Avaliador

Prof. Dr. Eduardo M. Germer
Departamento, DAMEC
Avaliador

Curitiba, 26 de fevereiro de 2019.

“Não vá para onde o caminho leva. Vá,
pelo contrário, por onde não há caminho e
deixe suas pegadas”
(Ralph Waldo Emerson)

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a pessoa que, se não fosse por ela, nada disso estaria acontecendo, a pessoa que me encorajou nos momentos difíceis e que me ensinou a nunca desistir, a pessoa que batalhou a vida inteira para que eu tivesse a melhor qualidade de vida e a melhor formação profissional possível, a pessoa que quando eu mais precisei estava lá para me confortar e motivar, a minha mãe Claudia M. Oliveira Barboza.

Agradeço a Deus, que está sempre comigo, sempre me ouve e possibilita que alcance meus objetivos.

Ao meu pai Paulo Roberto da Silva, que formou meu caráter e ajudou muito na minha personalidade, que “puxou minhas orelhas” quando tinha que ser feito e é sem dúvidas uma grande inspiração na minha vida.

Ao meu orientador Prof^o. Sílvio Junqueira, pessoa ímpar, que contribuiu, não só na minha formação como profissional, mas também como pessoa.

Ao meu coorientador Fernando De Lai por toda sua dedicação e contribuição na correção deste trabalho, e por ter me proporcionado, juntamente ao Prof^o. Sílvio, a oportunidade de fazer parte de algo grande como membro do CERNN.

Aos membros da banca Prof^o. Cezar Negrão e Prof^o. Eduardo Germer

Aos amigos mais sinceros que fiz dentro da instituição e que com certeza levarei para o restante da minha vida, em especial: Guilherme Tavares, Michel Pedrozo, Jonathan Bresolin, Renato Carinha, Alfeu Neto, Vinicius Nadal, Luis da Silva (Sabujo), Caio Nodari (Chicão), Fellipe Anderson, Fabrício Zanetelli.

Aos meus companheiros de CERNN, em especial aos mestres Cássio Schneider e Giovani Fritoli, que me “aturaram” durante mais de dois anos e com quem compartilhei momentos incríveis. Sem a ajuda deles esse TCC não teria saído do forno, com certeza. Também agradeço ao mestre Vinicius Poletto, e ao Victor Barros.

À instituição UTFPR e todos os professores que fizeram parte dessa jornada, e ao CERNN, juntamente à Petrobras, que possibilitaram e financiaram este trabalho.

RESUMO

PEREIRA, Felipe Barboza. Estudo do Escoamento Particulado Não Newtoniano em Canal Vertical. 129 f. Trabalho de conclusão de curso – Tcc2, Bacharelado em Engenharia Mecânica, Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Em operações de exploração de poços de petróleo existe a utilização de diferentes fluidos em conjunto com aditivos particulados denominados LCM, para impedir a fuga de fluido para a formação rochosa, o que caracteriza a perda de circulação. O objetivo do presente trabalho é avaliar, mediante testes experimentais, a perda de carga gerada pela interação de material particulado LCM presente no escoamento com fluido não newtoniano. A unidade experimental de perda de circulação, desenvolvida no LaMP-CERNN-UTFPR, será readaptada para o problema proposto. Os componentes do circuito hidráulico serão aperfeiçoados para utilização de fluidos não newtonianos e aplicação de diferentes LCM. A seção de testes será projetada com a instrumentação adequada para a caracterização da perda de carga. Para esta avaliação serão variados parâmetros de interesse, como: número de Reynolds do canal, tipo de fluido (newtoniano, viscoplástico), concentração de aditivos no fluido (glicerina, gel comercial), diâmetro e concentração mássica de partículas. Os experimentos são monitorados ao longo do tempo com a utilização de transdutores de pressão, temperatura e medidor de vazão. Curvas características são obtidas para a caracterização da perda de carga no canal, evidenciando o efeito da adição de LCM em fluidos não newtonianos.

Palavras-chave: Processo de perfuração. Fluido não newtoniano. LCM. Perda de carga. Aparato experimental.

ABSTRACT

PEREIRA, Felipe Barboza. Analysis of Particulate Flow with Non-Newtonian Fluid in Vertical Channel. 129 p. Undergraduate Thesis, Mechanical Engineering, Academic Mechanical Engineering Department, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

In exploration of oil wells there is the use of different fluids combined with particulate additives called LCM, to prevent leakage of fluid to the rock formation, which characterizes the loss of circulation. The objective of the present work is to evaluate, through experimental tests, the pressure drop generated by the interaction of LCM particulate material present in the flow with non-Newtonian fluid. The experimental unit of circulation loss, developed in LaMP-CERNN-UTFPR, will be readapted to the proposed problem. The components of the hydraulic circuit will be optimized for use of non-Newtonian fluids and application of different LCMs. The test section shall be designed with appropriate instrumentation for the characterization of the pressure drop. For this evaluation will be varied parameters of interest, such as: Reynolds number, fluid type (Newtonian, viscoplastic), concentration of additives in the fluid (glycerin, commercial gel), diameter and mass concentration of particles. The experiments are monitored over time with the use of pressure transducers, temperature and flow meter. Characteristic curves are obtained for the characterization of the pressure drop on the channel, evidencing the effect of the addition of LCM in non-Newtonian fluids.

Key words: Drilling process. Non-newtonian fluid. LCM. Pressure drop. Experimental apparatus.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - ESQUEMA DE PERFURAÇÃO DE POÇO DE PETRÓLEO.	18
FIGURA 2 - FAIXAS DE ECD	19
FIGURA 3 - MÉTODOS DE CORREÇÃO E PREVENÇÃO DE PERDA DE CIRCULAÇÃO.	22
FIGURA 4 - EXEMPLOS DE ZONAS DE PERDA DE CIRCULAÇÃO.	24
FIGURA 5 - GEOMETRIA DO PROBLEMA: (A) REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM PROCESSO DE PERFURAÇÃO; (B) REPRESENTAÇÃO DA GEOMETRIA DE ESTUDO.	25
FIGURA 6 – DIAGRAMA DO COMPORTAMENTO TÍPICO DE ALGUNS FLUIDOS PURAMENTE VISCOSOS: (A) TENSÃO DE CISLHAMENTO EM FUNÇÃO DA TAXA DE DEFORMAÇÃO E (B) VISCOSIDADE EM FUNÇÃO DA TAXA DE DEFORMAÇÃO.	38
FIGURA 7 – PADRÕES DE FLUIDIZAÇÃO DE PARTÍCULAS: (A) LEITO FIXO; (B) FLUIDIZAÇÃO HOMOGÊNEA; (C) FLUIDIZAÇÃO BORBULHANTE; (D) FLUIDIZAÇÃO TURBULENTA; (E) FLUIDIZAÇÃO RÁPIDA OU TRANSPORTE PNEUMÁTICO	45
FIGURA 8 – CIRCUITO HIDRÁULICO: (A) REPRESENTAÇÃO DO CIRCUITO, (B) DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS QUE O COMPÕE.	47
FIGURA 9 – APARATO EXPERIMENTAL: (A) FOTOGRAFIA REAL DO APARATO; (B) VISTA ISOMÉTRICA EM 3D DO PROJETO DO APARATO NO SOFTWARE SOLIDWORKS.	48
FIGURA 10 – VISTA EM CORTE DA SEÇÃO DE TESTES UTILIZADA.	50
FIGURA 11 - BOCAL FLANGEADO DE ENTRADA DA SEÇÃO DE TESTES	51
FIGURA 12 - BOCAL CURVO DE SAÍDA DA SEÇÃO DE TESTES.....	51
FIGURA 13 - TANQUE MISTURADOR.....	52
FIGURA 14 - BOMBA HELICOIDAL.	53
FIGURA 15 – MEDIDOR DE VAZÃO CORIOLIS.	54
FIGURA 16 - TERMOPAR	55
FIGURA 17 - TRANSDUTOR DE PRESSÃO RELATIVO	55
FIGURA 18 – PAINEL DE CONTROLE DOS DISPOSITIVOS.	56
FIGURA 19 – INTERFACE DE CONTROLE DO CIRCUITO.	57
FIGURA 20 – INTERFACE DE ACOMPANHAMENTO DOS PARÂMETROS DE ESTUDO EM TEMPO REAL.	58
FIGURA 21 – VÁLVULAS QUE NECESSITAM DE ATENÇÃO.	59
FIGURA 22 - RECIPIENTE UTILIZADO NO ARMAZENAMENTO DE LCM.....	61
FIGURA 23 – PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO. POP - PARTE 1.	61
FIGURA 24 – PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO. POP - PARTE 2.	62
FIGURA 25 - TUBULAÇÕES DE RETORNO AO TANQUE MISTURADOR.	63
FIGURA 26 – PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO. POP – PARTE 3	65
FIGURA 27 - PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO (POP) PARA AVALIAÇÃO DA PERDA DE CARGA PELA ADIÇÃO DE PARTÍCULAS APU.....	66
FIGURA 28 - MATERIAL PARTICULADO APU COM FAIXA DE DIÂMETROS: (A) DP ₁ ; (B) DP ₂ E (C) DP ₃	69
FIGURA 29 - REGRESSÃO LINEAR PARA O TRANSMISSOR DE PRESSÃO INFERIOR (I-3)	72
FIGURA 30 - REGRESSÃO LINEAR PARA O TRANSMISSOR DE PRESSÃO SUPERIOR (I-4)	73
FIGURA 31 - REGRESSÃO LINEAR PARA OS RESULTADOS DO TRANSMISSOR DE PRESSÃO DIFERENCIAL (I-5).....	74
FIGURA 32 – DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DE APU PARA A FAIXA DE DIÂMETROS D ₁ . ..	75
FIGURA 33 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DE APU PARA A FAIXA DE DIÂMETROS D ₂	76
FIGURA 34 – FANN 35.....	78
FIGURA 35 – TIPOS DE BALANÇAS UTILIZADAS: (A) BALANÇA COM PRECISÃO DE UMA GRAMA, (B) BALANÇA COM PRECISÃO DE UM CENTÉSIMO DE GRAMA.	80
FIGURA 36 - RECIPIENTE GRADUADO	80

FIGURA 37 – CURVAS DA VISCOSIDADE EM TRIPLICATA PARA A FORMULAÇÃO REFERENTE AO FLUIDO CBP 5.....	81
FIGURA 38 – CURVAS DE VISCOSIDADE MÉDIA COMPARATIVAS REFERENTES ÀS TRÊS CONCENTRAÇÕES DISTINTAS DE CARBOPOL.	82
FIGURA 39 – CURVA DE VISCOSIDADE EM FUNÇÃO DA TAXA DE CISALHAMENTO, EM TRIPLICATA, PARA A FORMULAÇÃO DE GLICERINA.	82
FIGURA 40 – CURVA DA TENSÃO EM FUNÇÃO DA TAXA DE CISALHAMENTO PARA FORMULAÇÃO DE GLICERINA.	83
FIGURA 41 – CURVAS DA TENSÃO PELA TAXA DE CISALHAMENTO PARA O FLUIDO CBP 5, EM TRIPLICATA.....	84
FIGURA 42 – CURVAS DE TENSÃO MÉDIAS COMPARATIVAS REFERENTES ÀS TRÊS CONCENTRAÇÕES DISTINTAS DE CARBOPOL (CBP 5, CBP 10, CBP 20).	85
FIGURA 43 - PICNÔMETRO.....	85
FIGURA 44 - TESTE PADRÃO PARA O CBP 10: (A) PRESSÃO INFERIOR AO LONGO DO TEMPO, (B) PRESSÃO SUPERIOR AO LONGO DO TEMPO.	87
FIGURA 45 - INDICAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE OS TRANSDUTORES DE PRESSÃO, I-3 E I-4. ...	88
FIGURA 46 - DUPLICATA DO TESTE PADRÃO PARA O CBP 10: PRESSÃO AO LONGO DO TEMPO.	89
FIGURA 47 - GRADIENTE DE PRESSÃO AO LONGO DO TEMPO.....	89
FIGURA 48 – GRADIENTE DE PRESSÃO AO LONGO DO TEMPO. (10 cP, RE=200, DP ₂ , APU2%)	90
FIGURA 49 - DIFERENÇA DO GRADIENTE DE PRESSÃO EM FUNÇÃO DO TIPO DE FLUIDO. (10 cP, RE=200, DP ₂ , APU2%)	91
FIGURA 50 - GRADIENTE DE PRESSÃO AO LONGO DO TEMPO: INFLUÊNCIA DA VISCOSIDADE DA MISTURA. (CBP, RE=100, DP ₂ , APU2%)	92
FIGURA 51 - DIFERENÇA DO GRADIENTE DE PRESSÃO EM FUNÇÃO DA VISCOSIDADE À TAXA DE 1000 s ⁻¹ . (CBP, RE=100, DP ₂ , APU2%).....	93
FIGURA 52 - GRADIENTE DE PRESSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO: INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO PERCENTUAL DE LCM. (CBP10, RE=100, DP ₂)	94
FIGURA 53 – DIFERENÇA DO GRADIENTE DE PRESSÃO EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO PERCENTUAL DE PARTÍCULAS. (CBP10, RE=100, DP ₂).....	95
FIGURA 54 - GRADIENTE DE PRESSÃO AO LONGO DO TEMPO: INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DO LCM. (CBP10, RE=100, APU2%).....	96
FIGURA 55 – DIFERENÇA DO GRADIENTE DE PRESSÃO EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO DAS PARTÍCULAS. (CBP10, RE=100, APU2%).....	97
FIGURA 56 - GRADIENTE DE PRESSÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO: INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE REYNOLDS. (CBP10, DP ₂ , APU2%)	98
FIGURA 57 - GRÁFICO DO GRADIENTE DE PRESSÃO EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE REYNOLDS.	99
FIGURA A 1 - DIAGRAMA DE VISCOSIDADE EM FUNÇÃO DA TAXA DE CISALHAMENTO PARA O CBP 5.....	109
FIGURA A 2 - DIAGRAMA DE TENSÃO EM FUNÇÃO DA TAXA DE CISALHAMENTO PARA O CBP 5.	109
FIGURA A 3 - DIAGRAMA DE VISCOSIDADE EM FUNÇÃO DA TAXA DE CISALHAMENTO PARA O CBP 10.....	111
FIGURA A 4 - DIAGRAMA DE TENSÃO EM FUNÇÃO DA TAXA DE CISALHAMENTO PARA O CBP 10.....	112

FIGURA A 5 - DIAGRAMA DE VISCOSIDADE EM FUNÇÃO DA TAXA DE CISALHAMENTO PARA O CBP 20.....	114
FIGURA A 6 - DIAGRAMA DE TENSÃO EM FUNÇÃO DA TAXA DE CISALHAMENTO PARA O CBP 20.....	114
FIGURA A 7 - DIAGRAMA DE VISCOSIDADE EM FUNÇÃO DA TAXA DE CISALHAMENTO PARA O CBP 20.....	116
FIGURA A 8 - DIAGRAMA DE TENSÃO EM FUNÇÃO DA TAXA DE CISALHAMENTO PARA O CBP 20.....	116
FIGURA B 1 - BANCADA EXPERIMENTAL: PROJETO 3D: A) VISTA ISOMÉTRICA, B)VISTA FRONTAL E C) VISTA LATERAL.....	119
FIGURA B 2 – CIRCUITO HIDRÁULICO DA BANCADA.	120
FIGURA C 1 - DIAGRAMA DE BLOCOS.	124

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CLASSIFICAÇÃO DA PERDA DE CIRCULAÇÃO EM FUNÇÃO DO TIPO DE FLUIDO E SEVERIDADE.....	21
TABELA 2 - CLASSIFICAÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO LCM DE ACORDO COM FORMA E CARACTERÍSTICAS.	23
TABELA 3 - CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS DO TANQUE MISTURADOR.....	53
TABELA 4 - CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS DA BOMBA HELICOIDAL.....	53
TABELA 5 - CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS DO MEDIDOR DE VAZÃO CORIOLIS.	54
TABELA 6 - CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS DO TERMOPAR.	55
TABELA 7 - CARACTERÍSTICAS DOS TRANSMISSORES DE PRESSÃO RELATIVA E DIFERENCIAL.	55
TABELA 8 - CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS DOS MÓDULOS UTILIZADOS.....	58
TABELA 9 - ADITIVOS POLIMÉRICOS: CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS.	67
TABELA 10 - CARACTERÍSTICAS DAS PARTÍCULAS ADQUIRIDAS PARA OS TESTES.....	68
TABELA 11 - RESULTADOS OBTIDOS PARA CALIBRAÇÃO DO TRANSMISSOR DE PRESSÃO INFERIOR (I-3).....	72
TABELA 12 - RESULTADOS OBTIDOS PARA CALIBRAÇÃO DO TRANSMISSOR DE PRESSÃO SUPERIOR (I-4).....	72
TABELA 13 - RESULTADOS OBTIDOS PARA CALIBRAÇÃO DO TRANSMISSOR DE PRESSÃO DIFERENCIAL (I-5).....	73
TABELA 14 – COMPARAÇÃO ENTRE A GRANULOMETRIA INFORMADA E A VERIFICADA PARA AS PARTÍCULAS APU.	75
TABELA 15 - FAIXA DE DIÂMETROS ATUALIZADA PRA AS PARTÍCULAS APU.	76
TABELA 16 - RELAÇÃO DE FLUIDOS UTILIZADOS NOS TESTES EXPERIMENTAIS.....	78
TABELA 17 - CONSTANTES DO EQUIPAMENTO.	79
TABELA 18 - MASSA ESPECÍFICA DAS FORMULAÇÕES.	86
TABELA 19 - PARÂMETROS DE VARIAÇÃO.	86
TABELA A 1 - CONSTANTES DO VISCOSÍMETRO ROTACIONAL FANN 35A.....	108
TABELA A 2 - DADOS DE MEDIÇÃO REOLÓGICA PARA CBP 5 - MEDIDA 01.....	108
TABELA A 3 - DADOS DE MEDIÇÃO REOLÓGICA PARA CBP 5 - MEDIDA 02.....	108
TABELA A 4 - DADOS DE MEDIÇÃO REOLÓGICA PARA CBP 5 - MEDIDA 03.....	108
TABELA A 5 - DADOS OBTIDOS PARA REALIZAÇÃO DO AJUSTE PELO MODELO HERSCHEL-BULKLEY, COM O AUXÍLIO DO LAB FIT.	108
TABELA A 6 - DADOS OBTIDOS COM O AJUSTE, PARA O CBP 5, PELO MODELO HERSCHEL-BULKLEY.....	109
TABELA A 7 - DADOS DE MEDIÇÃO REOLÓGICA PARA CBP 10 - MEDIDA 01.....	110
TABELA A 8 - DADOS DE MEDIÇÃO REOLÓGICA PARA CBP 10 - MEDIDA 02.....	110
TABELA A 9 - DADOS DE MEDIÇÃO REOLÓGICA PARA CBP 10 - MEDIDA 03.....	110
TABELA A 10 - DADOS OBTIDOS PARA REALIZAÇÃO DO AJUSTE, PARA O CBP 10, PELO MODELO HERSCHEL-BULKLEY, COM O AUXÍLIO DO LAB FIT.	110
TABELA A 11 - DADOS OBTIDOS COM O AJUSTE, PARA O CBP 10, PELO MODELO HERSCHEL-BULKLEY.....	111
TABELA A 12 - DADOS DE MEDIÇÃO REOLÓGICA PARA CBP 20 - MEDIDA 01.....	113
TABELA A 13 - DADOS DE MEDIÇÃO REOLÓGICA PARA CBP 20 - MEDIDA 02.....	113
TABELA A 14 - DADOS DE MEDIÇÃO REOLÓGICA PARA CBP 20 - MEDIDA 03.....	113

TABELA A 15 - DADOS OBTIDOS PARA REALIZAÇÃO DO AJUSTE, PARA O CBP 20, PELO MODELO HERSHEY-BULKLEY, COM O AUXÍLIO DO LAB FIT.	113
TABELA A 16 - DADOS OBTIDOS COM O AJUSTE, PARA O CBP 20, PELO MODELO HERSHEY-BULKLEY.....	114
TABELA A 17 - DADOS DE MEDIÇÃO REOLÓGICA PARA GLI 10 - MEDIDA 01	115
TABELA A 18 - DADOS DE MEDIÇÃO REOLÓGICA PARA GLI 10 - MEDIDA 02.	115
TABELA A 19 - DADOS DE MEDIÇÃO REOLÓGICA PARA GLI 10 - MEDIDA 03.	115
TABELA B 1 – RELAÇÃO DOS COMPONENTES DA BANCADA EXPERIMENTAL.....	120

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

AG	Solução de água e glicerina
ASME	American Society of Mechanical Engineers
BOE	Barris de Petróleo Equivalente
CB	Carbopol
CMC	Carboximetilcelulose
CERNN	Centro de Pesquisas em Reologia e Fluidos Não Newtonianos
GrMats	Grupo de Materiais, Tribologia e Superfícies
GX	Goma xantana
LaMP	Laboratório de Meios Porosos
LCM	Lost circulation material – material de perda de circulação
NPT	Nonproductive Time
PVC	Policloreto de Polivinila

LISTA DE SÍMBOLOS

A_c	Área da seção transversal.	m^2
A	Área de contato entre placas.	m^2
C_{CMC}	Fração mássica de carboximetilcelulose	-
(CMC)		
C_P	Fração mássica de partículas	-
C_α	Fração mássica de determinada substância	-
D	Diâmetro da tubulação	m
D_h	Diâmetro hidráulico	m
da	Distância infinitesimal	m
dp	Diâmetro da partícula	mm
dt	Intervalo de tempo infinitesimal	s
$d\beta$	Ângulo de inclinação infinitesimal	-
F	Força	N
g	Aceleração da gravidade	m/s^2
K	Consistência do fluido	-
K_1	Constante 1 de equipamento Fann 35 A	-
K_2	Constante 2 de equipamento Fann 35 A	-
K_3	Constante 3 de equipamento Fann 35 A	-
K_{mod}	Índice de consistência modificado	-
L	Distância entre placas planas paralelas	m
m_{CMC}	Massa de carboximetilcelulose (CMC)	kg
m_p	Massa da partícula	kg
m_t	Massa total	kg
m_w	Massa de água	kg
m_α	Massa de substância qualquer	kg
P	Pressão	Pa
Q	Vazão mássica	Kg/m^3
R^2	Coeficiente de regressão linear	-
Re	Número de Reynolds	-
T	Temperatura	$^\circ C$
\bar{V}	Velocidade média	m/s
\bar{x}	Média aritmética	-
z	Altura	m
<i>Letras gregas</i>		
α	Substância	-
μ	Viscosidade dinâmica	kg/ms
ρ	Massa específica	kg/m^3
P_s	Massa específica da solução	kg/m^2
ν	Viscosidade cinemática	Pa.s
η	Viscosidade aparente	Pa.s
θ	Ângulo de deflexão	$^\circ$

$\dot{\gamma}$	Taxa de cisalhamento	s^{-1}
τ	Tensão de cisalhamento	Pa
τ_0	Tensão limite de escoamento	Pa

SUMÁRIO

1	Introdução	18
1.1	Caracterização do problema	24
1.2	Objetivos gerais	26
1.3	Objetivos específicos	26
1.4	Revisão da literatura.....	27
1.5	Justificativas	33
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	35
2.1	Fluidos newtonianos	35
2.2	Fluidos não newtonianos	36
2.2.1	Fluidos newtonianos generalizados	37
2.2.2	Ajustes reológicos para fluidos não newtonianos.....	39
2.3	Número de Reynolds (Re)	40
2.4	Concentração mássica	43
2.5	Padrões de escoamento particulado.....	44
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
3.1	Aparato experimental	46
3.1.1	Circuito hidráulico.....	46
3.1.2	Seção de testes	49
3.2	Componentes do aparato experimental.....	52
3.3	Procedimentos experimentais	59
3.4	Aditivos poliméricos.....	67
3.5	Aditivos particulados.....	67
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	70
4.1	Aferição dos equipamentos de medição	70
4.2	Testes preliminares de granulometria	74
4.3	Reologia das formulações	77
4.4	Parâmetros de variação.....	86
4.5	Teste padrão.....	87
4.6	Influência do tipo de fluido.....	90
4.7	Influência da concentração de CBP	91
4.8	Influência da concentração de LCM	93
4.9	Influência da granulometria do LCM	95
4.10	Influência do número de Reynolds.....	97
5	Conclusões.....	100
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	102
	Referências	103

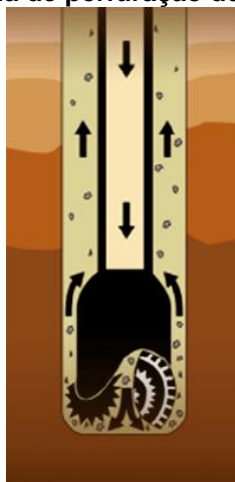
APÊNDICE A – DADOS DE MEDIÇÃO REALIZADA COM O VISCOSÍMETRO ROTACIONAL FANN 35 A PARA A OBTENÇÃO DAS CURVAS DE ESCOAMENTO.....	107
APÊNDICE B – PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO.....	117
APÊNDICE C – DIAGRAMA DE BLOCOS.....	123
ANEXO A – PROPRIEDADES FÍSICAS DA MISTURA ÁGUA – GLICERINA.	125
ANEXO B – CURVA CARACTERÍSTICA DA BOMBA NETZSCH	128

1 Introdução

A indústria de exploração de petróleo busca continuamente o desenvolvimento de novas tecnologias para o aperfeiçoamento das práticas e metodologias empregadas, a fim de aumentar eficiência, produtividade e segurança. Em especial no Brasil, que vem sendo contemplado com cenários altamente desafiadores, devido as recentes descobertas do pré-sal na costa do país. Dados do IBP – Instituto Brasileiro de Petróleo (2018) indicam que os investimentos na indústria brasileira nos próximos 10 anos, aproximadamente US\$ 670 bilhões, irão alavancar a produção que ultrapassará a marca de 5,5 milhões de barris por dia (bpd). Uma melhora significativa se comparado ao patamar mensurado em agosto de 2018 que chegou a marca recorde, ao momento, de 2,6 milhões de bpd.

Uma das principais fases que decorre de um processo de exploração de petróleo é a perfuração. A perfuração consiste no movimento de rotação de uma broca que comprime e esmerilha a rocha gerando uma grande quantidade de fragmentos denominados cascalhos (Figura 1). Durante o processo de perfuração, o fluido é injetado por bombeamento para o interior da coluna de perfuração através da cabeça de injeção, ou *swivel*, e retorna à superfície através do espaço anular formado pelas paredes do poço e a coluna de perfuração (GROWCOCK, 2005).

Figura 1 - Esquema de perfuração de poço de petróleo.



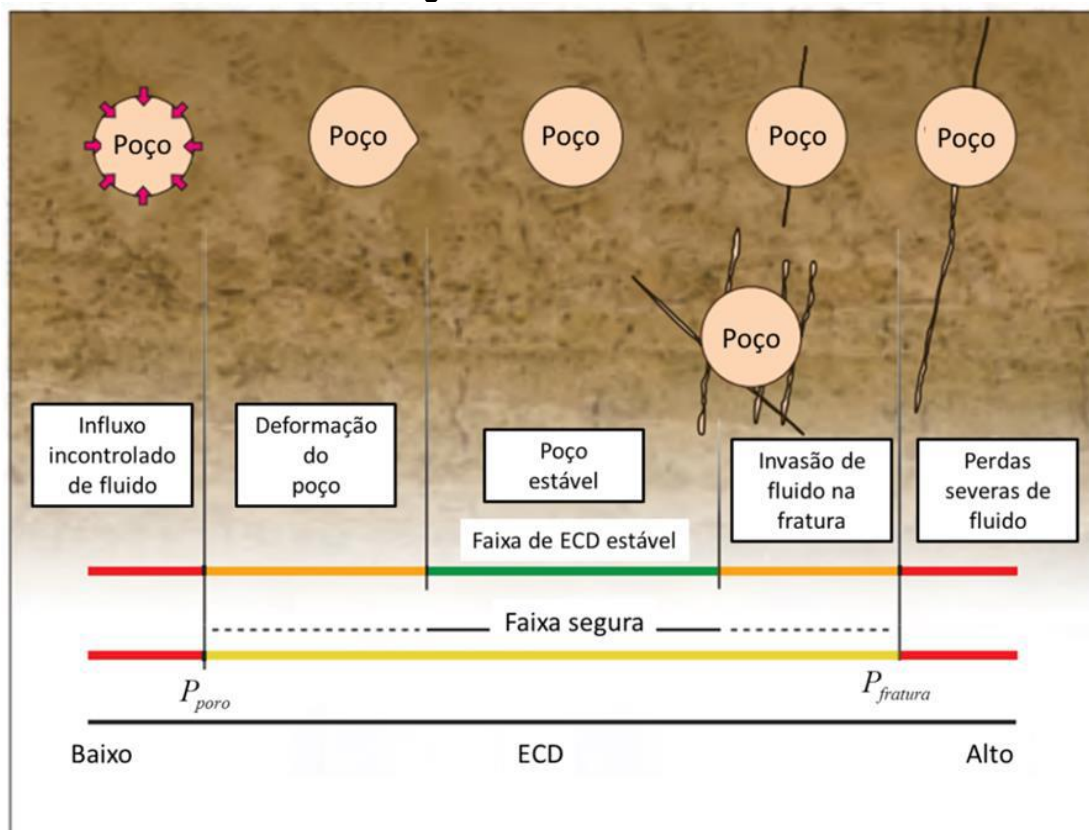
Fonte: Rigzone, 2018.

Nestas operações de perfuração é fundamental estimar a perda de carga no espaço anular dos poços. As estimativas fornecem dados importantes para controlar

as pressões da formação e otimizar o processo hidráulico de perfuração, bem como, seleção do fluido de perfuração adequado. Muitos problemas podem surgir, em um processo de perfuração decorrentes da perda de carga no espaço anular do poço os quais podem levar a completa paralisação da operação de perfuração e até mesmo o abandono completo do poço, gerando assim uma perda monetária significativa (AUSTIN, 1983).

A determinação da perda de carga é uma parte crítica da hidráulica de poços devido à influência na densidade de circulação equivalente (*equivalent circulating density - ECD*). A perda de carga no espaço anular durante a perfuração dos poços acarreta num aumento da *ECD*, sendo que a fonte principal da pressão hidrostática em um poço é a densidade do fluido de perfuração (DEMIRDAL et al., 2007), a qual deve ser mantida dentro de uma faixa segura de operação, contida entre a pressão de poro da formação e a pressão que inicia a geração de fraturas na parede do poço (COOK et al., 2012). Na Figura 2 pode-se observar as faixas da *ECD* que correspondem a um processo seguro e os limites inferior e superior de *ECD* que caracterizam respectivamente influxos incontroláveis e invasões severas de fluidos.

Figura 2 - Faixas de ECD



Fonte: Obrzut, (2015), adaptado de Cook et al. (2012).

Portanto, a determinação e formulação correta do fluido de perfuração pode evitar a ocorrência dos problemas mais recorrentes neste processo (e.g., perda de circulação, tubulação obstruída, *kicking*, penetração deficiente).

O fluido de perfuração é composto de uma fase fluida e de vários materiais que são adicionados para transmitir ou controlar propriedades necessárias, além de sólidos contaminantes (AUSTIN, 1989). As principais propriedades mensuráveis do fluido de perfuração são massa específica, viscosidade, perda de água, força do gel, pH, resistividade e abrasividade. Essas propriedades dependem do tamanho, forma, número, dureza e composição dos materiais sólidos e características químicas da interface do poço que estará em contato com o fluido.

Os fluidos de perfuração devem desempenhar certas funções primordiais para assegurar que a perfuração ocorra da maneira mais segura possível sem que a estrutura do poço e broca utilizada sejam comprometidos:

- Remoção contínua dos cascalhos do fundo do poço para que a broca possa perfurar em uma superfície limpa com menos atrito e maior eficiência;
- Transporte dos cascalhos até a superfície do poço para que possam ser removidos do fluido de perfuração;
- Suspender os cascalhos no poço sempre que surgir a necessidade de uma parada no processo;
- Resfriar, lubrificar e remover os cascalhos da extremidade da broca;
- Exercer pressão hidrostática suficiente para evitar que fluidos presentes na formação rochosa do poço adentrem (invadam) a região anular;
- Manter o poço estável, evitando a possibilidade de colapso, para que o processo possa ser parado e continuado a qualquer momento durante a operação de perfuração.

Um dos fenômenos mais recorrentes nos campos de produção brasileiros, decorrentes das altas pressões, que elevam a *ECD*, na região anular do poço é a invasão do fluido de perfuração para o interior da formação, caracterizando a perda de circulação (LAVROV, 2016).

Este fenômeno afeta de forma negativa a vazão de fluido que retorna à superfície do poço, dificultando a remoção de cascalhos e a refrigeração adequada

da extremidade da broca. Muitas vezes essas operações de perfuração precisam ser interrompidas para realização de manutenção aumentando o tempo não produtivo do poço (*nonproductive time* - NPT), gerando atrasos na produção e perda de capital no processo.

A intensidade com que o fenômeno da perda de circulação ocorre é usualmente utilizada para classificá-lo com base na vazão volumétrica perdida à formação geológica e o tipo de fluido de perfuração utilizado (NELSON, 2006). A classificação é apresentada na Tabela 1, sendo o tipo de perda de circulação também relacionada com a formação mais propensa a apresentar tal problema (ALMAGRO et al., 2014; LAVROV, 2016). Como pode ser observado, a severidade da perda de circulação é mais crítica para os fluidos a base de água e pode ser denominada como perda severa em meios muito permeáveis.

Tabela 1 - Classificação da perda de circulação em função do tipo de fluido e 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 Nelson, 2006 e Lavrov, 2016.

Quando a perda de carga no espaço anular do poço é excessiva, provocada pelo excesso de pressão hidrostática, ou alta velocidade de deslocamento da coluna de perfuração, pode ocasionar a perda de circulação induzida (ADAMS, 1980). Além do mais, se houver, no poço, uma formação permeável cuja pressão se torne maior que a pressão hidrostática do espaço anular, o fluido contido nesta formação invadirá o poço, ocasionando um kick. Uma situação potencialmente perigosa ocorre quando

a perda de circulação se dá em uma formação profunda (BELÉM, 2008). Diferentes métodos podem ser utilizados para atenuar ou prevenir a perda de circulação, como pode ser observado na Figura 3. As medidas tomadas dependem do tipo de formação rochosa e das causas dessas perdas. Os métodos preventivos incluem melhores práticas de perfuração, a seleção do fluido de perfuração e a adição de materiais para o fortalecimento do poço com o objetivo de evitar a perda de circulação. Porém, vale destacar que nem sempre as medidas preventivas são suficientes para mitigar a fuga de fluido. Então, medidas corretivas necessitam ser aplicadas (KUMAR, 2010).

Em situações na qual este fenômeno está ocorrendo, i.e., as medidas preventivas não foram suficientes para evitar o problema, um método corretivo muito empregado é a utilização de aditivos particulados junto ao fluido de perfuração. Estes aditivos são denominados materiais de perda de circulação (*lost circulation materials* – LCM) (ALMAGRO et al., 2014). Os LCM's têm por função primordial impedir que o fluido continue sendo perdido para a formação, seja por poros ou fraturas (SUYAN et al., 2007).

Figura 3 - Métodos de correção e prevenção de perda de circulação.



Fonte: Adaptado de Cook et al., 2012.

Conforme indica Lavrov (2016), os LCM's podem ser classificados de acordo com a composição ou forma geométrica (e.g. granulares, em formato de flocos, fibras, combinações de diferentes tipos de partículas), a Tabela 2 apresenta uma série de exemplos de particulados utilizados no combate a perda de circulação.

Tabela 2 - Classificação de material particulado LCM de acordo com forma e características.

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

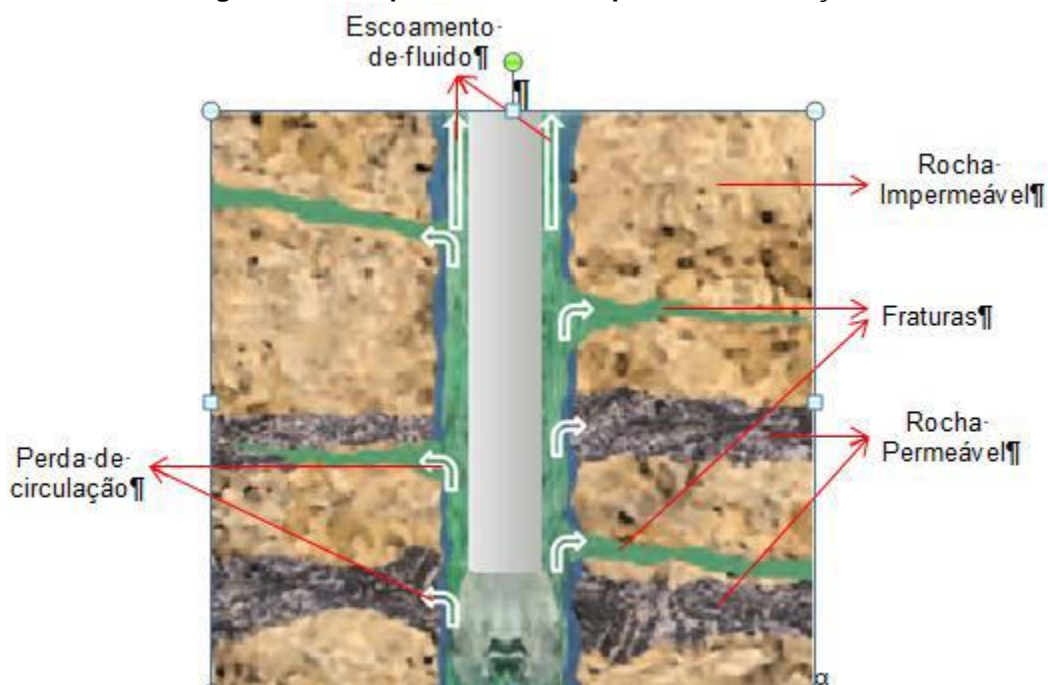
Fonte: Adaptado de Alsaba e Nygaard, 2014.

Estudos de Bernt e Reza (2011) indicam que de 10% a 20% do tempo total do processo de perfuração é consumido por medidas preventivas ou corretivas. Além disso, Lavrov (2016) estima que atualmente entre 10 e 40% dos custos da perfuração estão diretamente associados ao fluido de perfuração. Portanto, ressalta-se a importância de estudar os fenômenos que decorrem da interação destes tipos de materiais particulados com os fluidos de perfuração. Quaisquer avanços científicos que se possam obter a respeito dessas interações permitirão ações mais eficazes demandando menos tempo e recursos financeiros.

1.1 Caracterização do problema

Na Figura 4 pode ser visualizado um exemplo de perfuração direta, em um poço, no qual a formação rochosa possui diversas zonas de perda de circulação por onde o fluido de perfuração se evade. Nestes casos, como mencionado anteriormente na Seção 1, o método corretivo de injeção de partículas é necessário para evitar que as perdas se agravem e acabem por danificar a integridade do poço, ou dos componentes mecânicos (e.g. broca, coluna de perfuração).

Figura 4 - Exemplos de zonas de perda de circulação.

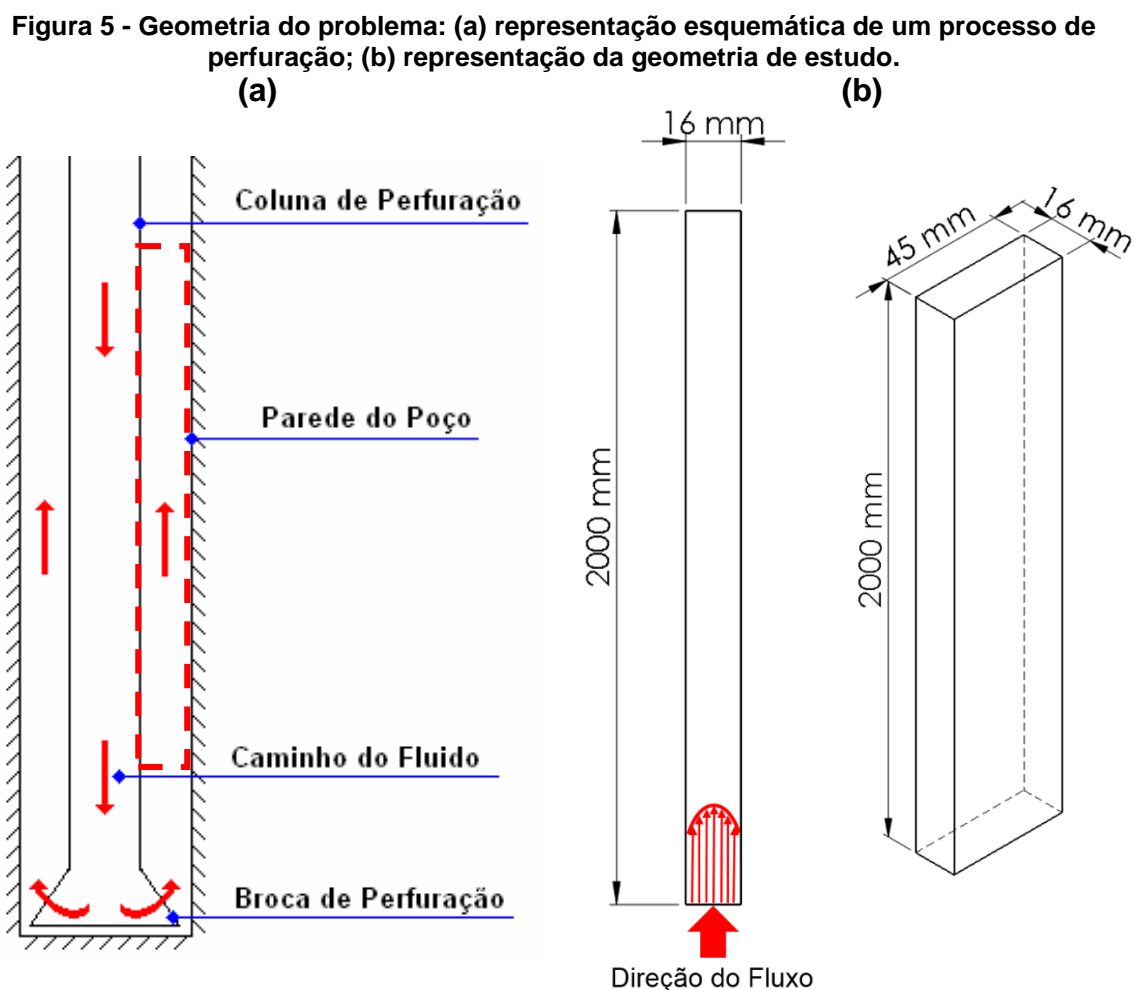


Fonte: Adaptado de Cook et al., 2012.

O presente trabalho é caracterizado por um aparato experimental, com uma seção de teste vertical, que tem a função de simular o espaço anular de um poço impermeável de modo que possibilite o escoamento vertical ascendente pela seção a qual será monitorada a perda de carga gerada por partículas sólidas em escoamento junto ao fluido. Considerando que o principal foco do presente trabalho é investigar o comportamento e características da interação de LCM's e fluidos de perfuração, ressalta-se outra simplificação em relação ao caminho percorrido pelo fluido. A região interna da broca pela qual o fluido é injetado será desconsiderada. A perda de circulação, que pode acontecer pela presença de poros na formação ou presença de fraturas, conforme exposto no contexto do problema, não será considerada como

objetivo de estudo no presente trabalho, portanto a seção de testes não possui nenhuma fratura.

A representação esquemática da geometria utilizada nas análises do presente trabalho pode ser observada na Figura 5, em que o retângulo com linha tracejada configura a região de interesse do problema em (a), e as dimensões da geometria do canal que representa o espaço anular do poço em (b).



Fonte: Elaboração própria.

Os fluidos de perfuração podem apresentar diversas características e funções como comentado anteriormente, e possuem uma variedade muito abrangente de composição. No presente trabalho serão analisadas duas classes de fluidos representando os fluidos de perfuração. Dos tipos utilizados, um apresenta comportamento não newtoniano, viscoplástico representado por uma mistura de gel comercial (carbopol) com água. O outro fluido será newtoniano, para realização de

comparações com relação as características de viscosidade, representado pela mistura de água e glicerina. As principais particularidades de cada tipo de fluido estão dispostas no Capítulo 2 deste trabalho.

Diante da grande variedade de tipos disponíveis de LCM que podem ser utilizados neste tipo de abordagem, optou-se por três granulometrias distintas do mesmo abrasivo plástico Urea, de formato não uniforme, que serão utilizados em conjunto com o fluido, caracterizando um escoamento bifásico líquido-sólido.

Com o escopo apresentado, a janela de oportunidade para este trabalho é a análise experimental da perda de carga gerada pela adição de diferentes tipos de material particulado, em conjunto com fluidos não newtonianos, no escoamento vertical. A importância do estudo, deve-se ao fato, da necessidade de manter o controle das pressões no processo de perfuração, sempre dentro das faixas seguras da janela operacional, eliminando os riscos de ocorrências de fraturas induzidas na formação.

1.2 Objetivos gerais

O objetivo do trabalho é a análise, com base em experimentos realizado em laboratório, da influência gerada por LCM's na perda de carga em um escoamento de fluido não newtoniano. A principal variável resposta do problema será a pressão gerada por diferentes combinações fluido-partícula.

Os parâmetros de interesse que serão analisados são: número de Reynolds do canal, tipo de fluido (newtoniano, viscoplástico), concentração de aditivos no fluido (glicerina, gel comercial), diâmetro e concentração mássica de partículas.

1.3 Objetivos específicos

Com base nos objetivos gerais, Seção 1.2, e na caracterização do problema Seção 1.1, pode-se destacar como objetivos específicos os seguintes tópicos:

- 1) Desenvolver um sistema adequado para os procedimentos experimentais realizados no LaMP;
- 2) Definir as concentrações de material polimérico e particulado para realização dos experimentos;

- 3) Desenvolver um procedimento para o preparo dos fluidos não newtonianos e para a adição dos LCM's;
- 4) Desenvolver uma metodologia para a obtenção das curvas de escoamento das formulações dos fluidos;
- 5) Identificar as variáveis resposta e desenvolver uma metodologia de medição e obtenção;
- 6) Desenvolver programas, utilizando diagramas de blocos, capaz de receber e gravar as informações a respeito das variáveis resposta;
- 7) Desenvolver um procedimento operacional padrão (P.O.P) para a utilização segura do aparato experimental na realização dos experimentos;
- 8) Realizar a aferição dos equipamentos de medição (e.g. medidor de vazão, transdutores de pressão);
- 9) Produzir um quadro de ensaios experimentais, contemplando a variação dos parâmetros de interesse;
- 10) Realizar o correto armazenamento e posterior descarte dos fluidos formulados para os testes experimentais.

1.4 Revisão da literatura

Nesta seção serão mencionados e comentados os trabalhos que embasam ou que têm, de alguma forma, relação com os temas abordados nesse trabalho de conclusão de curso, os quais são: formulação de fluidos não-newtonianos, escoamento vertical, escoamento particulado, perfuração de poços de petróleo e perda de carga.

Uma ampla gama de autores tem investigado o comportamento do escoamento de fluidos não-newtonianos e contribuído significativamente com o acervo de informações e técnicas empregadas na formulação de soluções para problemas que envolvem este assunto. Bird e Fredrickson (1958) são um dos pesquisadores pioneiros em estudos de escoamento utilizando fluidos não-newtonianos. Os estudos dos autores foram realizados em seções de testes de geometria anular. Uma das contribuições do trabalho foi uma expressão analítica utilizada na determinação da perda de carga causada pelo atrito do anular para fluidos caracterizados pelo modelo

de lei de potência. Obtiveram resultados satisfatórios para os casos em que a razão dos raios interno e externo, do anular, for maior que 0,5.

Kozicki, Chou e Tiu (1966) determinaram a relação entre a velocidade máxima e a perda de carga para fluidos representados pelo modelo de lei de potência escoando em ductos de seção transversal arbitrária em condições de regime laminar. Os autores introduziram duas constantes geométricas as quais são funções da razão dos raios interno e externo.

Os estudos de Jensen e Sharma (1987), os quais utilizaram um conjunto de definições equivalentes e diferentes correlações para o cálculo do fator de atrito, comparados com dados experimentais mostraram que a melhor combinação de diâmetro equivalente e fator de atrito para fluidos do modelo de plástico de Bingham é o diâmetro hidráulico e a correlação obtida por Chen (1984), enquanto que para os fluidos do modelo de lei de potência nenhuma das correlações mostraram-se de acordo com os dados experimentais.

Metzner e Reed (1956) tiveram uma grande contribuição para o tema relacionados a escoamento de fluidos pois, obtiveram uma equação generalizada que possibilita o cálculo do número de Reynolds (Re) para fluidos com ambos comportamentos newtonianos e não-newtonianos. O trabalho dos autores baseou-se em conceitos desenvolvidos inicialmente por Rabinowitsch (1929), que estabeleceu que para regime laminar de escoamento ao redor de um tubo, com qualquer fluido com taxa de cisalhamento, que é uma função apenas da tensão de cisalhamento, a relação entre a tensão de cisalhamento e a parede do tubo $D\Delta P/4L$ e a quantidade $8V/D$ é única. Consequentemente as características de escoamento do fluido são definidas apenas por essa relação laminar.

Dodge e Metzner (1958) utilizaram a definição anterior para encontrar uma correlação entre o fator de atrito e o número de Reynolds generalizado, para escoamentos turbulentos de fluidos não newtonianos representados pelo modelo de lei de potência. Este estudo foi pioneiro, na parte teórica, e possibilitou o desenvolvimento de novos conceitos na relação entre a perda de carga e a taxa de vazão mássica baseando-se apenas nas propriedades principais do fluido de trabalho. O trabalho dos autores teve grande importância pela possibilidade de prever o perfil de velocidades turbulento para fluidos não newtonianos, quando antes não havia publicações na literatura.

Ainda sobre a questão do fator de atrito, Moises e Shah (2000) propuseram novas correlações utilizando-se de dados experimentais. Os autores investigaram a redução do arrasto em escoamento anular de fluidos de perfuração representados pelo modelo de lei de potência.

Mais tarde, Merlo, Maglione e Piatti (1995) propuseram um modelo para determinar a perda de carga para fluidos modelados pela lei de potência escoando em tubulações e anulares. Os resultados obtidos, para as perdas de carga calculadas pelo modelo, apresentaram concordância com dados experimentais. O modelo proposto pode ser utilizado para fluidos de perfuração com comportamentos de plástico de Bingham e lei de potência, e proporciona resultados satisfatórios para ambas as condições de escoamento laminar ou turbulento.

Demirdal (2001) comparou teoricamente a perda de carga gerada pelo atrito utilizando dados experimentais e as abordagens reológicas referentes a plástico de Bingham, lei de potência além de diferentes formulações para o diâmetro hidráulico. A análise evidenciou que as perdas de cargas calculadas se encontraram muito acima dos valores medidos nas condições de escoamento laminar e turbulento.

Nae-Hyun kim et al. (1995) Investigou, além da perda de carga, a taxa de transferência de calor e características da ocorrência de incrustação no escoamento vertical particulado ascendente. O fluido de trabalho, newtoniano, dos experimentos foi a água. Neste estudo os autores utilizaram partículas de vidro de 3 mm de diâmetro e massa específica de 2,54 kg/m³. Os resultados obtidos revelaram que as partículas aumentaram a taxa de transferência de calor para velocidades de escoamento menores que 1,0 m/s. Houve um acréscimo também à perda de carga para esta mesma faixa de velocidades. Acima de 1,0 m/s, entretanto, o coeficiente de transferência de calor e a perda de carga foram praticamente as mesmas do escoamento com água pura. Testes de incrustação utilizando óxido ferrítico demonstraram que o particulado efetivamente removeu o depósito pré-existente, bem como preveniram a formação de novo depósito.

Eshghinejadfard, Sharma e Thévenin (2017) publicaram trabalho no qual investigam o efeito da adição de aditivos poliméricos e fibrosos na perda de carga no escoamento em canal retangular. Os testes foram conduzidos para uma grande série de concentrações (10 partes por milhão (ppm) até 500 ppm) e diferentes números de Reynolds (16000-36000), caracterizando regime turbulento de escoamento, com dois

polímeros e quatro fibras rígidas usados como aditivos. Os agentes são chamados DRA (*drag-reducing agents*) e tem a finalidade de diminuir o atrito no escoamento. Uma redução máxima no arrasto de 22% foi observada para a goma xantana. Contudo, a goma xantana perde rapidamente essa propriedade (ocorre rápida degradação). A porcentagem de redução de arrasto para a goma xantana permanece quase inalterável conforme o aumento do número de Reynolds. Os autores relatam que, fundamentados pelos estudos de Toms (1948), introduzindo alguns ppm de polímeros reduzem o atrito na superfície. Os DRA levam a um aumento da vazão para uma mesma pressão. Os autores relatam que a redução de atrito ($DR = \text{Drag reduction}$) é esperada que aconteça apenas para além de um certo número de Reynolds para uma certa concentração. Apontam ainda que, em muitos casos, tanto em regimes densos ou diluídos, a perda de carga aumenta após a adição de partículas rígidas. Esse efeito é altamente dependente do formato da partícula em questão, número de Stokes (St) e da fração volumétrica da fase sólida (ϕ). Por essa razão torna-se muito importante reconhecer as condições que levam a cada uma das situações mencionadas e entender os efeitos dos diferentes aditivos no aumento ou diminuição da perda de carga.

Vongvuthipornchai e Raghavan (1987) analisam a perda de carga em poços verticais fraturados e não-fraturados com relação a adição de fluidos não-newtonianos representados pelo modelo de lei de potência. Respostas em relação a pressões de escoamento e de fechamento foram obtidas para fluidos com índice de lei de potência compreendidos entre 0,1-0,9 e 0,2-0,9, respectivamente. Os autores notaram que precisariam adotar correções nas expressões obtidas por Odeh (1979) para examinar a queda de pressão, no qual o fluido utilizado possui um índice de lei de potência n menor ou igual a 0,6. Os resultados são expressos em gráficos em escala logarítmica que relacionam a pressão do poço com o tempo de injeção. A equação utilizada para estimar a pressão do poço é a linearização adimensional da equação diferencial parcial obtida por Odeh e Yang (1979).

Com os avanços tecnológicos na área da fluidodinâmica computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) muitos autores vêm estudando e desenvolvendo novos métodos de análise dos escoamentos particulados que nos permitem tirar informações mais próximas à realidade.

De Lai (2013) realizou uma análise numérica do escoamento líquido-sólido em um canal retangular o qual representou uma fratura discreta. A simplificação do problema consistiu no processo de perfuração vertical, cujo poço perfurado atravessa o plano de fratura de forma perpendicular. O escoamento líquido-sólido é representado por uma abordagem lagrangiana, através da solução acoplada das fases discreta (partículas) e contínua (fluido), provenientes da combinação dos modelos *Dense Discrete Phase Model* (DDPM) e *Discrete Element Method* (DEM), disponíveis no programa ANSYS FLUENT. O autor avaliou, a influência dos parâmetros de injeção de material particulado (e.g., concentração, diâmetro da partícula e razão de massa específica fluido-partícula) e regime de escoamento do canal fraturado (e.g., vazão de entrada do canal e vazão de fuga de fluido pela fratura).

Celigueta et al. (2015) apresenta um procedimento para acoplar o método de elementos finitos (FEM) e o método dos elementos discretos (DEM) para analisar o movimento das partículas em fluidos não newtonianos. Um novo método é apresentado para computar a força de arrasto da partícula. O autor relata que se tratando de fluidos não newtonianos pode-se adotar diferentes abordagens, dependendo do tipo de fluido, para computar essas forças. O autor utiliza o método de Shah (2007) para a determinação da velocidade terminal das partículas em um fluido com comportamento representado pelo modelo Herschel-Bulkley utilizando o modelo de lei de potência para a caracterização da viscosidade (não-linear). O número de Reynolds é obtido pelo parâmetro adimensional Si , proposto por Shah (2007). E a força de arrasto é calculada utilizando uma lei de força de arrasto linear que depende de propriedades da partícula tais como: massa específica, área superficial e velocidade relativa da partícula em relação ao fluido. Para adicionar o efeito relativo à esfericidade da partícula os autores propõem uma modificação no parâmetro adimensional de Shah utilizando-se de expressões propostas por Chien (1994). As simulações foram realizadas com partículas de 4,96 mm de diâmetro e esfericidade de 0,76766 e densidade de 2000 kg/m³. Os dados experimentais apresentados, para efeito de comparação, foram obtidos com partículas mais leves.

Calçada et al. (2015) estudaram o escoamento através de fraturas de dimensões definidas, utilizando como fluido de trabalho água pura, soluções de polímeros em água e diferentes tipos de calcários suspensos como material particulado comumente empregados como material de perda de circulação. Nos casos

em que o devido preenchimento e selamento da fratura não ocorre, os autores determinam a perda de carga na seção de teste em função da vazão do escoamento.

Stahlke e Fritoli (2014) desenvolveram um projeto de construção e montagem de um aparato experimental que serve para a realização de estudos experimentais relacionados a escoamentos particulados. Os autores efetuaram a devida instrumentação da bancada de trabalho e calibração dos instrumentos de medição. A seção de teste foi produzida com perfil retangular com comprimento definido tomando como base o estudo do comprimento necessário para o pleno desenvolvimento do escoamento. Testes preliminares foram realizados para a obtenção da perda de carga, em escoamento com água como fluido de trabalho, pela adição de partículas de geometria selecionada.

Schneider (2016), com o propósito de estudar o fenômeno de perda de circulação, utilizou o aparato experimental concebido por Stahlke e Fritoli (2014) empregando uma fratura discreta perpendicular à seção de testes. Foi avaliada a influência da fratura na invasão de fluido variando parâmetros geométricos da mesma, como: comprimento, largura e espessura. Os fluidos de trabalho utilizados nos testes foram a água e outras cinco diferentes concentrações de mistura água-glicerina. Foram realizados, primeiramente, testes preliminares. Testes reométricos nas soluções de água-glicerina afim de obter a viscosidade dos fluidos, e assim utilizar os valores tabelados encontrados em Dorsey (1940) para determinação da concentração de glicerina em água. Monitorando a pressão relativa na entrada da seção de testes, foi constatado que para um aumento de 10% na concentração de glicerina em água há um aumento de 3% na pressão relativa medida naquele ponto. Testes preliminares de vazão revelaram um comportamento linear na variação do gradiente de pressão com relação ao aumento da concentração de glicerina. Ainda com relação aos testes de vazão, como o escopo do estudo era trabalhar em uma faixa laminar para número de Reynolds, ficou evidente a necessidade de aumentar a concentração de glicerina para a obtenção de números de Reynolds mais baixos.

Obrzut (2015), analisou experimentalmente, utilizando o aparato de Stahlke e Fritoli (2014), com alterações efetuadas por Schneider, o processo de preenchimento de um canal fraturado através da adição de material particulado. A geometria poço-formação foi simplificada. A fratura encontrou-se em um único plano horizontal e o problema pôde ser considerado como simétrico em relação ao centro da coluna de

perfuração. O escoamento através do interior da coluna foi desconsiderado, uma vez que foi analisado apenas o escoamento ascendente no espaço anular e na fratura, que foi considerada como discreta. O autor apresentou um estudo sobre a influência da concentração de material particulado, em escoamento vertical disperso. Foi realizado o monitoramento das pressões geradas pela adição dos sólidos em diferentes condições de operações. Soluções de água com quatro diferentes concentrações de glicerina foram utilizadas como fluido de trabalho. As partículas utilizadas como fase dispersa foram fabricadas em UREA (Solidstrip, 2006) e possuem uma faixa de diâmetro variando entre 0,76 a 1,19 mm. A massa específica da UREA pode variar de 1,5 a 1,6 g/cm³. Testes com 1 e 2% de partículas foram realizados para uma mesma concentração de glicerina em água. O aumento da concentração de partículas gerou um aumento no gradiente de pressão ao longo da seção de testes. O autor verificou ainda que utilizando uma concentração mais baixa de glicerina em água, e uma porcentagem mais alta de particulado, a concentração de glicerina na solução afeta de forma mais significativa o gradiente de pressão na seção de testes.

A partir dos trabalhos revisados, percebe-se a importância de avançar nos estudos referentes aos fluidos não newtonianos. Muito presentes na indústria petroquímica, carecem de informações que dizem respeito a interação com materiais particulados e a influência destes em escoamentos verticais ascendentes.

Com base nos trabalhos experimentais de Stahlke e Fritoli, Schneider e Obrzut, realizados no LaMP (Laboratório de Meios Porosos) da UTFPR-CT, foi realizado todo projeto de modificação e instrumentação necessária, do aparato experimental, para a realização deste trabalho.

1.5 Justificativas

Quando olhamos para a indústria do petróleo não existe razão para duvidar da importância econômica desta indústria para o Brasil. Projeta-se que no período de 2018-2022 a produção nacional cresça ainda mais. Ao todo, a produção total de óleo e gás da companhia é estimada em 3,4 milhões de barris diários de óleo equivalente (BOE/dia), no Brasil, em 2022. Se somadas também as operações no exterior, esse volume atingirá 3,5 milhões de BOE/dia. A estatal prevê intensificar o ritmo das atividades de exploração nos próximos anos. O novo plano de negócios da empresa

prevê uma perfuração média de 29 poços por ano entre 2018-2022, praticamente o dobro do patamar do biênio 2016-2017 (VALOR, 2016).

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

A perda de circulação que ocorrem nos poços acarretam um prejuízo muito grande para as companhias de exploração. Perde-se fluido de perfuração para as formações rochosas, que não serão recuperados posteriormente, além de prejudicar o tempo de produção, tendo que para a produção para correções emergenciais de tamponamento de fraturas. Com isso, perde-se muito do tempo produtivo. Estudo de caso para a empresa Hart Energy estimou que os custos ocasionados pela perda de circulação chegam a U\$800 milhões por ano, enquanto o custo de materiais para combater a perda de circulação através da adição de materiais para perda de circulação (LCM) ao fluido de perfuração chega à U\$200 milhões por ano (IVAN e BRUTON, 2005).

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

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente trabalho aborda uma grande gama de conceitos na área da engenharia mecânica, mais precisamente os fenômenos de transporte, porquanto nesta seção são apresentados, sucintamente, os primordiais para a realização dos testes experimentais bem como análise de dados, em cada subdivisão do capítulo.

2.1 Fluidos newtonianos

Sólidos e fluidos, ideais, possuem características distintas. Quando submetido a uma tensão, o sólido deforma-se ou ‘dobra’ e quando se trata de um fluido diz-se que o fluido escoar, ou flui (FOX et al., 2007). A viscosidade é um dos parâmetros mais importantes quando se trabalha com fluidos de qualquer natureza. Esta importância se dá ao fato de que a viscosidade define a facilidade, ou dificuldade, de movimentar fluidos originalmente em repouso e é expressa pela Equação (1):

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}_{\alpha\beta}} \quad (1)$$

sendo, μ a viscosidade absoluta do fluido [Pa.s], τ a tensão de cisalhamento [Pa] e $\dot{\gamma}_{\alpha\beta}$ a taxa de deformação [1/s], expressa pela Equação (2)

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial u_{\alpha}}{\partial x_{\beta}} + \frac{\partial u_{\beta}}{\partial x_{\alpha}} \quad (2)$$

sendo, u a componente de velocidade do fluido, α a direção normal ao plano de tensão ou deformação e β a direção da força responsável pela tensão.

Em suma, esta é uma propriedade que representa a resistência interna do fluido ao movimento (ÇENGEL et al., 2008). Os fluidos podem ser classificados, em newtoniano e não newtoniano, de acordo com o comportamento viscoso que apresentam quando submetidos a taxas de deformação. De modo genérico, os fluidos newtonianos são fluidos em que, para uma mesma medida de temperatura e pressão, possuem relação linear entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação. Além

dessa definição simplista, Barnes (1989) define uma série de condições para que um fluido seja considerado newtoniano:

- i. Única tensão gerada sob cisalhamento é a tensão de cisalhamento, ou seja, as diferenças de tensões normais são nulas;
- ii. A viscosidade não varia com a taxa de deformação;
- iii. A viscosidade é constante com relação ao tempo de cisalhamento e a tensão de cisalhamento se torna imediatamente nula quando o escoamento é interrompido. Em qualquer escoamento subsequente, não importando quão longo seja o tempo de repouso entre as duas medições, a viscosidade assume o mesmo valor que na medição anterior;
- iv. As viscosidades dinâmica e extensional estão sempre em proporção direta uma com a outra. Por exemplo, a viscosidade medida em um escoamento extensional uniaxial será sempre três vezes maior do que aquela medida em escoamento de cisalhamento puro.

2.2 Fluidos não newtonianos

Segundo Barnes (1989), qualquer desvio do comportamento de um fluido newtoniano caracteriza o material como sendo não newtoniano. Os fluidos não newtonianos podem ser divididos em três classes:

- Fluidos newtonianos generalizados (independentes do tempo): fluidos nos quais a taxa de deformação em qualquer ponto é determinada somente pelo valor da tensão naquele ponto e instante;
- Fluidos dependente do tempo: aqueles nos quais o histórico de cisalhamento do fluido influencia a relação entre a tensão e taxa de deformação;
- Fluidos viscoelásticos: que apresentam simultaneamente características de um sólido elástico e de um fluido puramente viscoso.

Destaca-se que poderá ocorrer casos em que um mesmo material pode apresentar características mescladas (comportamento de fluido newtoniano generalizado, dependente do tempo e viscoelástico) já que as condições de classificação acima não são excludentes entre si. O presente trabalho se limite apenas

a análise de fluidos não newtonianos puramente viscosos que é o caso dos fluidos newtonianos generalizados.

2.2.1 Fluidos newtonianos generalizados

Também denominados como fluidos independentes do tempo, são caracterizados pela relação de dependência exclusiva entre a tensão de cisalhamento τ , Equação (3), e a taxa de deformação $\dot{\gamma}$, Equação (4). Isso significa que o histórico de cisalhamento do material não tem influência significativa no comportamento reológico do material. Contudo, é importante lembrar que os modelos de fluidos não newtonianos são apenas ajustes de resultados experimentais que buscam representar com o máximo de fidelidade o comportamento reológico dos fluidos. Isso significa que mesmos fluidos que são tradicionalmente classificados como fluidos newtonianos generalizados, como a solução de carbopol em água, sofrem influência do histórico de cisalhamento. Porém, no caso de fluidos classificados como newtonianos generalizados, essa influência pode ser desprezada por ser considerada insignificante quando comparada aos efeitos plásticos ou às variações da viscosidade com a taxa de deformação.

$$\tau = f(\tau_{yx}) \quad (3)$$

$$\dot{\gamma}_{yx} = f^{-1}(\dot{\gamma}_{yx}) \quad (4)$$

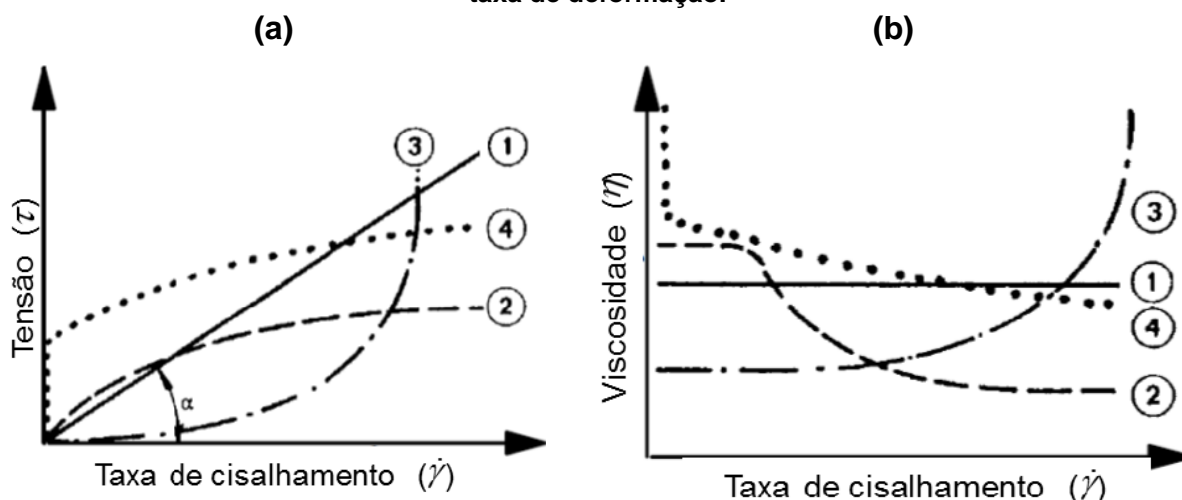
A forma da relação entre a taxa de deformação e tensão de cisalhamento, representadas pelas equações (3) e (4), diferencia o comportamento do fluido em estudo em três categorias:

- Fluidos pseudoplásticos;
- Fluidos viscoplásticos;
- Fluidos dilatantes.

Na Figura 6(a) são apresentados exemplos de curvas de tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação, para esses três tipos de fluidos não newtonianos, além da curva de viscosidade na Figura 6(b) típica de fluidos

newtonianos, representada por (1). Percebe-se que a inclinação da curva de tensão em função da taxa de deformação, que corresponde à viscosidade, é constante para fluidos newtonianos.

Figura 6 – Diagrama do comportamento típico de alguns fluidos puramente viscosos: (a) Tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação e (b) Viscosidade em função da taxa de deformação.



Fonte: Schramm, 2004.

As curvas indicadas por (2), na Figura 6, referem-se aos fluidos pseudoplásticos que são caracterizados pelo comportamento decrescente da viscosidade aparente com o aumento da taxa de deformação. Em outras palavras, esse tipo de material apresenta viscosidade elevada a baixas taxas de deformação e viscosidade baixa quando o fluido é submetido a altas taxas de deformação. Porém, é interessante notar que os fluidos pseudoplásticos, apesar de apresentarem um decaimento contínuo da viscosidade ao longo do espectro de taxas de deformação, possuem um patamar de viscosidades constantes quando se observa a curva de viscosidade em função da taxa de deformação. A baixas taxas de deformação a viscosidade assume o valor de viscosidade a taxas de deformação nulas ou primeiro patamar newtoniano.

Fluidos dilatantes, representados pelas curvas (3) na Figura 6, apresentam comportamento parecido com o dos fluidos pseudoplásticos no que diz respeito à ausência de tensão limite de escoamento. Porém, de forma contrária aos pseudoplásticos, a viscosidade aumenta com o incremento de taxas de deformação. Materiais dilatantes são bastante raros, e são tipicamente encontrados na forma de suspensões concentradas. Quando o fluido está em repouso, a porosidade da

suspensão é mínima e a fase líquida preenche completamente os espaços vazios. Sob taxas de deformação pequenas, a fase líquida atua como lubrificante entre as partículas sólidas em suspensão, minimizando o atrito sólido-sólido. Porém, quando o material é submetido a altas taxas de deformação, a mistura se dilata o suficiente para que a fase líquida não seja mais capaz de preencher os espaços vazios e evitar o atrito entre as partículas sólidas, o que gera tensões de cisalhamento maiores do que aquelas observadas a baixas taxas de deformação (DESHPANDE et al., 2010).

Os fluidos viscoplásticos, curvas (4), são caracterizados pela presença de uma tensão limite de escoamento, ou seja: quando a tensão de cisalhamento aplicada é inferior a essa tensão limite, o fluido idealmente apresenta taxa de deformação nula. O comportamento da viscosidade aparente dos fluidos viscoplásticos quando submetidos a tensões de cisalhamento superiores à tensão limite pode ser constante ou decrescente.

2.2.2 Ajustes reológicos para fluidos não newtonianos

Dentre os ajustes reológicos que descrevem o comportamento dos fluidos viscoplásticos, destacam-se os de Bingham e de Herschel-Bulkley. Bingham propôs um modelo no qual a viscosidade para tensões acima da tensão limite de escoamento é constante. Essa relação é amplamente utilizada na descrição do comportamento reológico de fluidos de perfuração e de outros materiais complexos, apesar de sua simplicidade. Em outras palavras, o material apresenta comportamento análogo ao de fluidos newtonianos quando submetido a tensões superiores à tensão limite. A Equação (5) demonstra a equação de ajuste pelo modelo de Bingham:

$$\begin{cases} \tau = \tau_0^B + \eta_B \dot{\gamma} & \text{para } |\tau| \geq |\tau_0^B| \\ \dot{\gamma} = 0 & \text{para } |\tau| < |\tau_0^B| \end{cases} \quad (5)$$

sendo o termo τ_0^B representa a tensão limite de escoamento de Bingham e η_B é a viscosidade aparente de Bingham.

Herschel e Bulkley propõem um modelo alternativo ao de Bingham, no qual o comportamento do material quando submetidos a tensões superiores à tensão limite se assemelha ao comportamento pseudoplástico aproximado como uma lei de

potências, conforme pode ser observado na Equação (6). Esse modelo é bastante utilizado atualmente para descrever o comportamento reológico de fluidos de perfuração, uma vez que considera o decaimento da viscosidade a taxas de deformação altas.

$$\begin{cases} \tau = \tau_0^{\text{HB}} + \eta_{\text{HB}} \dot{\gamma}^n & \text{para } |\tau| \geq |\tau_0^{\text{HB}}| \text{ e } 0 < n < 1 \\ \dot{\gamma} = 0 & \text{para } |\tau| < |\tau_0^{\text{HB}}| \end{cases} \quad (6)$$

sendo que o termo τ_0^{HB} representa a tensão limite de escoamento do modelo Herschel-Bulkley, o termo η_{HB} representa a viscosidade aparente do modelo e o expoente n é o índice de lei de potência. Em ambos os modelos, nas Equações (5) e (6), τ é a tensão de cisalhamento e $\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação do fluido.

2.3 Número de Reynolds (Re)

Um dos conceitos mais importantes em fenômenos de transporte é o número de Reynolds. Este parâmetro retrata a dependência principal para caracterizar um regime de escoamento, que é a relação entre efeitos inerciais e efeitos viscosos. Esta descoberta foi possível após exaustivos experimentos na década de 1880 realizados por Osborne Reynolds. O número de Reynolds (Re) é expresso como segue:

$$Re = \frac{\text{efeitos inerciais}}{\text{efeitos viscosos}} = \frac{V_{\text{méd}} D_H}{\nu} = \frac{\rho V_{\text{méd}} D_H}{\mu} \quad (7)$$

sendo $V_{\text{méd}}$ (m/s) a velocidade média do escoamento e D_H (m) o diâmetro hidráulico da seção. O número de Re é um número adimensional e segundo o valor deste número pode-se caracterizar os escoamentos, em regiões circulares em três categorias: laminar, transição e turbulência.

- Escoamento laminar ($Re < 2300$): ocorre para número Re pequeno, ou moderado, onde a velocidade do escoamento proporciona ao fluido pequenas flutuações. As forças viscosas são suficientemente grandes para conter estas flutuações e manter um alinhamento ordenado.

- Escoamento turbulento ($Re > 4000$): para Re grandes, as forças inerciais proporcionais à densidade do fluido e ao quadrado de sua velocidade, são grandes com relação as forças viscosas e, portanto, as forças viscosas não podem evitar as flutuações aleatórias e rápidas do fluido.
- Escoamento em transição ($2300 < Re < 4000$): neste caso o escoamento troca de laminar para turbulento de forma aleatória.

O escoamento laminar, por exemplo, pode ser mantido para números de Re muito altos em tubos muito suaves, evitando distúrbios no escoamento e vibrações no tubo. Nestes experimentos cuidadosamente controlados, o escoamento laminar tem se mantido para número de Reynolds de até 100.000 (ÇENGEL et al., 2008).

Para escoamentos através de ductos de seção não circulares, o número de Re se baseia no diâmetro hidráulico, D_H (m), definido como:

$$D_H = \frac{4A_c}{P} \quad (8)$$

sendo A_c a área da seção transversal do duto e P o perímetro molhado. Para o caso de seções retangulares, o diâmetro hidráulico pode ser expresso pela Equação (9):

$$D_H = \frac{4 \cdot (H_{ch} \cdot z_{ch})}{2 \cdot (H_{ch} + z_{ch})} \quad (9)$$

sendo H_{ch} a espessura e z_{ch} a profundidade do canal vertical.

O diâmetro hidráulico é definido de forma que possa ser reduzido ao diâmetro comum D de tubos circulares (ÇENGEL et al., 2008):

$$D_H = \frac{4A_c}{P} = \frac{4(\pi D^2/4)}{\pi D} = D \quad (10)$$

A Equação (7) é válida para fluidos newtonianos, porém neste trabalho serão analisados os fluidos não newtonianos. Alguns autores desenvolveram aproximações

para o número de Re quando se trabalha com fluidos não newtonianos representados pelos modelos de Lei de Potência e Herschel-Bulckley.

Para o modelo de Lei de Potência pode-se usar a Equação (11) para o número de Reynolds (BIRD et al., 2002):

$$\text{Re}_{LP} = \frac{\rho \bar{u}_{LP}^{2-n} D_H^n}{K_{mod}} \quad (11)$$

onde \bar{u} é a velocidade média do escoamento e k_{mod} é o índice de consistência modificado, do fluido, expresso pela Equação (12):

$$K_{mod} = K \left[\frac{1}{12} \left(8 + \frac{4}{n} \right)^n \right] \quad (12)$$

Da mesma forma para Herschel-Bulkley, realizando o procedimento de Madlener et al (2009), obtêm-se a seguinte expressão para o número de Reynolds:

$$\text{Re}_{HB} = \frac{\rho \bar{u}_{LP}^{2-n} D_H^n}{\left(\frac{\tau^0}{8} \right) \left(\frac{D_H}{u} \right)^n + K \left(\frac{3m+1}{4m} \right)^n 8^{n-1}} \quad (13)$$

sendo m o gradiente local da tensão pela taxa de cisalhamento dado por (MADLENER et.al., 2009):

$$m = \frac{nk \left(\frac{8\bar{u}}{D_H} \right)^n}{\tau_0 + k \left(\frac{8\bar{u}}{D_H} \right)^n} \quad (14)$$

Os parâmetros vazão e velocidade média são utilizados para caracterizar o escoamento através do aparato experimental.

A vazão representa a quantidade de material que escoar através de uma seção por unidade de tempo. A vazão em volume ou volumétrica (Q) através de uma seção

de uma superfície de controle de área (A) é dada pela Equação (15) e, a partir da vazão, a velocidade média (V) do escoamento em uma seção pode ser calculada pela Equação (16).

$$Q = \int_A \vec{V} \cdot dA \quad (15)$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{\int_A \vec{V} \cdot dA}{A} \quad (16)$$

sendo A a área da seção transversal medida em m².

2.4 Concentração mássica

Neste trabalho, para a representação dos fluidos de perfuração, serão utilizadas diferentes concentrações de carbopol e glicerina em água. Para medição destas concentrações serão utilizados os conceitos de fração mássica. Além da concentração dos fluidos, teremos a mistura de material sólido (partículas) ao fluido.

A composição de uma mistura pode ser expressa em função da fração mássica (KOTZ, et al., 2009), como segue:

$$C_\alpha = \frac{m_\alpha}{m_t} \quad (17)$$

sendo C_α a própria fração mássica, o índice α representa uma determinada substância (partícula, carbopol ou glicerina), m é a massa desta substância, m_t é a massa total da mistura. A massa total da mistura é um somatório das massas presentes na mistura, por exemplo quando utilizamos carbopol como material constituinte:

$$C_{CBP} = \frac{m_\alpha}{m_t} = \frac{m_{CBP} + m_w}{m_{CBP}} \quad (18)$$

sendo assim, para partículas, por exemplo, temos:

$$C_p = \frac{m_p}{m_t} = \frac{m_p}{m_p + m_w + m_c} \quad (19)$$

sendo C_p a concentração mássica de partículas, m_w é a massa de água presente na mistura, m_p a massa de partículas misturada e m_c a massa do constituinte (carbopol ou glicerina) presente.

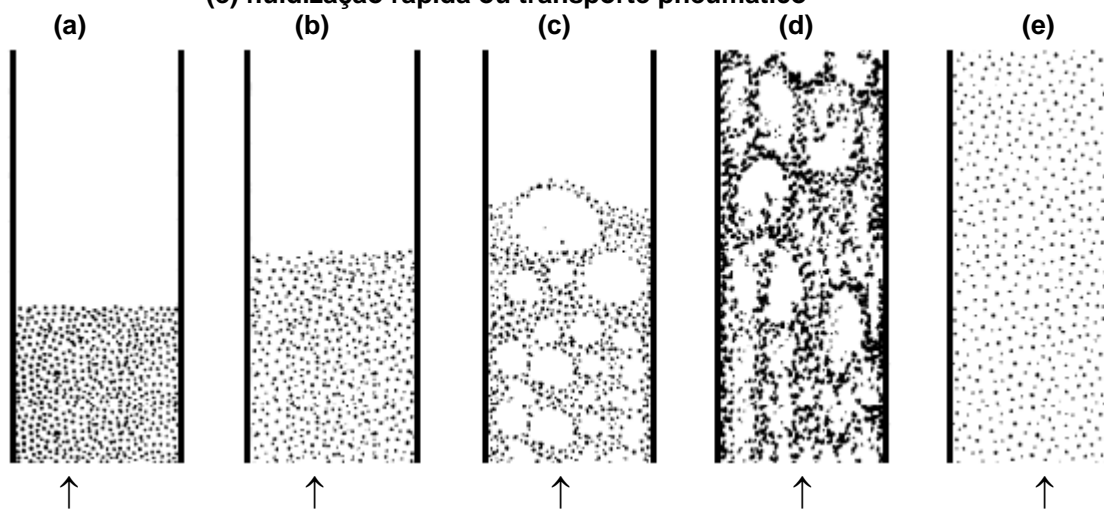
2.5 Padrões de escoamento particulado

Como exposto na caracterização do problema (Seção 1.1), o presente trabalho trata do escoamento de fluido não newtoniano com a presença de material particulado. Esta é uma abordagem que caracteriza uma subclasse de um sistema multifásico denominada como dispersa, sendo o fluido a fase contínua e as partículas sólidas a fase dispersa.

Este tipo de sistema multifásico, geralmente complexo, apresenta muitos fatores que rege o comportamento do escoamento (e.g., tamanho, forma, massa específica e concentração das partículas, propriedades do fluido, características geométricas do domínio e do regime de escoamento), dando origem a diferentes regimes e padrões de transporte do material particulado.

Para o escoamento vertical, um dos principais problemas encontrados na literatura é a fluidização de material particulado. A Figura 7 mostra alguns dos padrões encontrados para problemas de fluidização, considerando a entrada de fluido (líquido ou gás) por baixo do canal, podendo ou não apresentar o processo de recirculação do material particulado. Considerando o problema proposto neste trabalho, o escoamento fluidizado é observado na região anular do poço (Figura 5).

Figura 7 – Padrões de fluidização de partículas: (a) leito fixo; (b) fluidização homogênea; (c) fluidização borbulhante; (d) fluidização turbulenta; (e) fluidização rápida ou transporte pneumático



Fonte: De Lai (2013) adaptado de KUNII e LAVENSPIEL, 1989.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados os materiais e os métodos utilizados nos experimentos e na obtenção dos dados. O aparato experimental será descrito detalhadamente, cada um dos acessórios será devidamente identificado e salientado as funções. Também será descrito o sistema de medição de parâmetros como a pressão e os programas utilizados para o monitoramento dos testes.

Para uma melhor compreensão de como se dá o funcionamento do aparato, um circuito hidráulico será exibido, nele será evidenciado o processo pelo qual será possível realizar os testes com as simplificações consideradas.

Será apresentado o procedimento pelo qual foi possível a obtenção das soluções utilizadas, metodologia empregada na obtenção das curvas reológicas e os procedimentos experimentais padrão.

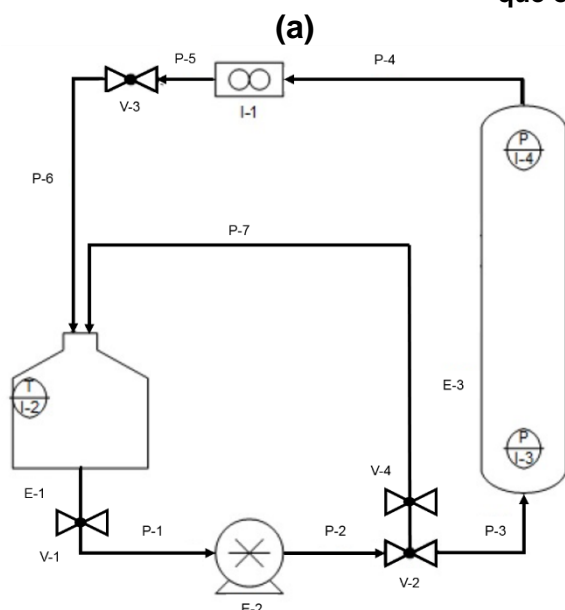
3.1 Aparato experimental

Primeiramente são apresentados o circuito hidráulico e os componentes que constituem o aparato experimental. Logo em seguida são descritos, individualmente, cada um dos componentes deixando claro as funções que cada um desempenha, bem como as faixas de operação e respectivos erros associados.

3.1.1 Circuito hidráulico

A Figura 8(a) representa o circuito hidráulico da bancada experimental e a Figura 8(b) apresenta todos os componentes que compõem este sistema. O aparato experimental é composto por uma seção de testes, uma bomba helicoidal para proporcionar o escoamento, um tanque com misturador acoplado para homogeneizar as soluções aquosas, um medidor de vazão mássico coriolis, dois transdutores de pressão absoluta, além de um termopar para verificar as condições de temperatura dos experimentos.

Figura 8 – Circuito hidráulico: (a) Representação do circuito, (b) descrição dos equipamentos que o compõe.



(b)

Sigla	Descrição
E-1	Tanque misturador
E-2	Bomba helicoidal
E-3	Seção de testes
I-1	Medidor de vazão mássica coriolis
I-2	Termopar
I-3/I-4	Transmissor de pressão relativa
P-1	Tubulação de sucção
P-2	Tubulação de recalque
P-3	Tubulação de entrada na seção
P-4	Tubulação de saída da seção
P-5	Tubulação de saída do medidor de vazão
P-6	Mangueira de retorno ao tanque
P-7	Bypass
V-1	Válvula de saída do tanque
V-2	Válvula da entrada da seção de teste
V-3	Válvula da saída do medidor de vazão
V-4	Válvula do bypass

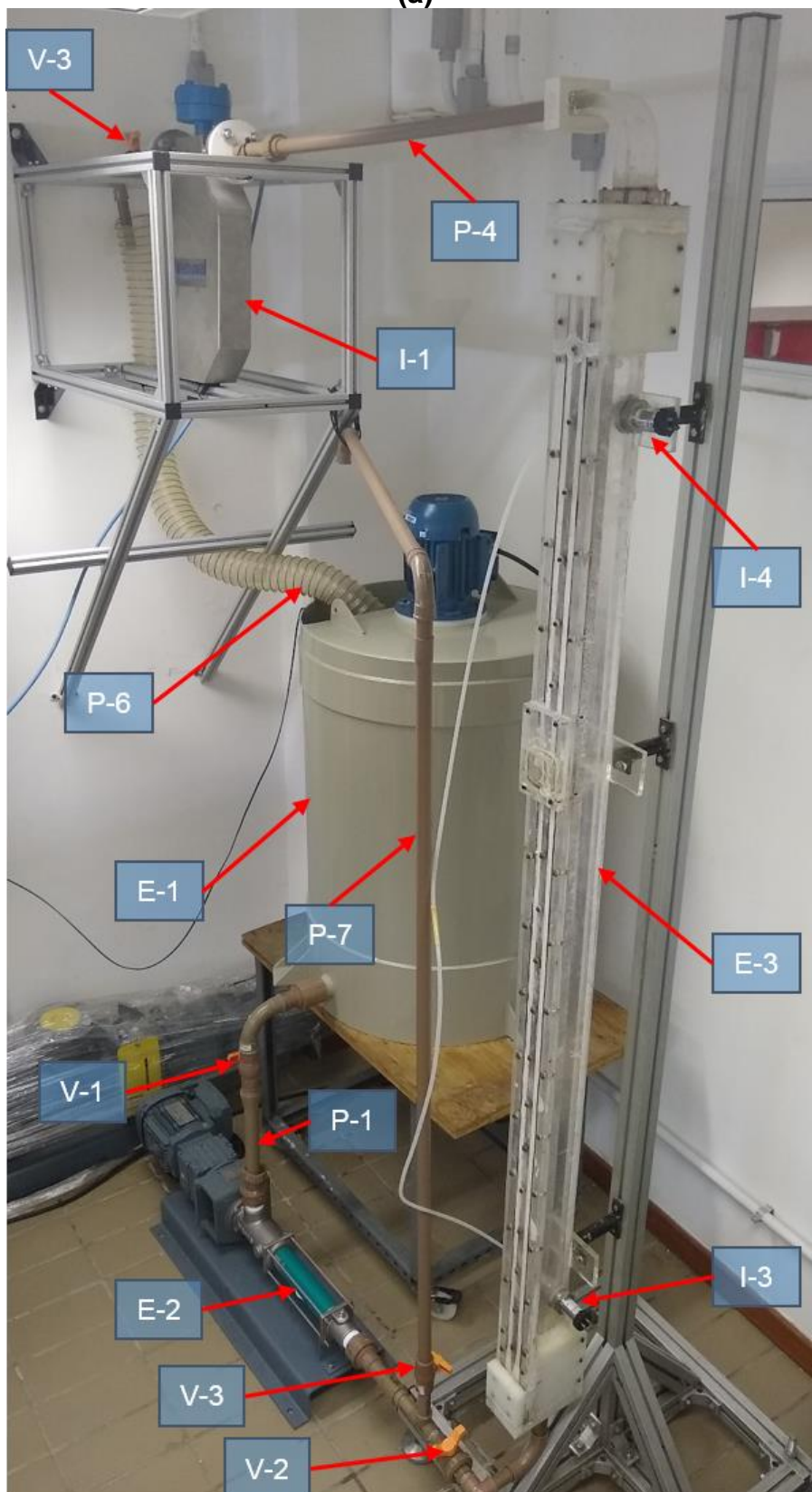
Fonte: Elaboração própria

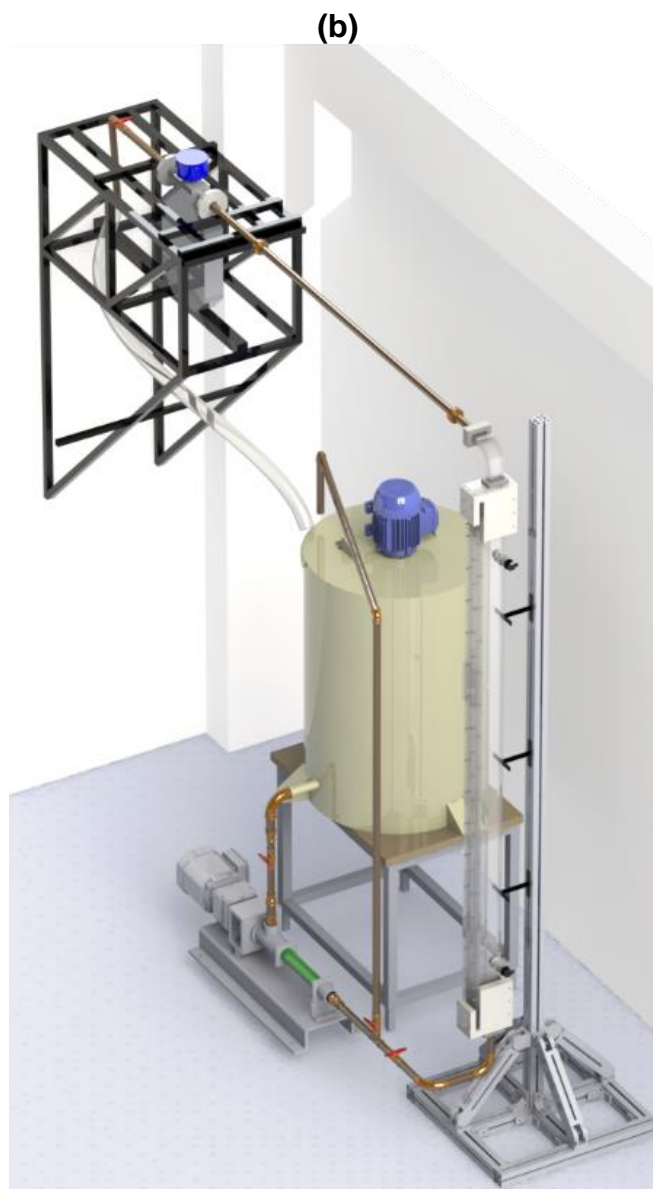
Todos os componentes serão descritos individualmente e serão especificadas as utilidades, bem como as faixas de operação e precisão de cada um.

A Figura 9 apresenta uma visão geral de todo aparato experimental instalado nas dependências do Laboratório de Meios Porosos (LaMP), do Centro de Pesquisas em Reologia e Fluidos Não Newtonianos (CERNN), da UTFPR. Na Figura 9(a) a imagem real das dependências do laboratório e na Figura 9(b) o projeto 3D em CAD realizado no programa SolidWorks (SolidWorks, 2016).

Figura 9 – Aparato experimental: (a) Fotografia real do aparato; (b) Vista isométrica em 3D do projeto do aparato no software SolidWorks.

(a)





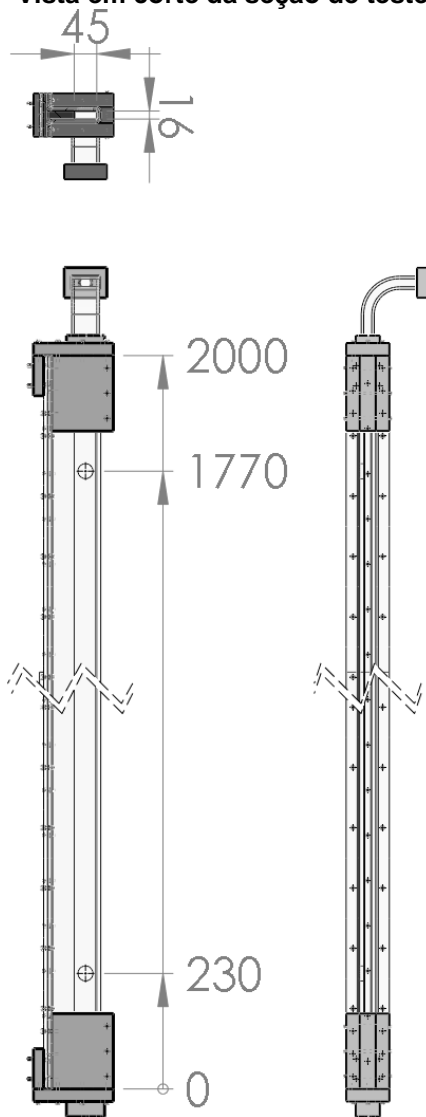
Fonte: Elaboração própria.

3.1.2 Seção de testes

A seção de testes utilizada nos procedimentos experimentais foi fabricada em acrílico, material translúcido, que permite visualizar o carregamento do material particulado ao longo do canal interno do aparato. Esta seção é uma versão posterior aos trabalhos de Sthalke e Fritoli (2014) que possui algumas modificações na concepção do projeto estrutural do aparato. O canal interno possui um comprimento de 2 m e seção transversal de formato retangular de 16 mm de largura e 45 mm de altura, como apresentado na Figura 10. A largura do canal representa a dimensão da região anular, para uma abertura do poço com diâmetro externo e interno,

respectivamente, de 8,5 e 5 polegadas, com base nas dimensões de um poço para uma determinada etapa do processo de perfuração (DE LAI, 2013; CALÇADA et al., 2015).

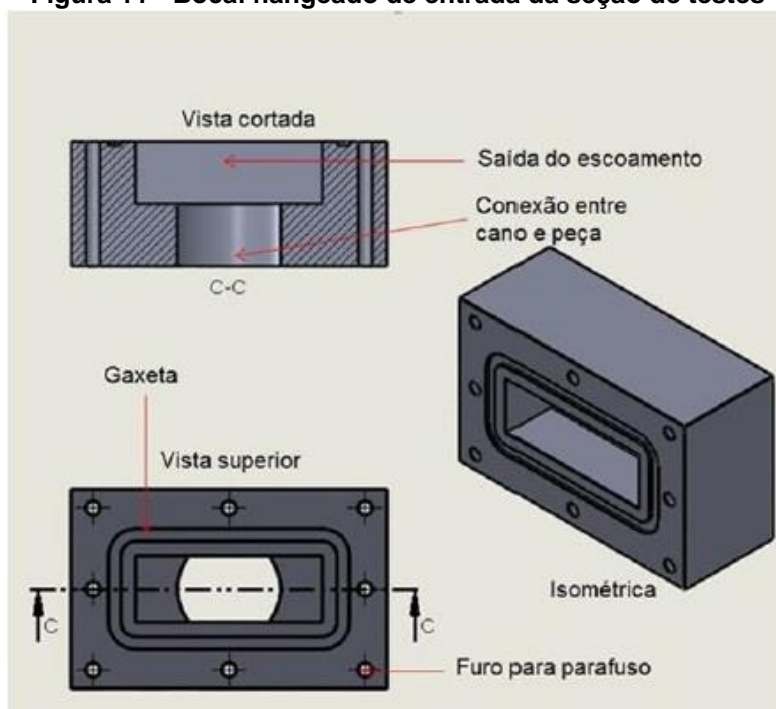
Figura 10 – Vista em corte da seção de testes utilizada.



Fonte: Elaboração própria.

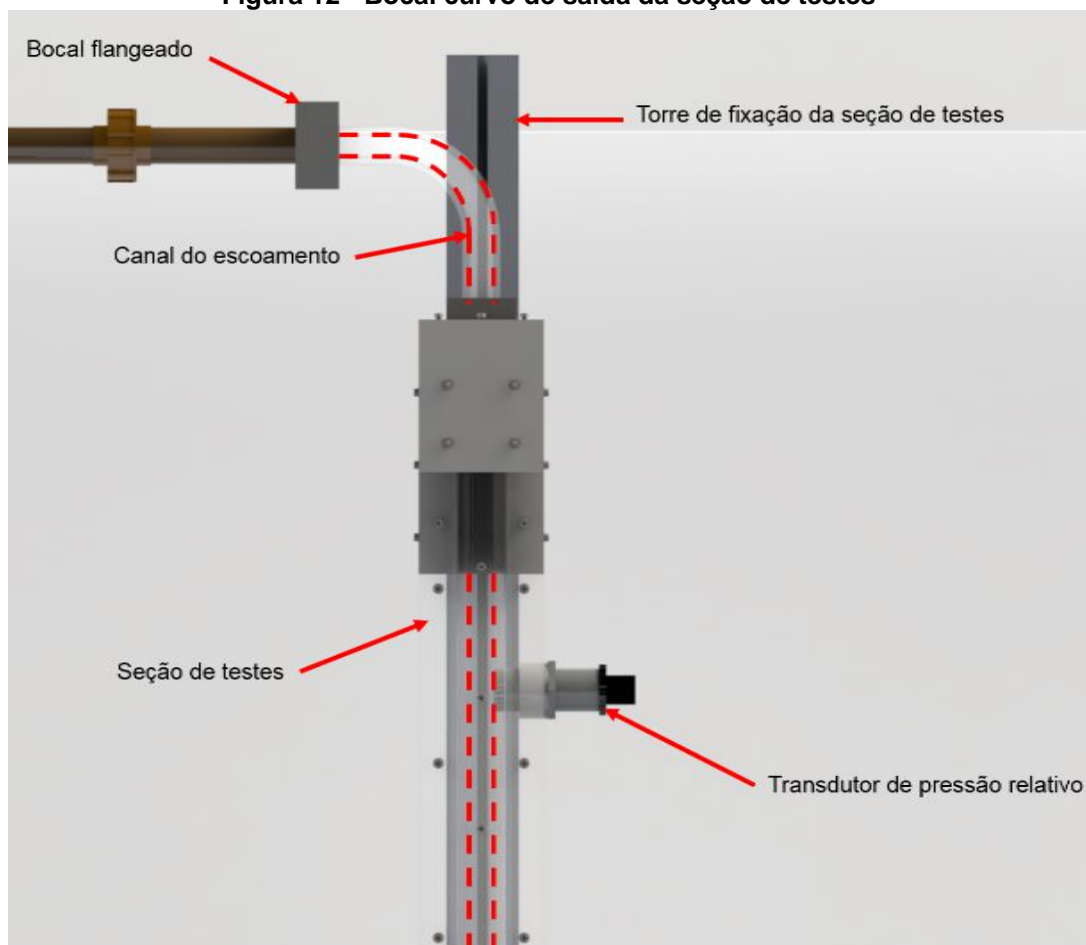
A solução, fluido-partícula, chega até a seção de teste por uma tubulação de PVC com diâmetro de 1 polegada (25,4 mm). Na entrada da seção de testes um bocal faz a transição da seção circular do duto para uma retangular do canal, como representado na Figura 11. Enquanto na saída da seção de testes o fluido escoa através de um bocal retangular curvo (Figura 12). Nota-se que nas laterais do aparato encontram-se dois orifícios, I-3 e I-4, que têm a função de alocar os transdutores de pressão relativa para a tomada de pressão no interior da coluna.

Figura 11 - Bocal flangeado de entrada da seção de testes



Fonte: Elaboração própria

Figura 12 - Bocal curvo de saída da seção de testes



Fonte: Elaboração própria

O retorno de solução particulada ao tanque reservatório, é efetuado com a utilização de uma mangueira que possui um diâmetro superior ao da tubulação de entrada. O que fornece uma condição, para a região da saída do canal, de pressão atmosférica.

3.2 Componentes do aparato experimental

Nesta seção serão descritos cada um dos componentes que fazem parte do aparato experimental, bem como as funções e características operacionais de cada um.

a) Tanque misturador (E-1):

O tanque misturador Figura 13, cujas características de funcionamento estão evidenciadas na Tabela 3, é utilizado para mistura e homogeneização da solução de particulado empregado no experimento.

Figura 13 - Tanque misturador.



Fonte: Elaboração própria.

Controlando a frequência do motor do misturados, remotamente, por um inversor de frequências é possível alterar a rotação das pás.

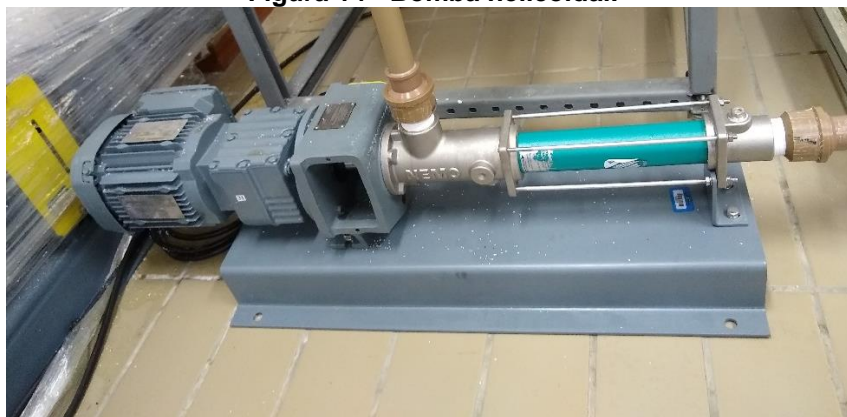
Tabela 3 - Características funcionais do tanque misturador.

Capacidade	200 l
Potência	0,33 CV
Rotação máxima	1750 RPM
Frequência	60 Hz

Fonte: Bombetec, 2007.

b) Bomba helicoidal (E-2):

A bomba helicoidal de deslocamento positivo (Figura 14) do modelo Nemo NM 021BY (NETZSCH, 2006) assegura o escoamento ao longo de todo o circuito. Foi selecionada por ser adequada para trabalho com fluidos de alta viscosidade e pelo fato de proporcionar vazão aproximadamente constante em um intervalo de pressão de operação de 0 a 2 bar, mais do que suficiente para a situação deste trabalho. A bomba possui um inversor de frequência acoplado ao motor, a fim de se ajustar a vazão desejada remotamente. As principais características da bomba são apresentadas na Tabela 4.

Figura 14 - Bomba helicoidal.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 4 - Características funcionais da bomba helicoidal.

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

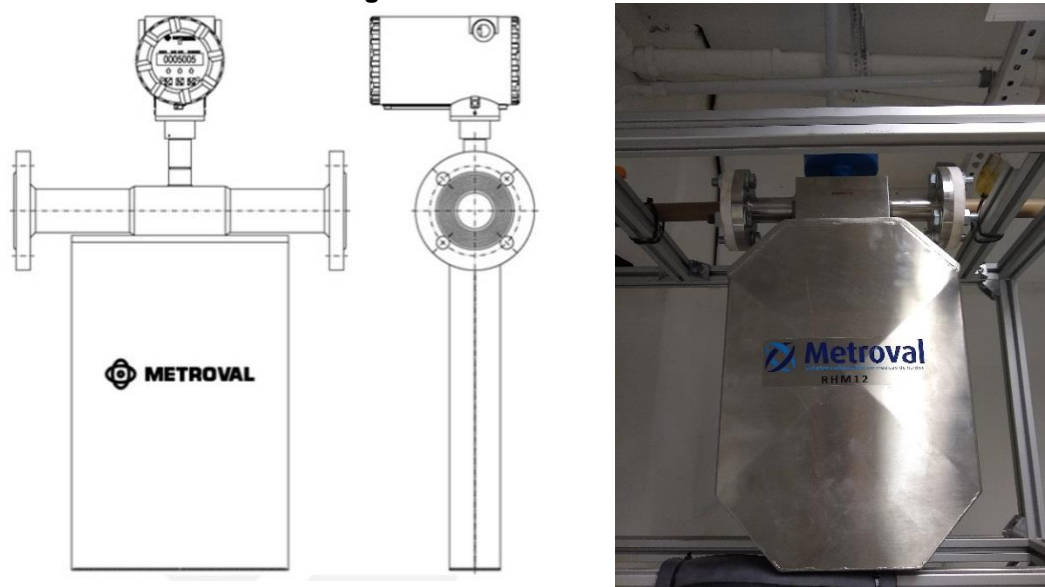
Fonte: Netzsch, 2006

c) Medidor de vazão coriolis (I-1):

Permite a medição da vazão mássica que passa através do canal em tempo real. A mensuração da vazão mássica possibilita o controle de um importante parâmetro dos experimentos, o número de Reynolds (Re). O modelo utilizado é o

RHM-15 (METROVAL, 2007) (Figura 15), e as características funcionais são exibidas na Tabela 5.

Figura 15 – Medidor de vazão coriolis.



Fonte: Metroval, 2007

Tabela 5 - características funcionais do medidor de vazão coriolis.

Diâmetro nominal	1"
Sinal de saída	4 a 20 mA
Faixa de medição	4 a 200 kg/min
Pressão admissível	300 bar
Incerteza de medição	± 0,15%

Fonte: Metroval, 2007

d) Termopar (I-2)

O controle de temperatura dentro do tanque onde se encontra a solução é importante, pois os testes devem ser realizados com a mesma temperatura na qual foram realizados os testes reológicos. De maneira que não ocorram variações nas viscosidades dos fluidos. Um termopar tipo T simples, modelo TIM11 (Figura 16), é usado para aferir a temperatura do fluido no momento do teste. O modelo caracteriza-se pelos aspectos indicados na Tabela 6.

Figura 16 - Termopar



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 6 - Características funcionais do termopar.

Faixa de operação	-40 a 200 °C
Tempo de resposta	0,3 s
Incerteza de medição	± 1 °C

e) Transmissores de pressão relativa (I-3 e I-4):

Os transmissores de pressão relativa (Figura 17) estão posicionados um próximo à entrada da seção e o outro próximo à saída, com o objetivo de medir as pressões no local, e avaliar a perda de carga. O transmissor de pressão diferencial possui duas tomadas de pressão, sendo uma no início e a outra ao final da coluna, a fim de determinar o diferencial de pressão gerado com a variação dos parâmetros avaliados neste estudo.

Figura 17 - Transdutor de pressão relativo



Fonte: Elaboração própria.

O modelo dos sensores de pressão relativa utilizado é o S-11 (WIKA, 2012), além do modelo RTP 420-DIF (RÜCKEN, 2014) de pressão diferencial.

Tabela 7 - Características dos transmissores de pressão relativa e diferencial.

Dados	Relativo inferior (I-3)	Relativo Superior (I-4)	Diferencial (I-5)
Marca	Wika	Wika	Rücken
Modelo	S11-04	S11-025	RTP 420-DIF

Faixa de operação	0-0,4 bar	0-0,25 bar	0-0,1 bar
Incerteza de medição	0,5%	0,5%	0,2%

Fonte: Wika, 2012.

f) Tubulação PVC:

As tubulações, que conduzem o fluido através do circuito hidráulico, são fabricadas em PVC, sendo a de sucção de 32 mm de diâmetro e as demais 25 mm de diâmetro. Na saída da seção de testes o fluido é redirecionado ao tanque através de uma mangueira fabricada em poliuretano, sendo a de retorno da seção de testes (P-6) de 3", que fornece saída à pressão atmosférica do fluido que retorna da seção de testes para o tanque misturador.

g) Sistema de obtenção de dados:

Como mencionado anteriormente os inversores de frequência e o agitador do tanque reservatório são controlados remotamente. Este controle é realizado com o auxílio da interface serial RS485, Figura 18. O protocolo empregado para fazer a comunicação é o Modbus – RTU.

Uma placa RS485 modelo D501 (CONTEMP, 2015) é utilizada para realizar a comunicação com o inversor convertendo os dados medidos para USB. Com este modelo de placa pode-se fazer a conexão de até 32 dispositivos simultaneamente.

Figura 18 – Painel de controle dos dispositivos.

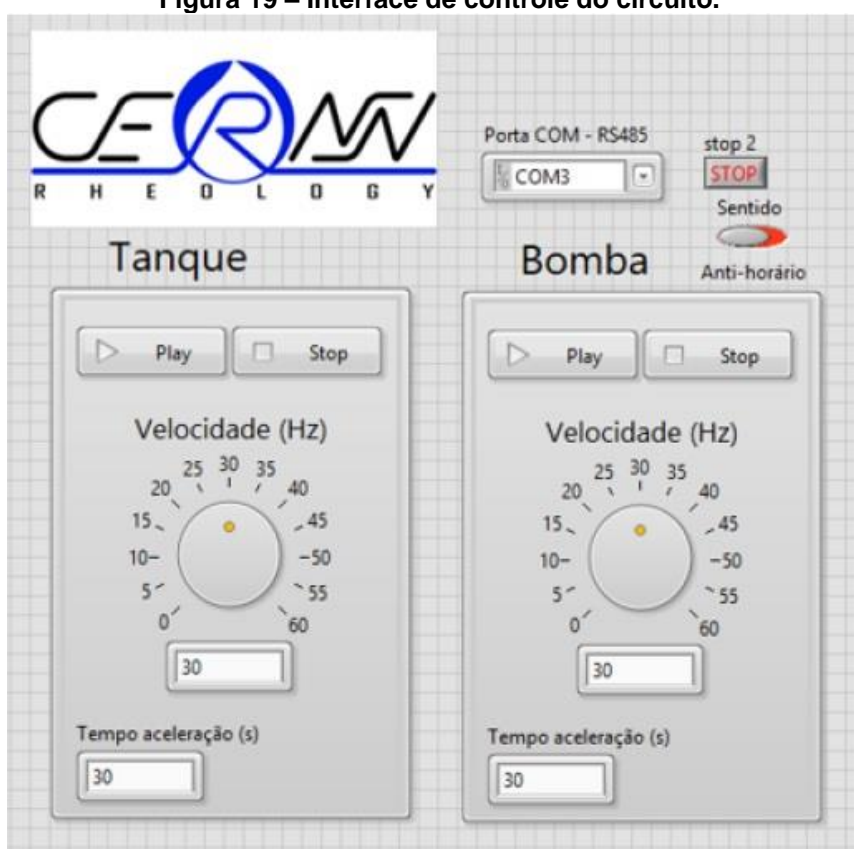


Fonte: Elaboração própria.

O controle da velocidade de agitação, da bomba e a gravação dos dados obtidos são realizadas através do programa LabView (LabView, 2016). As equações para a perda de carga, viscosidade, número de Re, são implementadas ao programa por uma programação utilizando diagrama de blocos. O diagrama de blocos utilizado pode ser visualizado no Apêndice C. Uma visualização da interface do programa pode ser observada na Figura 19, onde é possível fazer o controle da velocidade de rotação bem como do sentido de rotação dos equipamentos.

Os dados de temperatura e pressão bem como da vazão mássica que circula pelo sistema, provenientes dos medidores, são obtidos pela aquisição de dados por uma placa da National Instruments (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012). O sistema é constituído de um chassi, modelo cDAQ-9174, que abriga três módulos os quais recebe ou envia sinal proveniente dos equipamentos. O chassi tem capacidade de comportar quatro módulos além disso é dele a função de fazer a transmissão de sinais entre dos módulos e um computador.

Figura 19 – Interface de controle do circuito.



Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 8 apresenta as características principais dos módulos utilizados.

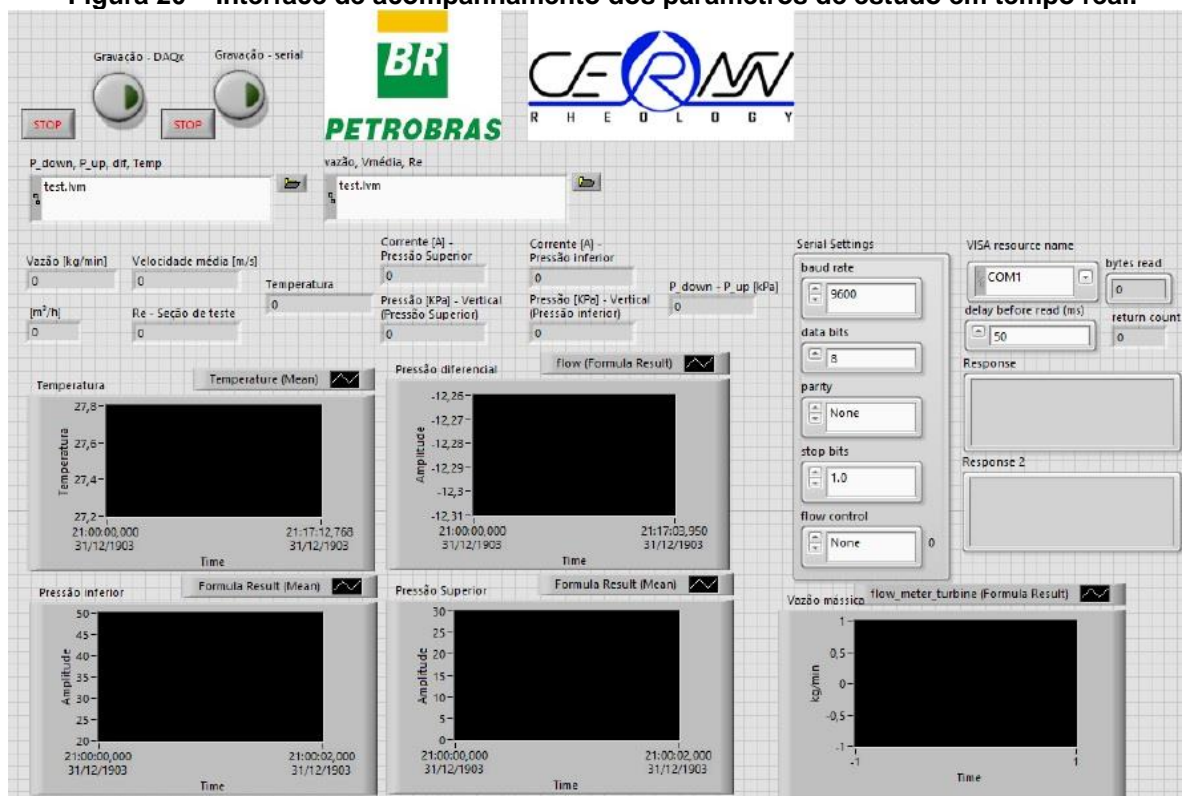
Tabela 8 - Características funcionais dos módulos utilizados.

Dados	NI 9219	NI 9211	NI 9265
Tipo de sinal	Entrada	Entrada	Saída
Sensores suportados	Entrada analógica para: tensão, corrente, temperatura e deformação	Termopar	Atuadores industriais acionados por corrente elétrica
Número de canais	4	4	4
Velocidade de recebimento	100S/s/canal	14S/s	100kS/s/canal

Os dados apanhados são analisados pelo LabView e gravados no programa Microsoft Excel. Dados de correntes são obtidos e então convertidos em seus equivalentes de temperatura, pressão, vazão mássica e perda de carga. Com este sistema é possível fazer o acompanhamento em tempo real dos parâmetros (Figura 20). As correlações, entre os dados de correntes e as grandezas de interesse, são obtidas via ensaios de calibração dos equipamentos. Os dados podem ser exportados para as planilhas do software Excel mediante configuração.

É possível ajustar a frequência com que estes dados são gravados, bem como obter uma média dos valores em um determinado intervalo de tempo.

Figura 20 – Interface de acompanhamento dos parâmetros de estudo em tempo real.



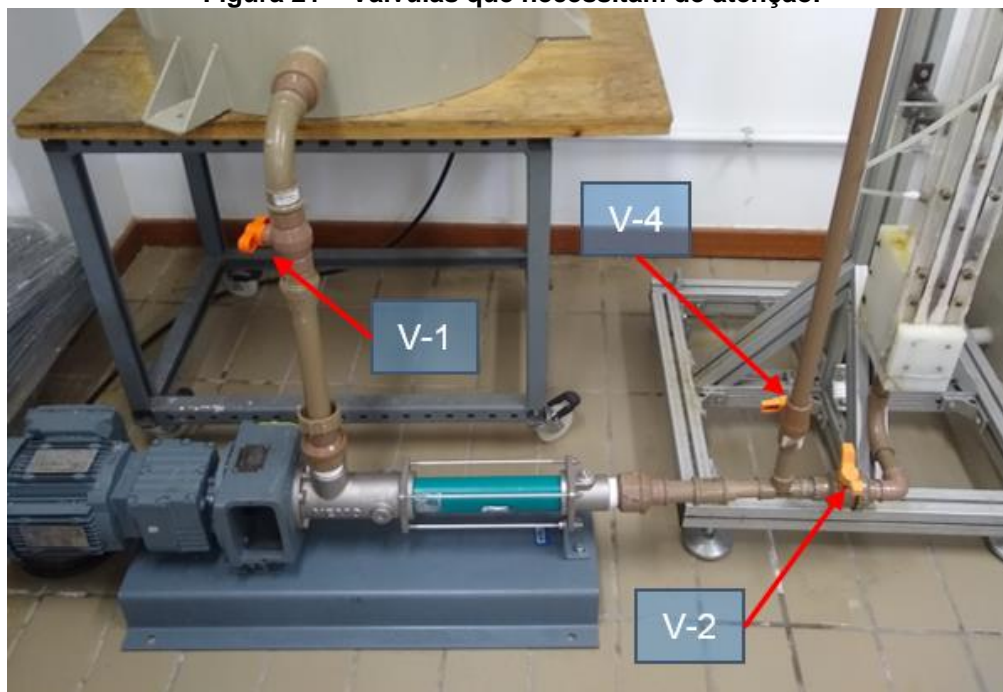
Fonte: Elaboração própria.

3.3 Procedimentos experimentais

A Figura 27 apresenta um diagrama do procedimento operacional padrão empregado na realização dos testes experimentais. Algumas sequências de procedimentos precisam ser realizadas antes, durante e depois de os experimentos serem executados. Nesta seção será descrito um passo-a-passo destes procedimentos, para a melhor compreensão das características e funcionamento do aparato experimental.

A primeira etapa do procedimento, ainda com o tanque misturador vazio, ou seja, sem fluido e sem material particulado, consiste em verificar se todas as válvulas (Figura 21) do sistema experimental estão devidamente fechadas. Esta verificação é importante neste momento, a fim de evitar vazamentos no momento em que o sistema entrar em operação. Após esta verificação, a próxima etapa consiste na formulação do fluido de trabalho.

Figura 21 – Válvulas que necessitam de atenção.



Fonte: Elaboração própria.

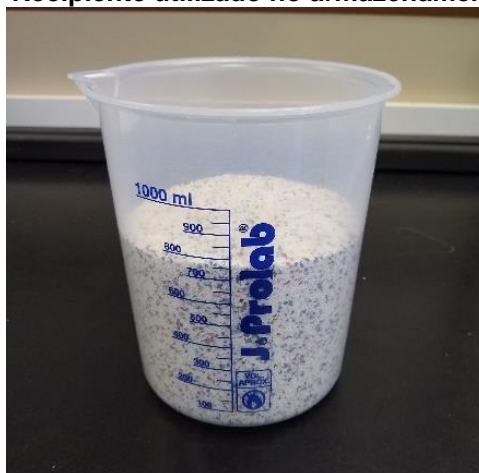
Para a formulação do fluido de trabalho, faz-se o preenchimento do tanque com a quantidade de água necessária e adiciona-se o aditivo de interesse que fornecerá as características, newtoniana ou não newtoniana, necessárias para o fluido. Logo

após a inserção do fluido ao tanque, o misturador é ligado à frequência relativamente baixa (geralmente entre 10 e 20 Hz), porém que seja capaz de fazer a homogeneização da mistura, e aguarda-se até que a mistura esteja completa (homogênea).

A partir deste momento, coleta-se uma pequena quantidade (aproximadamente 200 ml) do fluido, do interior do tanque, com o objetivo de realizar o teste reológico. Porém, antes da coleta, paralisa-se o misturador para evitar acidentes de trabalho. A análise do teste determinará se a solução atingiu o patamar esperado de viscosidade para a taxa mais alta do viscosímetro Fann 35A, que é a taxa de 1000 s^{-1} . O procedimento, em detalhe, da reologia dos fluidos será descrito na Seção 4.3. O processo de coletar a amostra de fluido e efetuar o teste no viscosímetro Fann 35A é realizado, no mínimo, três vezes. Se o fluido atingiu o patamar esperado, pode-se partir para a próxima etapa de operação. Caso contrário, adiciona-se maior quantidade do aditivo (ou água, se for preciso), aguarda-se a homogeneização por mais alguns minutos e realiza-se novamente o teste reológico até que o fluido apresente a viscosidade desejada, para a taxa mais alta. Estas etapas podem ser observadas no diagrama da Figura 23.

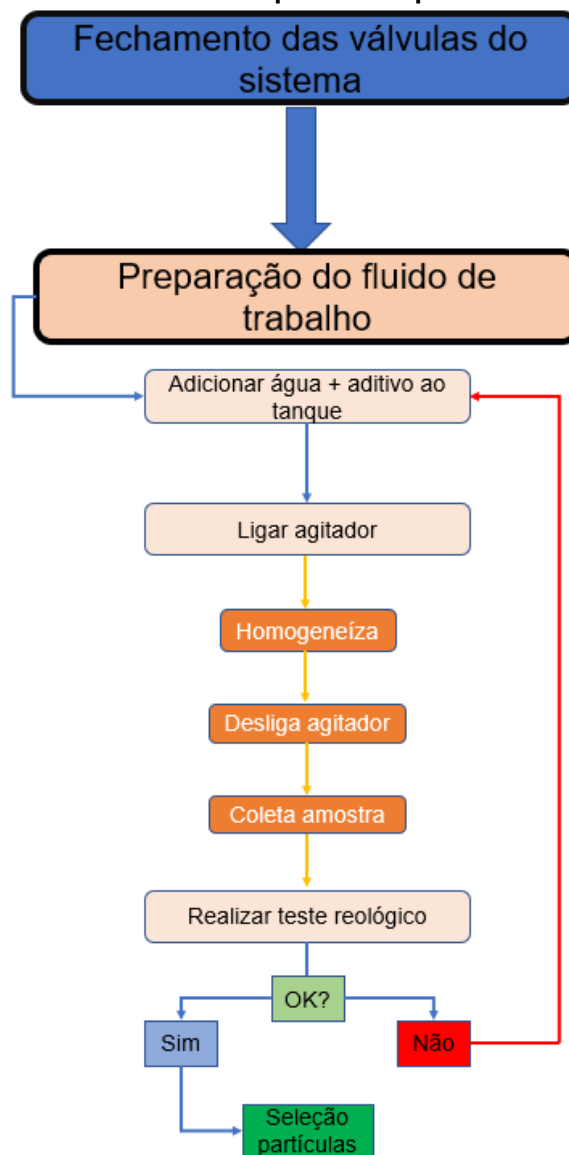
Prosseguindo, com o fluido devidamente formulado, liga-se novamente o agitador do tanque misturador. Seleciona-se o LCM o qual se deseja utilizar em conjunto com o fluido e, utilizando um recipiente para armazená-lo, como o recipiente da Figura 22, com o auxílio de uma balança realiza-se a pesagem da massa do particulado. Adiciona-se ou se subtrai partículas do recipiente com o propósito de atingir a massa, medida em kg, relativa a porcentagem de LCM com a qual deseja-se adicionar à mistura de fluido (e.g. 1%, 2%, 3% de LCM). Este material, contido no recipiente, é posicionado ao lado (externo) do tanque misturador, onde permanecerá até o momento em que for injetado ao interior do tanque, no decorrer do experimento. Após este momento, as válvulas V-1 e V-2 (Figura 21) são abertas, e em seguida aciona-se a bomba helicoidal (E-2), à frequência de 10 Hz, para que o fluido percorra o circuito hidráulico. Após esta sequência, monitora-se as variáveis resposta do sistema (e.g., pressão superior/inferior, vazão, velocidade, número de Reynolds, perda de carga), pela interface do programa LabView.

Figura 22 - Recipiente utilizado no armazenamento de LCM.



Fonte: Elaboração própria.

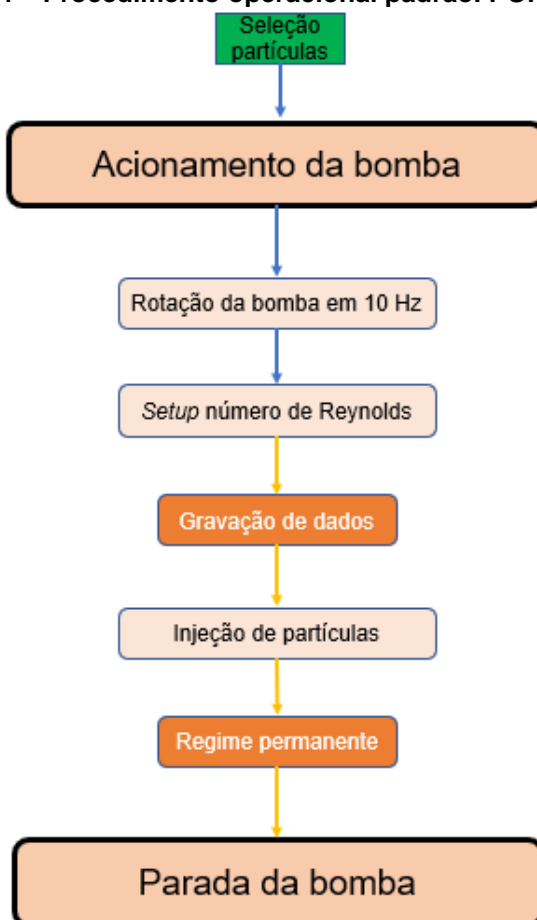
Figura 23 – Procedimento operacional padrão. POP - Parte 1.



Fonte: Elaboração própria.

Com o fluido circulando pela seção, sem o LCM, a rotação da bomba pode ser controlada a fim de obter o parâmetro de interesse. Por exemplo, pode-se ajustar a rotação da bomba para que, no interior do canal da seção de teste, o escoamento apresente o número de Reynolds (ou vazão) desejado, ou que o tipo de fluido (características reológicas) permita. Com este parâmetro selecionado, é iniciado a gravação dos dados (variáveis resposta monitorados em tempo real) pelo programa LabView. Utilizando um cronômetro, marca-se o início do experimento e, no instante de 120s, adiciona-se o de material particulado ao interior do tanque. Após a adição das partículas, monitora-se a perda de carga no canal até que o escoamento entre em regime permanente (momento em que a diferença de pressão no canal, entre os sensores I-3 e I-4, não apresentam variação significativa). A partir deste momento encerra-se a gravação dos dados. As etapas descritas estão representadas no diagrama da Figura 24.

Figura 24 – Procedimento operacional padrão. POP - Parte 2.

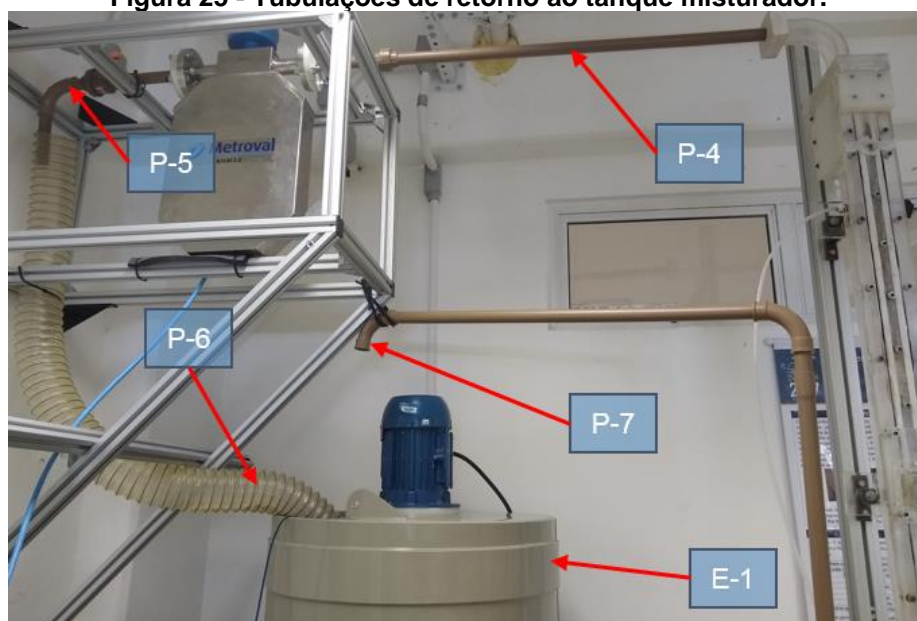


Fonte: Elaboração própria.

Após a parada da bomba, ao fim do experimento, é efetuada a peneiração (ou tamisação) da mistura. Este processo consiste em separar as partículas sólidas do fluido presente no tanque. O procedimento é efetuado entre a cada teste, as partículas são armazenadas novamente no recipiente e reutilizadas no próximo experimento. Com isso, minimiza-se o desperdício e os custos referentes ao armazenamento e descarte deste tipo de material. Com a bomba parada, fecha-se a válvula V-2 e abre-se a válvula V-4 (Figura 21), assim o fluido, ao passar pela bomba, retorna ao tanque misturador pela tubulação (P-7), ao invés de circular pelo circuito hidráulico completo. A peneira é inserida entre a extremidade da tubulação P-7 e a entrada do tanque E-1, retendo as partículas que são arrastadas pelo escoamento. As partículas então, são alocadas em um recipiente até que o próximo teste tenha início. Este processo, geralmente, é mais demorado que o experimento em si. O tempo que o operador leva, para a retirada completa do material particulado do tanque, depende de fatores tais como: concentração de partículas ao fluido, tipo de fluido, características reológicas do fluido, granulometria das partículas.

Após o processo de peneiração estar completo, fecha-se a válvula V-4 e V-2. Assim, desliga-se completamente os componentes da bancada, como pode ser observado na Figura 26.

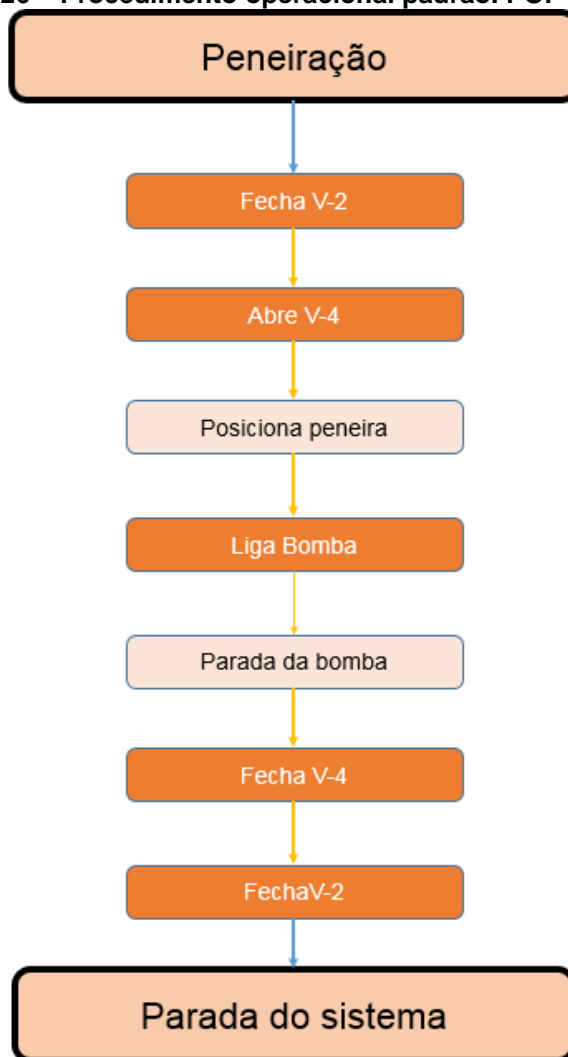
Figura 25 - Tubulações de retorno ao tanque misturador.



Fonte: Elaboração própria.

Dependendo da natureza do fluido utilizado (e.g. viscosidade, massa específica, concentração, diâmetro, material das partículas), é necessário a execução da etapa de limpeza do aparato experimental, ao final de cada teste. A limpeza consiste em retirar todo material do interior do tanque (separando o LCM do fluido), armazenar este material em recipientes próprios para o descarte, e adicionar água pura no lugar. Circula-se água, há uma vazão alta constante durante um período de tempo, pelo circuito hidráulico para a limpeza interna da tubulação, bomba, medidor de vazão e seção de teste. Após um certo tempo decorrido, a bomba é interrompida, as válvulas são fechadas e a água com as impurezas dentro do tanque é armazenada para o descarte posterior. O descarte dos fluidos é realizado mediante agendamento com a empresa responsável. Além disso, os cronogramas de manutenção dos equipamentos são verificados a cada vez que é feita a preparação para um novo experimento e, se necessária, a manutenção é efetuada.

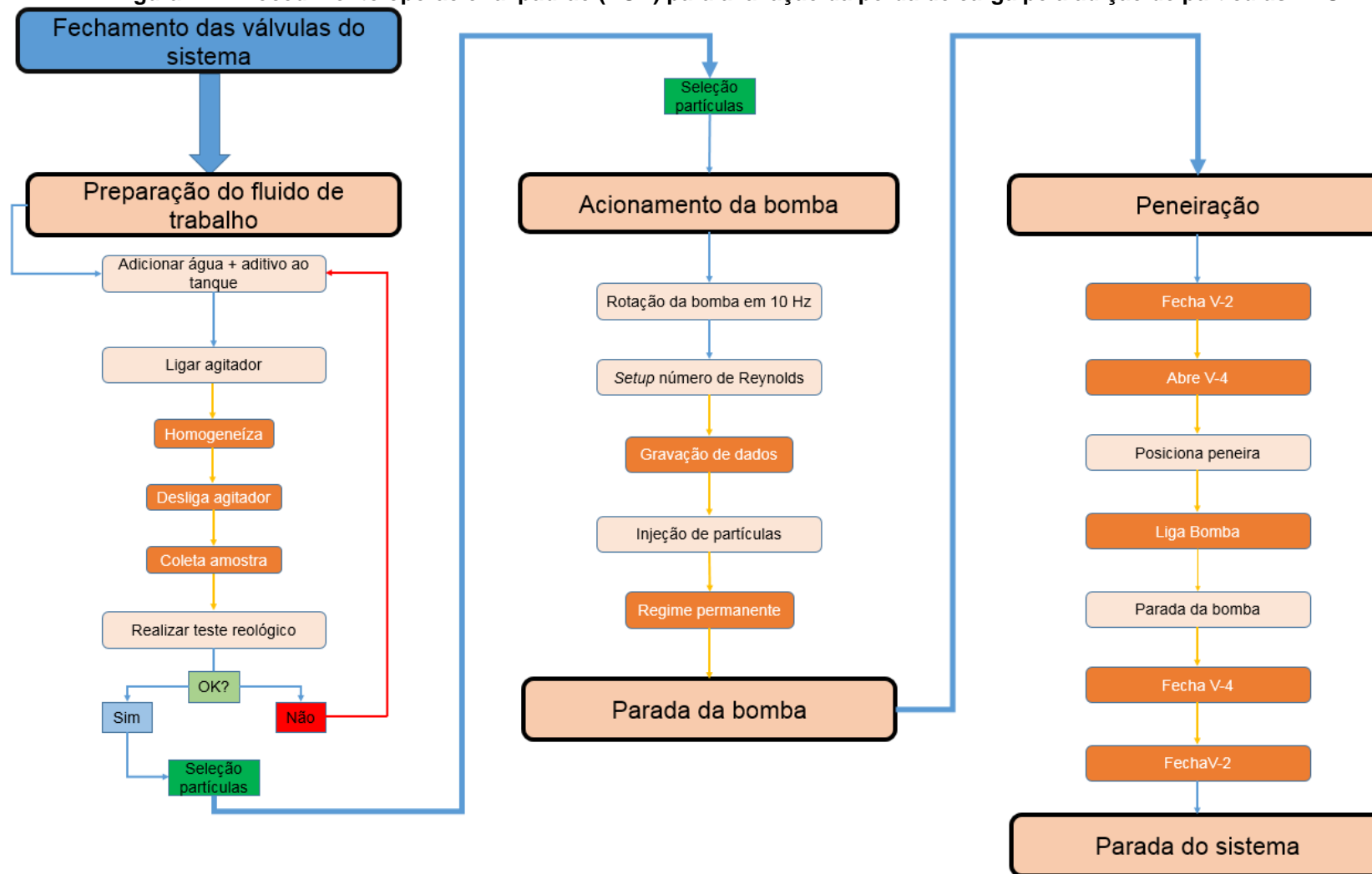
Figura 26 – Procedimento operacional padrão. POP – parte 3



Fonte: Elaboração própria.

Todos experimentos expostos neste documento passaram pelas etapas listadas nesta seção, e a figura apresenta o diagrama completo do procedimento operacional padrão para os experimentos referentes à perda de carga na seção de teste E-1, pela adição de material particulado.

Figura 27 - Procedimento operacional padrão (POP) para avaliação da perda de carga pela adição de partículas APU.



Fonte: Elaboração própria.

3.4 Aditivos poliméricos

Os aditivos poliméricos utilizados, de acordo com a revisão da literatura, são o Carbopol (CBP) e a Glicerina (GLI), Na Tabela são indicadas as principais características de cada um.

A concentração do aditivo polimérico (CBP, GLI), é definida como a razão entre a massa de polímero e o volume de fluido, e pode ser calculada através da Equação (18).

Tabela 9 - Aditivos poliméricos: características principais.

Polímero	Designação	Obtenção	Aplicação
Carbopol	CBP	Polímero hidrossolúvel com ação espessante e formação de gel.	Indústria de cosméticos, medicinal e gastronômica – produtos em gel.
Glicerina	GLI	Glicerina líquida	É de grande utilidade como lubrificante de equipamentos processadores de alimentos, por não ter problema em entrar em contato com o próprio e na indústria de cosméticos.

Fonte: Elaboração própria.

3.5 Aditivos particulados

A adição de material particulado ao fluido de trabalho necessita da seleção e especificação do tipo de aditivo particulado a ser utilizado. Para os experimentos aqui relatados são utilizadas três granulometrias distintas para um único tipo de aditivo, denominado APU (Abrasivo Plástico de Urea).

Os aditivos particulados utilizados na indústria petrolífera recebem a denominação LCM, que são utilizados em problemas que envolvem a perda de circulação, como exposto no Capítulo 1. 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 necessitarem de aditivos adicionais;
- Apresentar compatibilidade com os fluidos utilizados;

- Não apresentarem quebra ou alteração de formato.

Estas características estão relacionadas 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, abrasivo plástico (Urea) e esferas de vidro. As características dos modelos selecionados são apresentadas na Tabela 10.

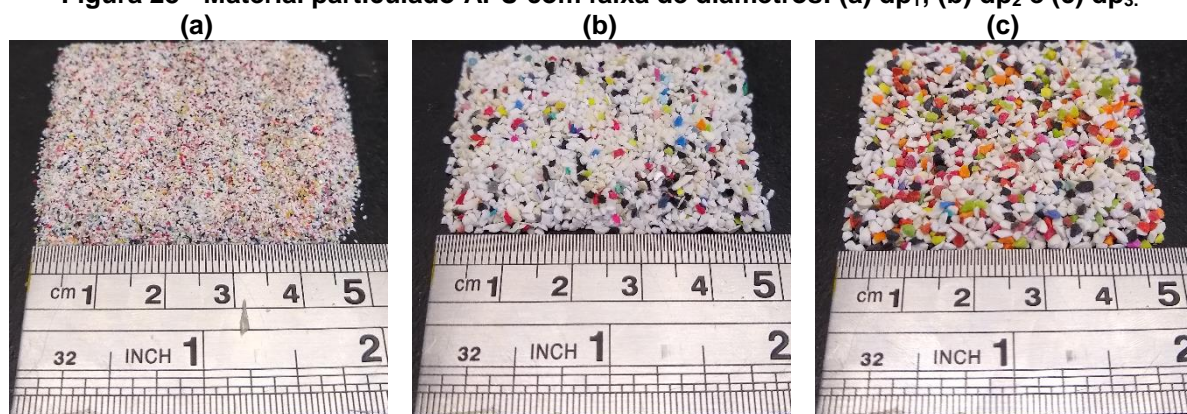
Tabela 10 - Características das partículas adquiridas para os testes.

Dados	Abrasivo Plástico
Material	Urea
Diâmetro	0,25 < dp_1 < 0,42 mm 0,8 < dp_2 < 1,2 mm 1,19 < dp_3 < 1,68 mm
Massa específica a 25°C	1,5-1,6 g/cm ³
Coloração	Branca mesclada.

Fonte: Empresa fornecedora.

A Figura 28 mostra as imagens das partículas utilizadas. Foram utilizadas três granulometrias distintas para as partículas com massa específica e forma similares com o objetivo de avaliar o comportamento de cada um dos materiais durante o escoamento particulado.

Figura 28 - Material particulado APU com faixa de diâmetros: (a) dp_1 ; (b) dp_2 e (c) dp_3 .



Fonte: Elaboração própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente trabalho, é proposto analisar experimentalmente a perda de carga, no escoamento vertical, gerada pela presença de aditivos particulados (LCM) com fluido não newtoniano.

Os parâmetros averiguados nos experimentos serão o número de Reynolds no canal, tipo de fluido de trabalho (e.g., newtoniano, não newtoniano), granulometria do aditivo utilizado como LCM e concentração mássica de LCM na mistura. A relação de testes realizados, assim como, a configuração de cada teste pode ser verificada na Seção 4.4, deste capítulo.

Inicialmente foram realizados alguns testes preliminares necessários para realização do *setup* do aparato experimental, tais como: aferição dos transdutores de pressão, testes de granulometria para o material particulado, testes reológicos e formulação para as soluções utilizadas. Todos estes testes preliminares, bem como os experimentos principais estão descritos na sequência deste capítulo.

4.1 Aferição dos equipamentos de medição

Nesta seção serão descritos os métodos de aferição para os instrumentos utilizados para a medição dos parâmetros dos experimentos.

Alguns fabricantes fornecem informações suficientes para que seus equipamentos sejam calibrados pelo próprio usuário, como é o caso do medidor de vazão. O medidor possui um sistema eletrônico de calibração a partir de um procedimento, apresentado pelo fornecedor, que consiste em fechar a válvula para calibração do medidor de vazão (V-2) e preencher o medidor com o fluido a ser utilizado, sem escoamento, e assim, o próprio medidor obtém as propriedades necessárias para funcionar com eficácia. Este procedimento deve ser realizado cada vez que o fluido de trabalho for substituído.

A verificação do funcionamento do termopar é realizada através do método comparativo, que consiste em comparar a indicação do instrumento com a de um padrão de referência com ambos imersos em um meio térmico uniforme e estável. No presente trabalho foi utilizado um termômetro para comparação de três vasilhames contendo água a temperaturas diferentes.

Os sensores de pressão são calibrados pelo método de calibração estática. O método consiste em, com o sistema operando com água como fluido de trabalho, obter uma coluna de fluido no interior da seção de testes a qual será medida a altura para que se possa calcular pela Equação (20) a pressão correspondente.

$$p = \rho gh \quad (20)$$

sendo p a pressão medida em Pa, g a aceleração da gravidade local [m/s^2] e h é a altura da coluna d'água [m].

Com o auxílio do programa LabView, para cada coluna d'água, são coletados os dados de corrente, oriundos dos sensores de pressão, obtidos durante 60 segundos, a uma taxa de 200 amostras por segundo. Então, calcula-se a média dos valores de corrente elétrica e associa-se com a coluna d'água medida e a pressão correspondente calculada.

A partir destes dados, um gráfico de dispersão é plotado relacionando corrente elétrica medida com a pressão devido à coluna d'água correspondente. A curva de ajuste de regressão linear resulta em uma equação com um coeficiente de regressão linear (R^2). A equação representa a função que relaciona a corrente elétrica medida em mA com a pressão em kPa.

O coeficiente de regressão linear é um parâmetro que varia entre 0 e 1 e mede o quanto um modelo estatístico, utilizado para representar os resultados de experimentos, se ajusta à amostra de dados coletada. Quanto maior o valor de R^2 de um modelo de regressão linear simples, maior a quantidade da variável dependente consegue ser explicada pela regressão (DOEBELIN, 1989)

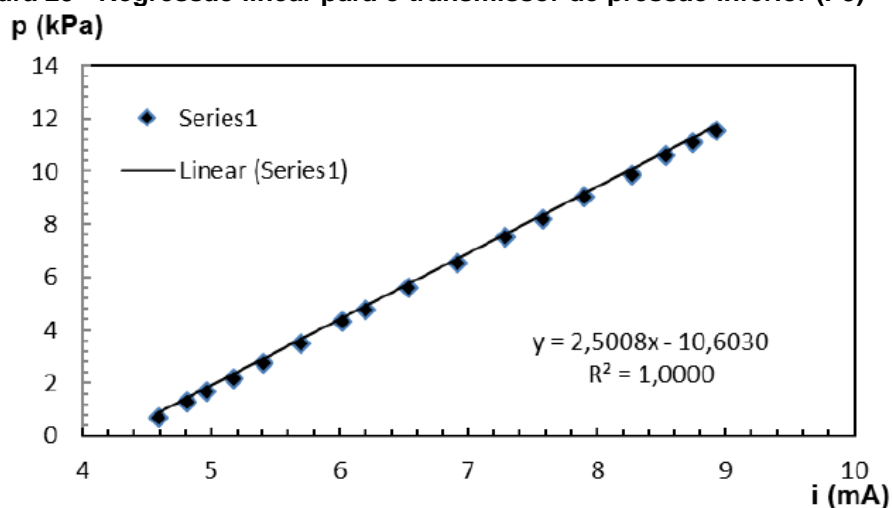
Seguindo este procedimento para o transmissor de pressão relativa (I-3) os seguintes valores de altura, pressão e corrente são expostos na Tabela 11. O resultado da curva de ajuste da regressão linear pode ser observado na Figura 29, na qual a letra y é referente a pressão medida em kPa e a letra x da equação representa a corrente elétrica em mA.

Realizando um procedimento semelhante para o transmissor de pressão relativa superior (I-4), os resultados obtidos estão na Tabela 12 que possibilitaram uma regressão linear que está exibida na Figura 30. O coeficiente de regressão linear R^2 resulta em um valor igual a 0,9999.

Tabela 11 - Resultados obtidos para calibração do transmissor de pressão inferior (I-3)

h (mm)	P (kPa)	Corrente elétrica (mA)
83	0,81	4,57
139	1,36	4,79
179	1,75	4,94
232	2,27	5,15
292	2,86	5,38
368	3,60	5,68
450	4,41	6,00
496	4,86	6,18
581	5,69	6,52
679	6,65	6,89
775	7,59	7,27
848	8,30	7,55
931	9,12	7,88
1020	9,99	8,25
1092	10,69	8,52

Figura 29 - Regressão linear para o transmissor de pressão inferior (I-3)

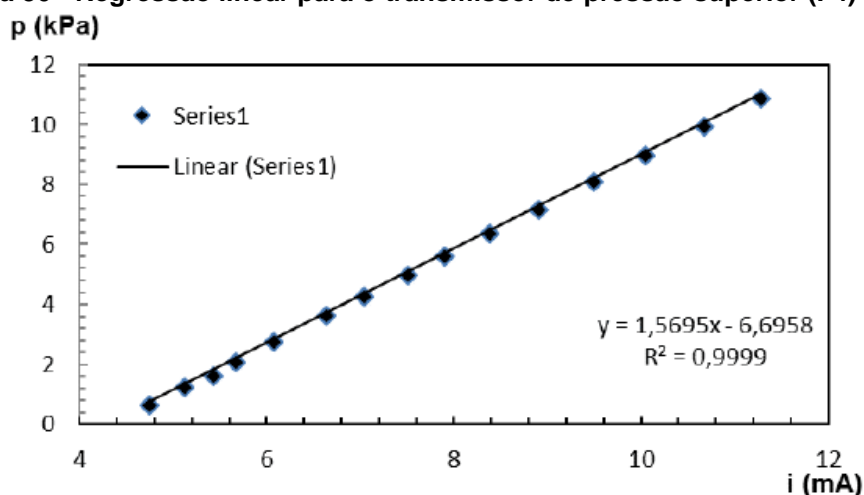


Fonte: Elaboração própria.

Tabela 12 - Resultados obtidos para calibração do transmissor de pressão superior (I-4)

h (mm)	P (kPa)	Corrente elétrica (mA)
74	0,72	4,73
134	1,31	5,10
174	1,70	5,41
221	2,16	5,64
287	2,81	6,05
377	3,69	6,61
443	4,34	7,02
518	5,07	7,48
580	5,68	7,87
657	6,43	8,36
740	7,25	8,88
835	8,18	9,47
922	9,03	10,02
1021	10,00	10,64
1116	10,93	11,25

Figura 30 - Regressão linear para o transmissor de pressão superior (I-4)



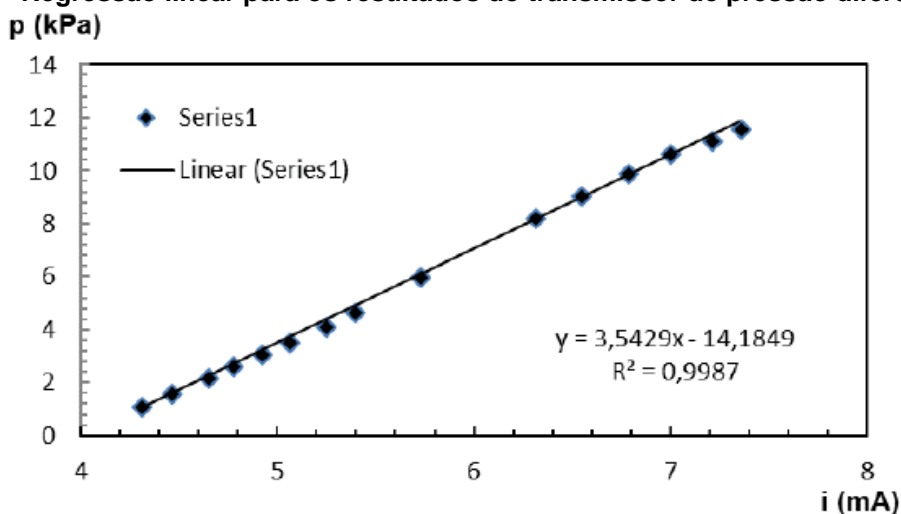
Para o medidor de pressão diferencial (I-5) é necessário coletar os dados de medidas de coluna d'água formada entre os pontos de tomada de pressão, por esta razão uma das tomadas de pressão foi aberta para a atmosfera, de modo que foram coletados os sinais correspondentes a quinze pontos diferente equivalentes à pressão relativa. A Tabela 13 apresenta os valores obtidos para caracterização do transmissor de pressão I-5 e a Figura 31 a curva de dispersão dos dados correspondentes. O coeficiente de regressão linear R^2 obtido foi a 0,9987.

Tabela 13 - Resultados obtidos para calibração do transmissor de pressão diferencial (I-5)

h (mm)	P (kPa)	Corrente elétrica (mA)
120	1,18	4,30
171	1,68	4,45
232	2,27	4,64
274	2,68	4,76
320	3,13	4,91
368	3,60	5,05
428	4,19	5,24
481	4,71	5,39
620	6,07	5,71
780	8,30	6,30
855	9,12	6,53
934	9,99	6,77
1004	10,69	6,99
1076	11,20	7,20
1022	11,65	7,35

Fonte: Elaboração própria.

Figura 31 - Regressão linear para os resultados do transmissor de pressão diferencial (I-5)



Fonte: Elaboração própria.

4.2 Testes preliminares de granulometria

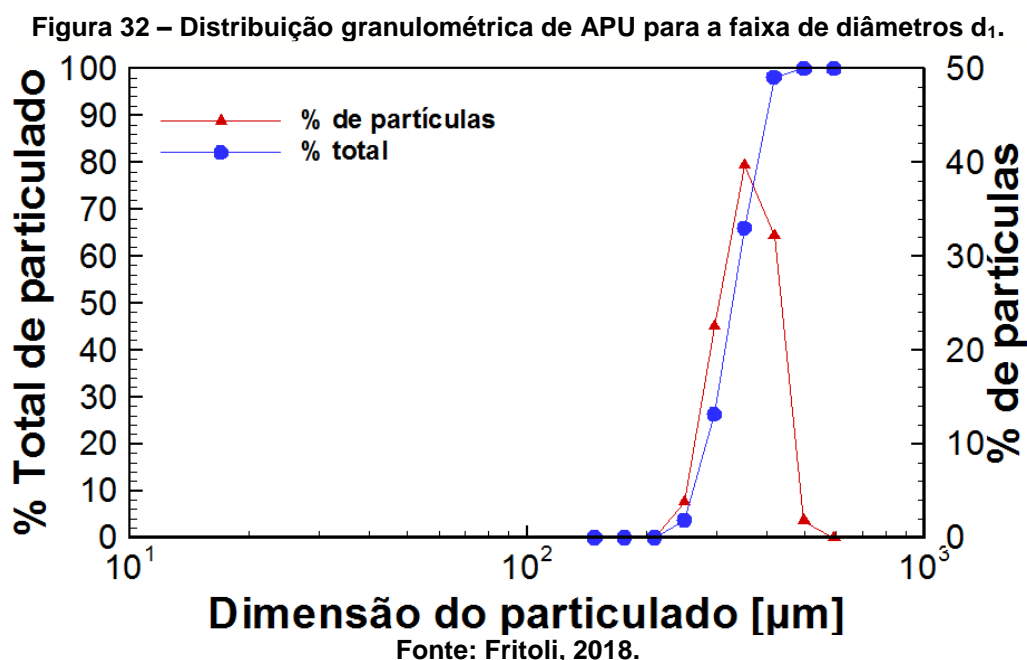
Para as partículas de abrasivo plástico de Urea (APU) dentro da faixa de diâmetros dp_1 , e a padrão dp_2 , cujas medidas encontram-se na Tabela 10, foram realizados testes para comprovar a dimensão das partículas informadas pelo fabricante. Os testes de granulometria foram realizados por Fritoli (2018), que utilizou as mesmas partículas APU para o estudo no qual avaliou experimentalmente o processo de filtração estático de formação de reboco particulado utilizando o filtro prensa API. Os experimentos permitem obter a distribuição granulométrica e o tamanho médio do material. Esta avaliação foi efetuada nas dependências do GrMaTS (Grupo de materiais, tribologia e superfícies) da UTFPR utilizando o equipamento Microtrac Flex (Microtrac, 2006). Este aparato utiliza a dispersão de raios laser direcionados à amostra em conjunto com propriedades óticas do particulado para determinar a distribuição granulométrica. Não obstante, o dispositivo permite que a medição seja realizada via úmida, quando as partículas estão suspensas em algum líquido, ou via seca. Considerando que, em seu estudo (assim como neste), todos os fluidos de trabalho são fluidos com base água, optou-se por utilizar soluções de água destilada com cada aditivo sólido. Ademais, esta metodologia diminui o risco de erros provenientes da aglomeração do material. A Tabela 14 compila os parâmetros de entrada dos testes (índice de refração) e compara os resultados obtidos com os informados pelos fabricantes.

Tabela 14 – Comparação entre a granulometria informada e a verificada para as partículas APU.

APU	d ₁	d ₂
Índice de Refração	1,55	1,55
Aspecto	Granular	Granular
Granulometria Fabricante [µm]	250 – 420	800 - 1200
Granulometria Experimento [µm]	220 - 450	700 - 1400
D ₅₀ [µm]	343,50	1022,50

Fonte: Adaptado de Fritoli, 2018.

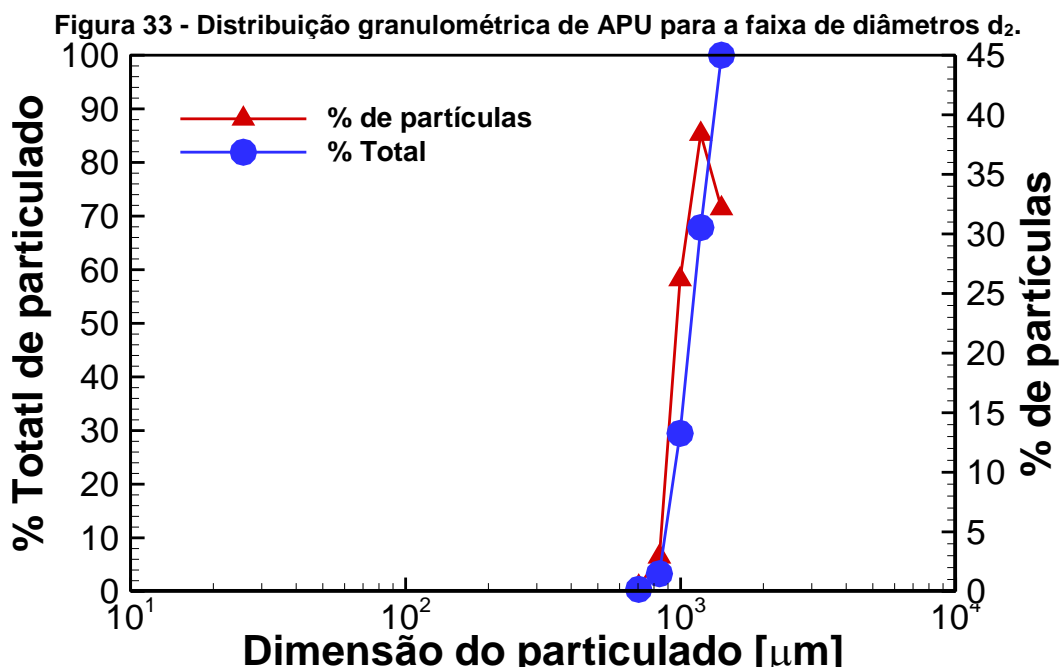
A análise isolada dos valores apresentados pode levar a conclusões errôneas haja vista que somente as dimensões máxima e mínima do particulado foram consideradas. De maneira a complementar os resultados, faz-se necessária a utilização das curvas de distribuição granulométrica, apresentadas nas Figura 32, para o abrasivo plástico de menor diâmetro, e na Figura 33 para o diâmetro padrão. Nestas figuras, o eixo das abscissas representa o diâmetro do particulado, plotado em escala logarítmica e o eixo principal das ordenadas é o percentual total de particulado, curva em azul. A ordenada secundária é a fração parcial de partículas para cada intervalo granulométrico, cujo resultado está representado em vermelho.



Os resultados obtidos para as partículas plásticas da Figura 32, apresentaram um intervalo de dimensões em concordância com o esperado com um diâmetro médio de 343 micrometros.

Na Figura 33, o material apresenta um comportamento uniforme, com grande quantidade apresentando dimensão dentro dos espectros informados, que corrobora os dados informados pelo fabricante.

Por fim, as partículas plásticas apresentaram um intervalo de dimensões levemente superior ao esperado com um diâmetro médio de 1095 μm .



Fonte: Fritoli, 2018

Conclui-se que os resultados obtidos apresentam pequenas variações em relação ao esperado, porém, de maneira geral, estão em concordância com os dados informados. Destaca-se que os testes permitiram a obtenção do diâmetro médio do particulado.

Deste modo, os dados da Tabela 10 necessitam ser atualizados para os dados obtidos experimentalmente, como apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 - Faixa de diâmetros atualizada pra as partículas APU.

APU	Faixa de valores	Unidade
d_1	0,22 – 0,45	mm
d_2	0,70 – 1,40	mm
d_3	1,19 – 1,68	mm

Fonte: Elaboração própria.

4.3 Reologia das formulações

Nos experimentos realizados neste trabalho foram utilizados dois tipos de fluidos: newtoniano e não newtoniano. Dentre os fluidos não newtonianos, três diferentes concentrações do aditivo polimérico carbopol foram utilizados fornecendo três diferentes valores para a viscosidade, à taxa mais alta do viscosímetro rotacional Fann 35A de 1000 s^{-1} , com o intuito de verificar a influência desta grandeza na geração da perda de carga. Dentre as três concentrações de carbopol que forneceram as viscosidades de 5, 10, e 20 cP (centipoise), a concentração padrão escolhida foi a que forneceu a viscosidade de 10 cP, à alta taxa, para efeito de comparação dos demais fatores (e.g., número de Reynolds, concentração do LCM, granulometria do LCM). Deste modo, o fluido padrão para realização dos testes foi definido como CBP 10, em que, CBP é a sigla para designar o aditivo carbopol, e o numeral 10 a viscosidade, à taxa de 1000 s^{-1} , correspondente ao fluido. A solução formulada com adição de glicerina em água, da mesma forma que o fluido padrão, possui viscosidade de aproximadamente 10 cP (GLI 10), para as taxas de deformações trabalhadas, e ainda assim um comportamento newtoniano possibilitando a comparação com os outros fluidos formulados com carbopol.

A quantidade aproximada de solução para serem efetuados os experimentos foi de 60 litros. Esta quantidade foi determinada de modo que o volume de fluido no tanque fosse suficiente para que as pás do misturador, que fazia a homogeneização da solução, ficassem completamente submersa no fluido, evitando o trabalho à seco. Obter uma solução estável de carbopol a partir da diluição no estado sólido (polimérico) em água é complexa e demorada. Por isso, ao invés da utilização do material na forma sólida, foi utilizado um gel clínico da empresa RMC muito utilizado na área da medicina na realização de ultrassons. O gel compõe-se de polímero carboxivinílico (carbopol), imidazolidil, ureia, metil parabeno, 2 amino, 2 metil, 1 propanol e água deionizada podendo ser obtido em quantidades de 5 kg.

Este gel possui melhor estabilidade como fluido de trabalho facilitando o processo de mistura.

A Tabela 16 expõe a relação de todos os fluidos que foram preparados para os experimentos, sendo η_{1000} a viscosidade do fluido na taxa de 1000 s^{-1} .

Tabela 16 - Relação de fluidos utilizados nos testes experimentais.

Fluido	Mistura	η_{1000} cP	Concentração de aditivo em água
CBP 5	Água + gel comercial	5	10%
CBP 10	Água + gel comercial	10	15%
CBP 20	Água + gel comercial	20	20%
GLI 10	Água+glicerina	10	61,4%

Fonte: Elaboração própria.

Para a obtenção da curva de viscosidade para os fluidos foi utilizado um aparelho viscosímetro rotacional modelo Fann 35 A (FANN, 2015), que pode ser observado na Figura 34. O viscosímetro é um equipamento mais robusto que os reômetros convencionais, porém mais imprecisos. Contudo, para este estudo, não seria necessário um equipamento com uma precisão tão apurada como a de um reômetro e optou-se pela utilização do viscosímetro, um equipamento de fácil manuseio e melhor portabilidade.

O funcionamento e manuseio do viscosímetro é muito simples. Ajustando uma rotação pré-definida, o aparelho exerce uma força sobre a amostra e a cisalha, provocando um ângulo de deflexão. As velocidades permitidas pelo instrumento são de 3, 6, 100, 200, 300, 600 rpm.

Figura 34 – Fann 35.



Fonte: Elaboração própria.

Com os valores para o ângulo de deflexão em função da rotação aplicada, determinam-se as tensões e as respectivas taxas de cisalhamento para cada amostra.

$$\tau = \frac{k_1 k_2 \theta}{10} \quad (21)$$

$$\dot{\gamma} = k_3 N \quad (22)$$

sendo τ a tensão [Pa], θ é o ângulo de deflexão medido em graus [°], N é a rotação aplicada [RPM], $\dot{\gamma}$ a taxa de cisalhamento [s^{-1}] e k_1 , k_2 e k_3 as constantes do instrumento apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17 - Constantes do equipamento.

Constante	Valor	Unidade
K₁	300	dina.cm/°
K₂	0,01323	1/cm ³
K₃	1,7023	1/s.rpm

Fonte: Fann, 2015.

A temperatura do ambiente onde os testes são realizados é controlada por um ar condicionado. Assim os testes experimentais devem acontecer à mesma temperatura as quais foram obtidas as curvas de escoamento das soluções, a fim de evitar variações significativas nas viscosidades.

Após a finalização dos preparos das soluções, pode-se obter outro importante parâmetro que será exigido para o cálculo do número de Reynolds que é a massa específica. A massa específica é calculada pela seguinte relação:

$$\rho_s = \frac{m_{s+r} + m_r}{V_s} \quad (23)$$

sendo que ρ_s é a massa específica do fluido, m_{s+r} a massa do recipiente preenchido, m_r massa do recipiente vazio e V_s o volume da amostra. Estas quantidades são obtidas com o auxílio de uma balança (Figura 35) e um recipiente graduado (Figura 36) de volume definido.

A seguir, são apresentados os resultados para as formulações dos fluidos que foram utilizados nos testes experimentais do presente trabalho.

Figura 35 – Tipos de balanças utilizadas: (a) Balança com precisão de uma grama, (b) Balança com precisão de um centésimo de grama.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 36 - Recipiente graduado



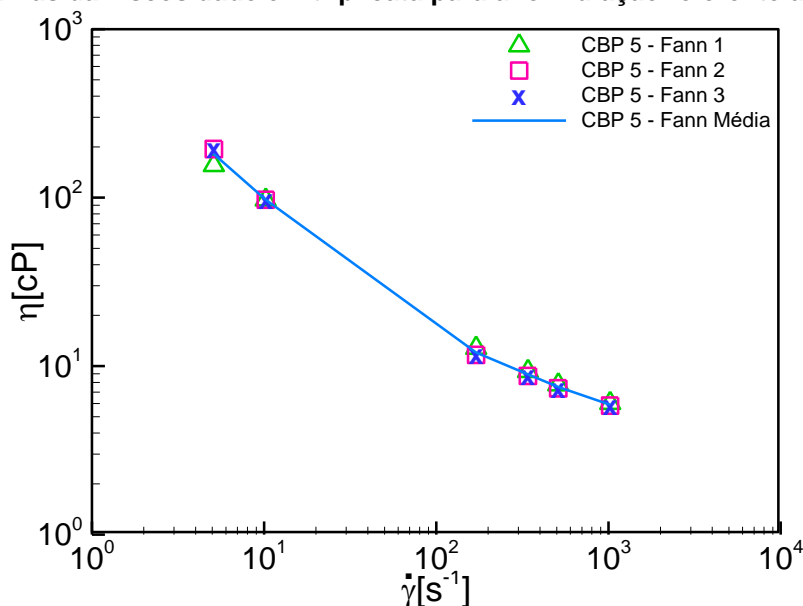
Fonte: Elaboração própria.

A Figura 37 apresenta os resultados da viscosidade em função da taxa de cisalhamento, ambas em escala logarítmica, para o fluido CBP 5, formulado com carbopol como aditivo. As medidas foram realizadas em triplicata, cada símbolo no gráfico representa uma medição, e a curva média foi plotada como uma linha cheia, como pode ser observado. Em seguida é mostrado um diagrama comparando os resultados, plotados com as médias das medições, obtidos para as três formulações diferentes de carbopol. Os dados obtidos em triplicata, tanto para a viscosidade como para as tensões, estão dispostos em tabelas no Apêndice A, para cada formulação. No Apêndice A, encontram-se também os dados referentes aos ajustes efetuados utilizando o modelo de Herchel-Bulkley.

Pode-se notar que existe uma pequena diferença entre medições o que é característico da repetibilidade do processo. Além disso, a maior variação de medida encontra-se na faixa das rotações mais baixas 3 e 6 rpm, respectivamente. Nestas taxas, mais baixas, aferição visual é muito mais significativa, pois uma variação de 0,5

grau na deflexão da mola pode representar uma variação na viscosidade de até 40 cP, enquanto nas rotações de 300 e 600 rpm (500 e 1000 s⁻¹, respectivamente) esta variação representa aproximadamente 1 cP. Entretanto, para maior concentração de carbopol na mistura (que provoca incremento na viscosidade) as diferenças entre as aferições são praticamente nulas. Existem casos particulares, em que o fluido não é formulado adequadamente, em que a viscosidade da formulação com carbopol apresenta um aumento da viscosidade para as taxas 300 e 600 rpm (500 e 1000 s⁻¹, respectivamente). Segundo Cruz (2012) e confirmado por Fritoli (2018), essa alteração resulta da turbulência presente no teste reológico por conta da baixa viscosidade da mistura. No caso deste trabalho, este fenômeno não ocorre, devido ao carbopol utilizado como aditivo ser na forma de gel o que possibilitou melhor homogeneização e por consequência ser melhor formulado.

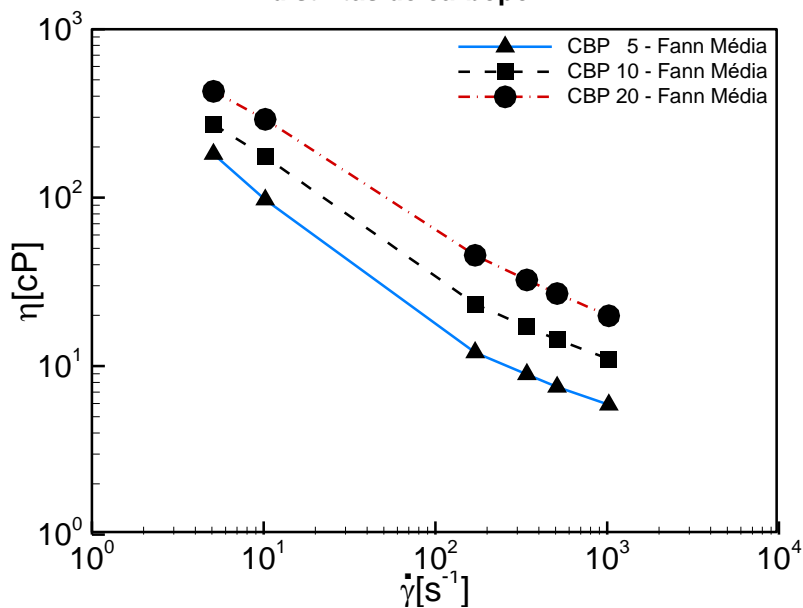
Figura 37 – Curvas da viscosidade em triplicata para a formulação referente ao fluido CBP 5.



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 38 apresenta a comparação entre as curvas médias de viscosidade para as três concentrações diferentes de carbopol (CBP 5, CBP 10, CBP 20). Pode-se observar que as curvas apresentam comportamentos semelhantes, característicos de fluidos viscoplásticos, o que era esperado nesta etapa. Observa-se o decaimento da viscosidade, até o valor de interesse, conforme a taxa de cisalhamento aumenta.

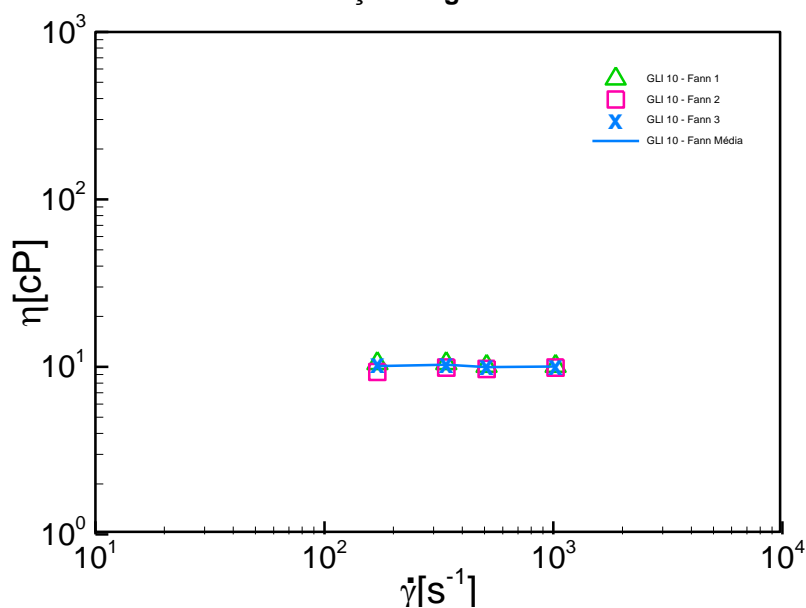
Figura 38 – Curvas de viscosidade média comparativas referentes às três concentrações distintas de carbopol.



Fonte: Elaboração própria.

Para a mistura glicerina-água a tabela de propriedades físicas de fluidos (DORSEY, 1940) do Anexo A foi empregada, para determinar a quantidade correta da concentração percentual de glicerina na mistura. Chegou-se ao valor aproximado de 60% de glicerina, para a obtenção da viscosidade desejada de 10 cP. A Figura 39 apresenta a curva de viscosidade em função da taxa de cisalhamento para a mistura.

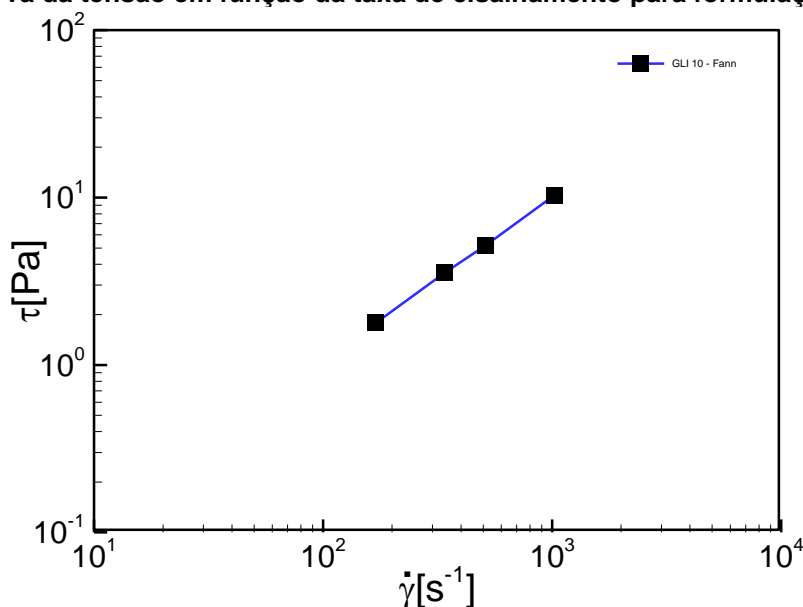
Figura 39 – Curva de viscosidade em função da taxa de cisalhamento, em triplicata, para a formulação de glicerina.



Fonte: Elaboração própria.

Para este fluido, os dois primeiros pontos aferidos (nas taxas mais baixas de 3 e 6 rpm) foram desconsiderados por se encontrarem muito distantes dos demais. Isso deve-se a precisão do equipamento, que impossibilita a leitura de ângulos menores à estas taxas. Os resultados obtidos apresentaram concordância com o esperado e pôde-se observar uma pequena variação, intrínseca à repetibilidade do experimento, dentro do normal se comparado as outras medições. Na Figura 40 a tensão em função da taxa de cisalhamento é plotada, da mesma forma, descartando os dois primeiros pontos de medições, pelos motivos já citados. A curva demonstra o crescimento de forma linear da tensão conforme aumenta-se a taxa de cisalhamento, comportamento característico dos fluidos newtonianos.

Figura 40 – Curva da tensão em função da taxa de cisalhamento para formulação de glicerina.



Fonte: Elaboração própria.

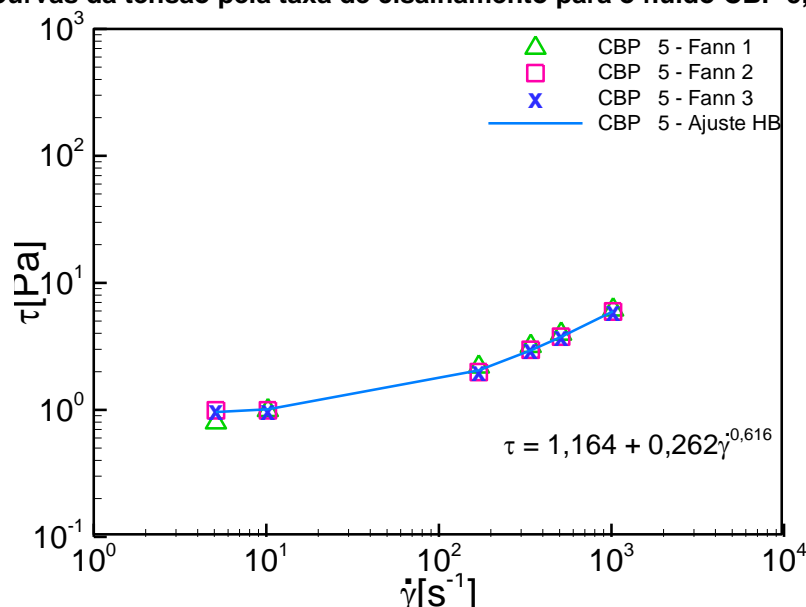
A Figura 41 apresenta as curvas de tensão por taxa de cisalhamento para o fluido CBP 5, em triplicata. A curva, em escala logarítmica para ambas as grandezas, apresenta um aumento da tensão com relação ao aumento da taxa de cisalhamento, após a superação da tensão limite de escoamento característica dos fluidos viscoplásticos. Além das aferições, relativas aos dados obtidos com o auxílio do viscosímetro, foi plotado o ajuste para o fluido utilizando o modelo proposto por Herschel-Bulkley, Equação (6), representado no diagrama como a linha cheia contínua. Os ajustes, bem como os valores de tensão e taxa de cisalhamento para as outras concentrações de carbopol encontram-se no Apêndice A. Os parâmetros, para

a realização dos ajustes, foram determinados como sendo os coeficientes da reta plotada, com o auxílio do programa LAB Fit, com os valores aferidos com o viscosímetro. A Equação (24) representa o ajuste pelo modelo Herschel-Bulkley para o fluido CBP 5:

$$\tau = 0,897 + 0,0163(\dot{\gamma})^{0,8281} \quad (24)$$

As outras equações para os ajustes dos fluidos CBP 10 e CBP 20 podem ser encontrados no Apêndice A, juntamente com a relação dos parâmetros destas equações.

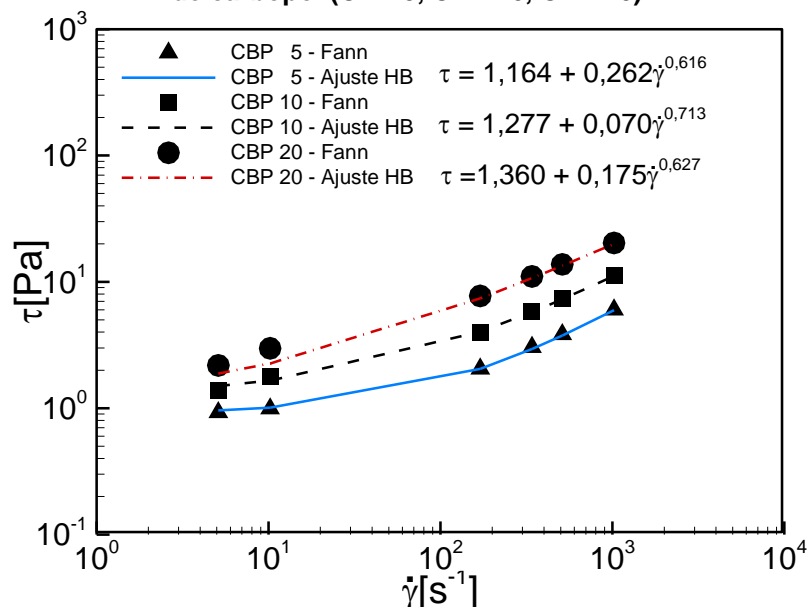
Figura 41 – Curvas da tensão pela taxa de cisalhamento para o fluido CBP 5, em triplicata.



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 42 apresenta a comparação entre as curvas médias de tensão com relação à taxa de cisalhamento para os três fluidos não newtonianos. No gráfico, os símbolos representam as médias das aferições com o viscosímetro Fann 35A e as linhas representam os ajustes para cada formulação. Nota-se, que os ajustes apresentam concordância com os dados experimentais. Ademais, pode-se observar o aumento da tensão conforme a concentração de carbopol também aumenta.

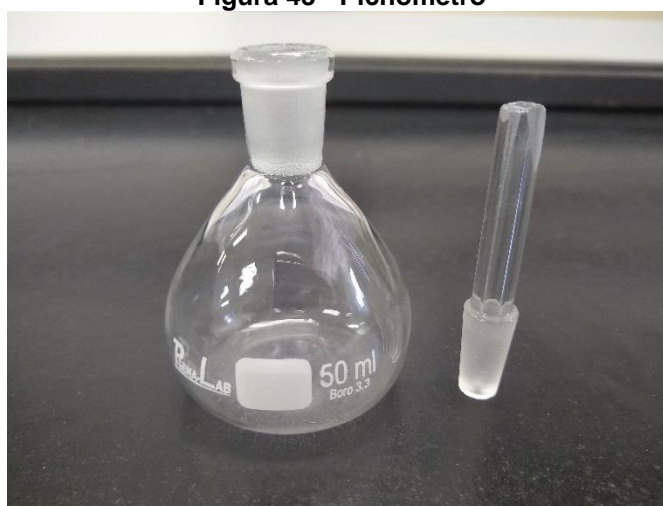
Figura 42 – Curvas de tensão médias comparativas referentes às três concentrações distintas de carbopol (CBP 5, CBP 10, CBP 20).



Fonte: Elaboração própria.

Assim como a viscosidade e a tensão de cisalhamento, a massa específica de cada formulação foi obtida mediante três medições a cada teste. O processo de obtenção da massa específica consistiu em coletar uma pequena amostra de 50 ml da mistura, com o recipiente da Figura 43 e pesar a massa contida.

Figura 43 - Picnômetro



Fonte: Elaboração própria.

Com o resultado obtido, utilizando a Equação (25), foi possível a obtenção dos valores expostos na tabela.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (25)$$

Tabela 18 - Massa específica das formulações.

Fluido	$m_{\text{méd}}$ [g]	ρ_s (20°C) [kg/m ³]
CBP 5	50,98	1019,6
CBP 10	51,00	1020
CBP 20	51,01	1020,2
GLI 10	58,90	1178

Fonte: Elaboração própria.

4.4 Parâmetros de variação

Os experimentos propostos são divididos em quatro grupos: avaliação da influência do tipo de fluido, da viscosidade da mistura, da concentração de LCM, da distribuição granulométrica das partículas e do número de Reynolds. Para cada análise, um fluido padrão é formulado e somente as propriedades de interesse são alteradas. A Tabela 19 apresenta a gama de parâmetros de variação e as configurações dos testes realizados. O fluido padrão é a configuração 4, em que a viscosidade, para a taxa mais alta, da mistura encontra-se na faixa de 10cP, $Re=100$, a partícula utilizada possui a faixa de diâmetro intermediária (d_2) e concentração percentual de 2%. A escolha das faixas de número de Reynolds variadas, foram determinadas a partir das características estruturais do aparato experimental e do escoamento, como é explicado na Seção 4.10. As informações particulares referentes aos experimentos são devidamente fornecidas nas seções específicas, a seguir, à cada parâmetro variado.

Tabela 19 - Parâmetros de variação.

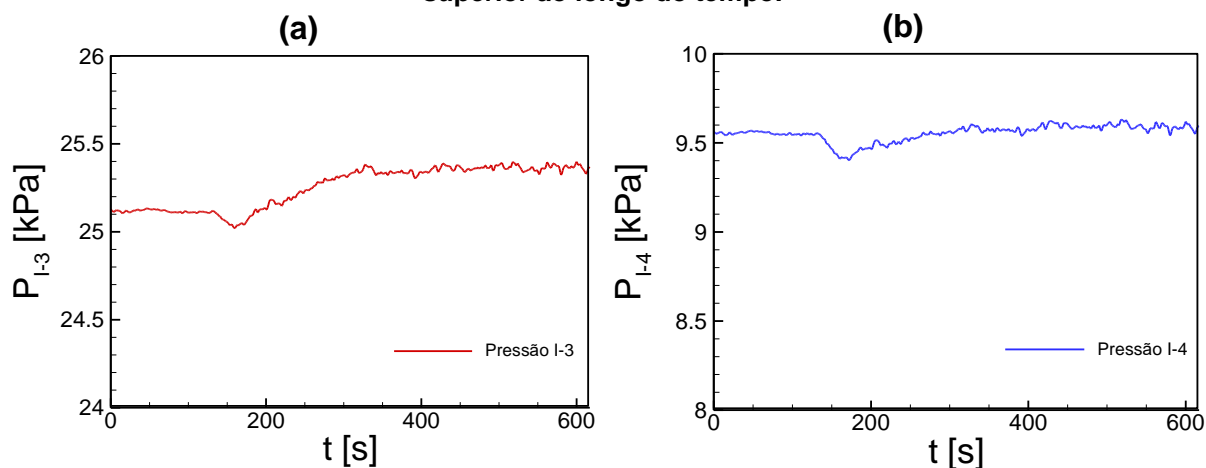
Configuração	Fluido	η_{1000} (cP)	Número de Reynolds	Granulometria	Concentração de partícula
1	GLI 10	10	200	dp_2	2%
2	CBP 5	5	100	dp_2	2%
3	CBP 20	20	100	dp_2	2%
4	CBP 10	10	100	dp_2	2%
5	CBP 10	10	150	dp_2	2%
6	CBP 10	10	200	dp_2	2%
7	CBP 10	10	100	dp_1	2%
8	CBP 10	10	100	dp_3	2%
9	CBP 10	10	100	dp_2	1%
10	CBP 10	10	100	dp_2	3%

Fonte: elaboração própria.

4.5 Teste padrão

Nesta seção, será descrito o modo como foram realizados os testes experimentais. Todos os testes seguiram o mesmo modelo padrão, que consistiu em medir a pressão no interior do canal da seção de testes, entre os dois transdutores de pressão relativa, até a estabilização da pressão. No início dos testes, o tanque misturador possuía no interior apenas o fluido de trabalho, ou seja, sem material particulado. Então os testes tinham início, e mediam-se as pressões relativas nos pontos I-3 e I-4, da seção de teste, geradas apenas pelo fluido. Decorrido um certo período de tempo, no instante de 120 s, as partículas eram injetadas no tanque misturador e a pressão no interior da seção de testes começava a aumentar. A Figura 44(a) apresenta os resultados de pressão inferior ao longo do tempo do teste padrão para o fluido CBP10, e (b) a pressão superior ao longo do tempo para o mesmo caso.

Figura 44 - Teste padrão para o CBP 10: (a) Pressão inferior ao longo do tempo, (b) Pressão superior ao longo do tempo.



Fonte: Elaboração própria.

A diferença de pressão no canal é calculada automaticamente pelo LabVIEW, pela Equação (26):

$$\Delta P = P_{I-3} - P_{I-4} \quad (26)$$

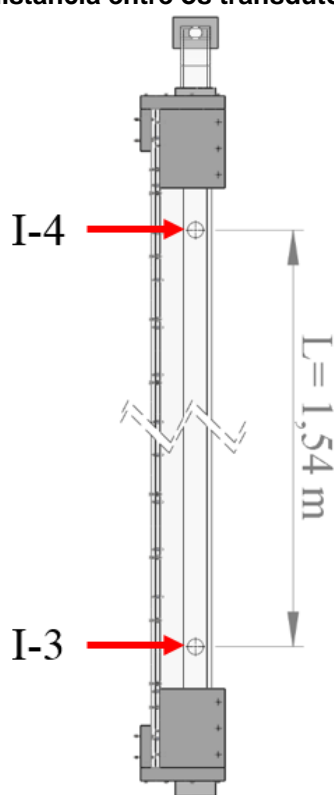
sendo P_{I-3} a pressão, em [kPa] medida pelo transdutor de pressão inferior do canal e P_{I-4} a pressão, em [kPa] medida pelo transdutor de pressão superior. O gradiente de

pressão no canal é obtido dividindo a Equação (26) pela distância entre os dois transdutores, que pode ser observada na Figura 45. Assim, o gradiente de pressão pode ser calculado pela Equação (27):

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{P_{I-3}}{L} - \frac{P_{I-4}}{L} \quad (27)$$

sendo $\Delta P/L$ o gradiente de pressão no canal medido em [kPa/m] e L é a distância entre os pontos I-3 e I-4, medido em [m].

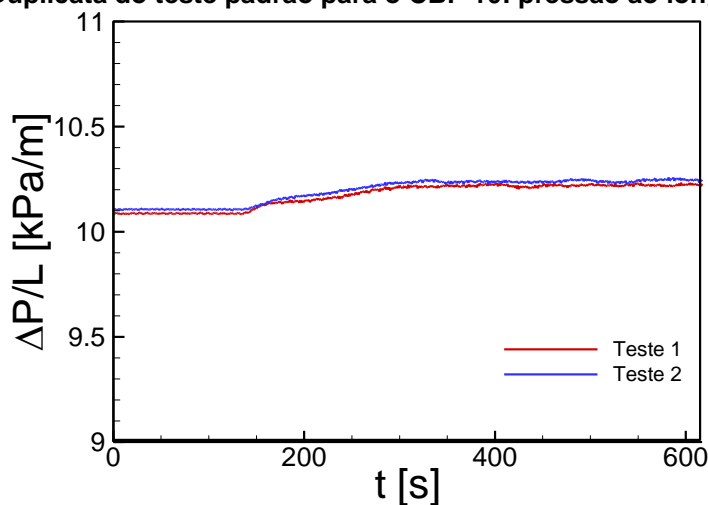
Figura 45 - Indicação da distância entre os transdutores de pressão, I-3 e I-4.



Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 46, foram plotadas as curvas do gradiente de pressão ao longo do tempo para o CBP10. Não foram preciso mais que dois testes para verificar a concordância dos resultados, por este motivo cada experimento foi realizado duas vezes. Exceto para o experimento de GLI10, em que houve uma grande divergência de resultados para os testes 1 e 2, neste caso fez-se um terceiro teste para a comprovação de resultados.

Figura 46 - Duplicata do teste padrão para o CBP 10: pressão ao longo do tempo.



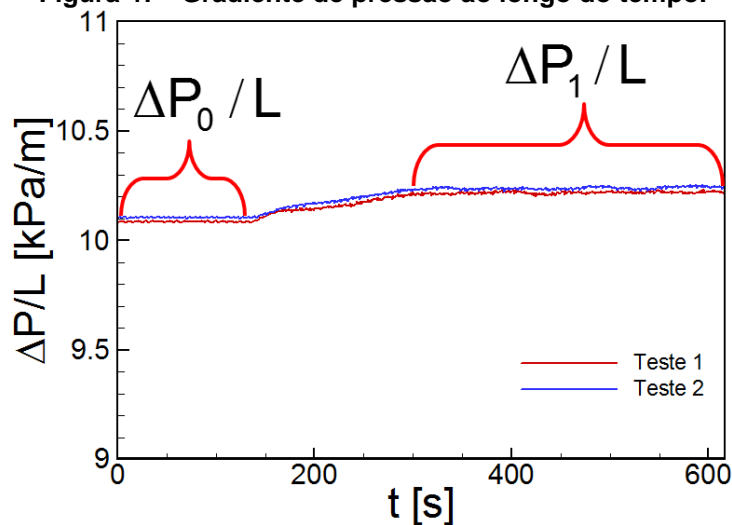
Fonte: Elaboração própria.

Para analisar o quanto a adição de LCM interferia no gradiente de pressão no canal, foi definida outra variável a qual é medida a média dos valores do gradiente de pressão antes da injeção das partículas e depois da injeção das partículas. Esta nova variável pode ser expressa pela Equação (28):

$$\Delta P^* = \frac{\Delta P_1}{L} - \frac{\Delta P_0}{L} \quad (28)$$

sendo $\Delta P_0/L$ a diferença do gradiente de pressão sem partículas e $\Delta P_1/L$ a diferença do gradiente de pressão com as partículas, ambos medidos em kPa/m. A Figura 47 ilustra estas diferenças com relação ao gradiente de pressão com e sem partículas.

Figura 47 - Gradiente de pressão ao longo do tempo.

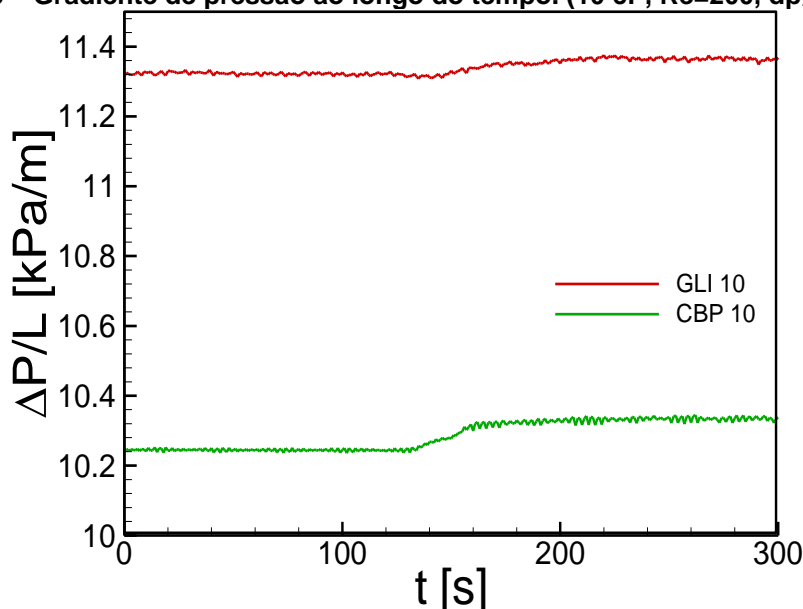


Fonte: Elaboração própria.

4.6 Influência do tipo de fluido

Um dos objetivos deste trabalho é fazer uma comparação entre os tipos de fluido (newtoniano e não newtoniano) e qual a influência dos mesmos na geração de pressão, perda de carga, em escoamento particulado. Os fluidos comparados possuem basicamente a mesma viscosidade (à taxa mais alta de 1000 s^{-1}), 10 cP. Para os experimentos de comparação entre os dois fluidos foram utilizadas as configurações 1 e 6 da Tabela 19 da Seção 4.4. O fluido GLI10 representando o fluido newtoniano e o fluido CBP10, não newtoniano. Utilizando o restante dos parâmetros iguais para ambos experimentos, a Figura 48 apresenta os resultados do gradiente da perda de carga em função do tempo para os dois tipos de fluido.

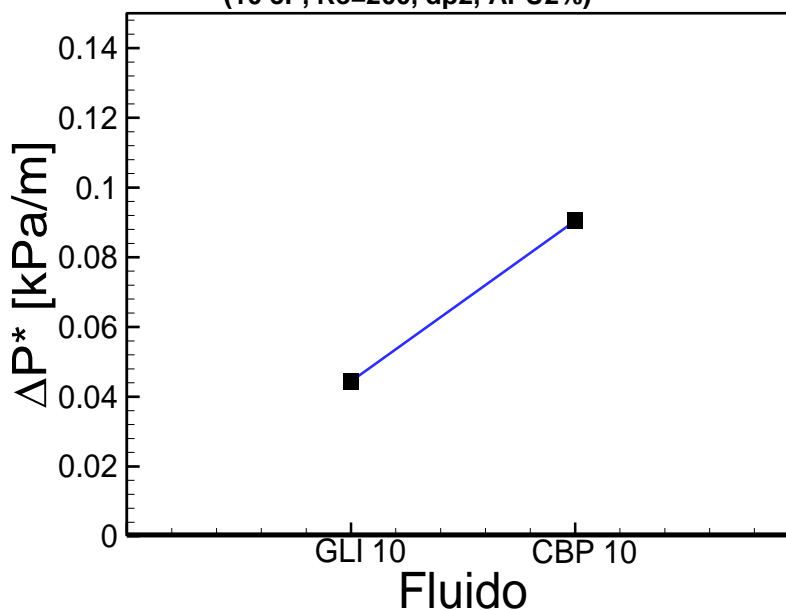
Figura 48 – Gradiente de pressão ao longo do tempo. (10 cP, $Re=200$, dp_2 , APU2%)



A análise dos resultados demonstra a influência da massa específica na pressão gerada pelo escoamento na seção de testes. O fluido GLI 10 supera o CBP 10 em aproximadamente 1,0 kPa na pressão gerada no canal, nos instantes iniciais, antes da injeção das partículas. O comportamento entre as duas curvas é semelhante, no instante 120s as partículas são injetadas no tanque misturador. Cerca de 20 s após a injeção, a pressão em ambos os casos começa a crescer. Os dois casos levam praticamente o mesmo tempo até que a pressão atinja a estabilidade, tipificando o regime permanente. A partir do instante 180 s o gradiente de pressão varia muito pouco, de maneira que se pode considerar constante deste momento em diante. Fica evidente, apenas observando o visual de ambas as curvas, que o CBP 10 tem maior

perda de carga em relação ao início do teste, antes da ação das partículas. Percebe-se que devido a GLI 10 ter maior massa específica que o CBP 10, as partículas têm menor influência na perda de carga do escoamento, já que o peso molecular do próprio fluido em questão tem a maior influência na geração de pressão. Isto é comprovado pelo gráfico da Figura 49, no qual é plotada a diferença da perda de carga (ΔP^*) para cada fluido.

Figura 49 - Diferença do gradiente de pressão em função do tipo de fluido.
(10 cP, Re=200, dp2, APU2%)



Analisando a Figura 49, é possível chegar à conclusão que a injeção de LCM ao escoamento, acarreta uma diferença de pressões, com e sem partículas, para o CBP10, maior que o dobro da diferença causada para a GLI10. Embora a pressão inicial, sem as partículas, ser maior para a GLI10 do que para o CBP10.

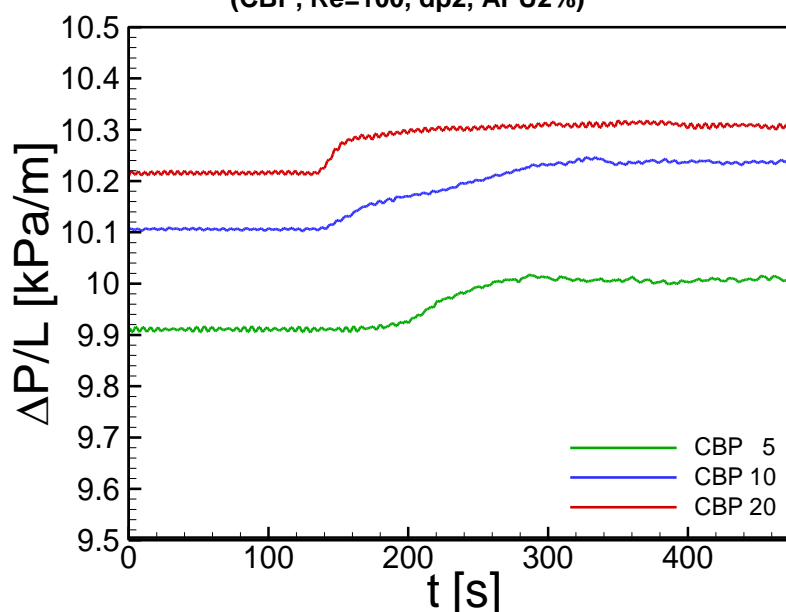
4.7 Influência da concentração de CBP

Com o intuito de verificar a influência da concentração de CBP na perda de carga (representada pelo gradiente de pressão) no canal da seção de teste, foram realizados testes experimentais com três configurações diferentes (configurações: 2, 3 e 4) apresentadas na Tabela 19. Os fluidos utilizados foram três misturas com diferentes concentrações (10%, 15% e 20%) de carbopol, com viscosidades diferentes entre si, com a mesma configuração para o número de Reynolds, concentração e granulometria de partículas.

Cada experimento foi realizado sob as mesmas condições de pressão e temperatura, o fluido foi preparado e foi coletada uma amostra para realização do teste reológico antes do início dos testes.

A Figura 50 apresenta os resultados da perda de carga ao longo do tempo para as três configurações de interesse. No período que vai de 0s até 120s, o escoamento (para os três casos) é monofásico, apenas com o fluido não newtoniano no tanque. No tempo de 120s ocorre a injeção das partículas de APU no tanque, causando a elevação da pressão e conseqüentemente perda de carga. O tempo decorrido até o final de cada experimento é determinado pelo tempo em que o escoamento entra em regime permanente, no qual a variação de pressão no interior do canal permanece constante.

Figura 50 - Gradiente de pressão ao longo do tempo: influência da viscosidade da mistura. (CBP, Re=100, dp2, APU2%)

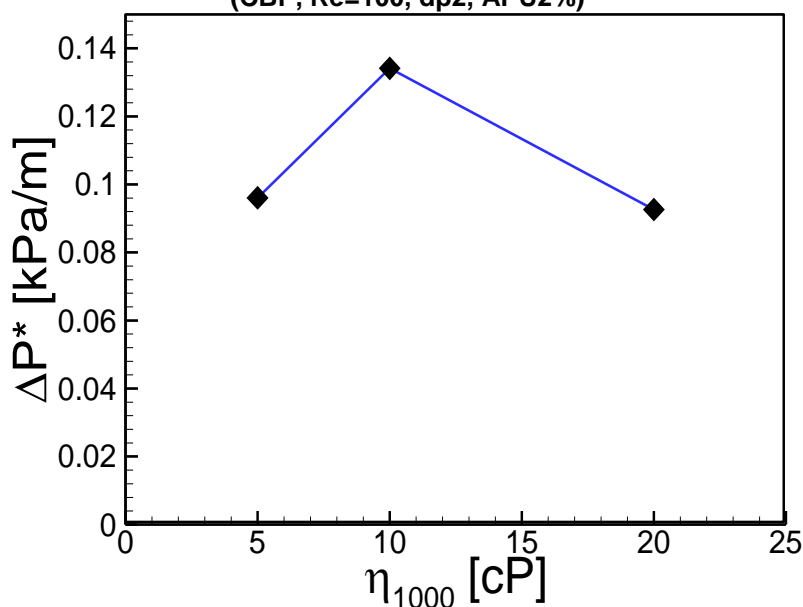


Observa-se pelo gráfico da Figura 50, que quanto maior é a viscosidade, à alta taxa de 1000 s^{-1} , da mistura mais rápido é a elevação da pressão na seção de teste quando as partículas são injetadas. Para viscosidades mais altas, as partículas injetadas no tanque são carregadas mais facilmente pelo fluido ao longo da tubulação, e conseqüentemente chegam mais rapidamente até a seção de teste, por isso a elevação da pressão ocorre de maneira mais rápida. Constata-se, que para os fluidos CBP 5 e CBP 10, o escoamento atinge o regime permanente praticamente no mesmo patamar temporal, por volta de 320s. Enquanto para o fluido com a viscosidade de

20cP, a partir do instante 200s a pressão no escoamento já não apresenta variação significativa.

A Figura 51 apresenta os resultados para o ΔP^* em função da concentração de CBP (10%, 15% e 20%) em água, que geram as diferentes viscosidades à taxa de 1000 s^{-1} (5 cP, 10 cP e 20 cP).

Figura 51 - Diferença do gradiente de pressão em função da viscosidade à taxa de 1000 s^{-1} .
(CBP, $Re=100$, dp_2 , APU2%)



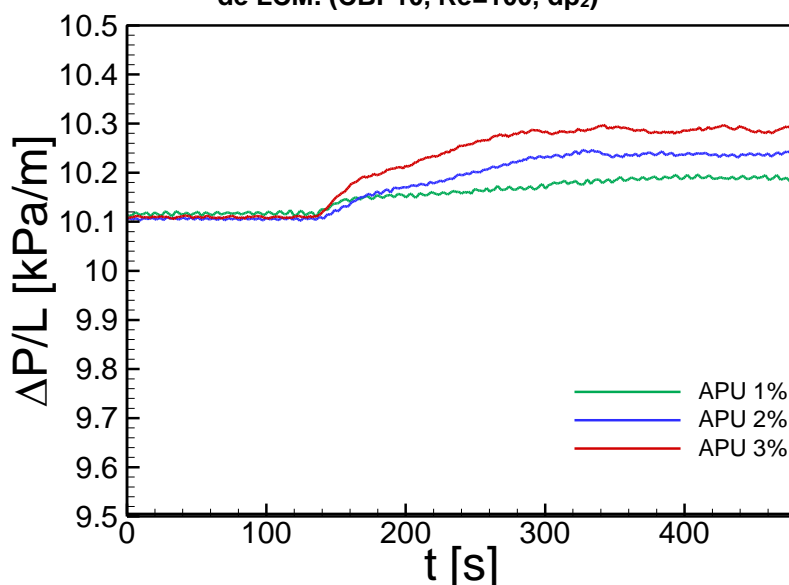
Pela Figura 51 pode-se notar que existe um ponto de máximo na diferença do gradiente de pressão, gerada pela adição de LCM. Esse ponto indica que, acima da concentração de 15% de CBP (CBP10) à mistura, a diferença entre as pressões, sem a adição de partículas e com a adição de partículas, tende a diminuir.

4.8 Influência da concentração de LCM

Para a verificação da influência da concentração de partículas sobre a perda de carga, foram realizados testes com três concentrações diferentes de partículas APU referentes às configurações 4 (padrão), 9 e 10 apresentadas na Tabela 19. Os resultados do gradiente de pressão ao longo do tempo, para estes experimentos, estão expostos na Figura 52. Foram utilizados o mesmo fluido e número de Reynolds ($Re = 100$) para os testes e pode-se constatar que nos instantes iniciais dos experimentos, sem a presença de LCM, o patamar de pressão é praticamente o mesmo para os três casos. Em 120s, foi realizada a injeção de APU no tanque.

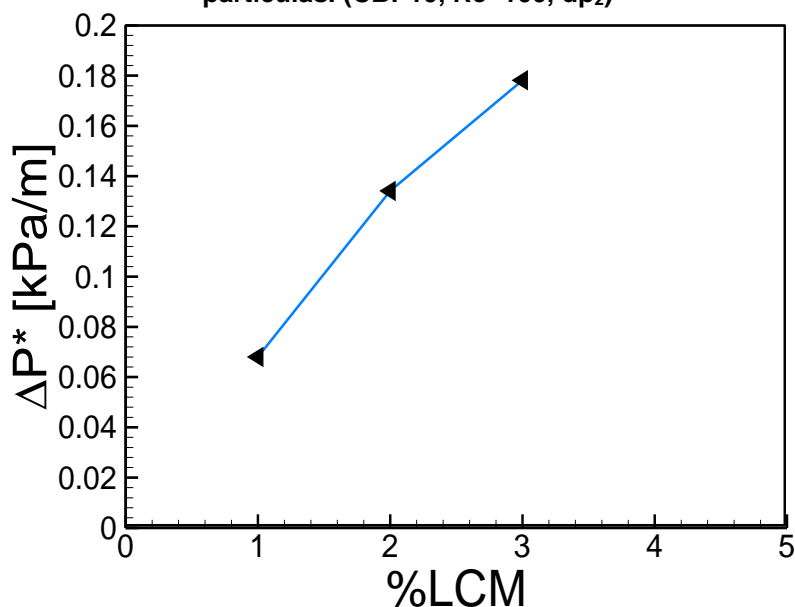
Verifica-se, pelos resultados apresentados na Figura 52, que para as três concentrações diferentes de APU, o aumento da pressão acontece por volta do mesmo instante de tempo, por volta de 140s. Embora o patamar de perda de carga atingido para os três casos seja diferente, o instante em que os escoamentos atingem o regime permanente é semelhante, 340s. Além disso, quanto maior a concentração de partículas, maior será a perda de carga no canal.

Figura 52 - Gradiente de pressão em função do tempo: influência da concentração percentual de LCM. (CBP10, $Re=100$, dp_2)



Na Figura 53, pode ser observado a evolução do ΔP^* em função da concentração de LCM.

Figura 53 – Diferença do gradiente de pressão em função da concentração percentual de partículas. (CBP10, Re=100, dp₂)

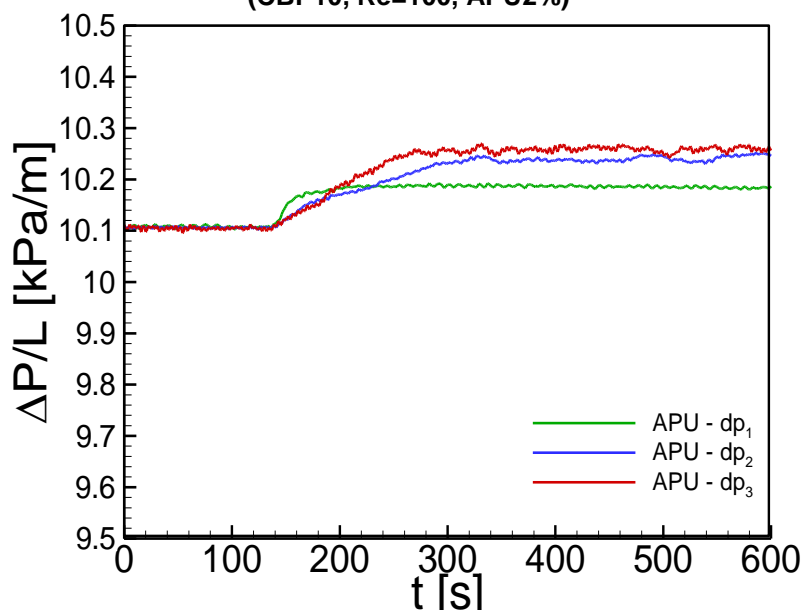


Quando aumenta-se a concentração de partículas no escoamento existe um aumento no ΔP^* , considerando o número de Re analisado.

4.9 Influência da granulometria do LCM

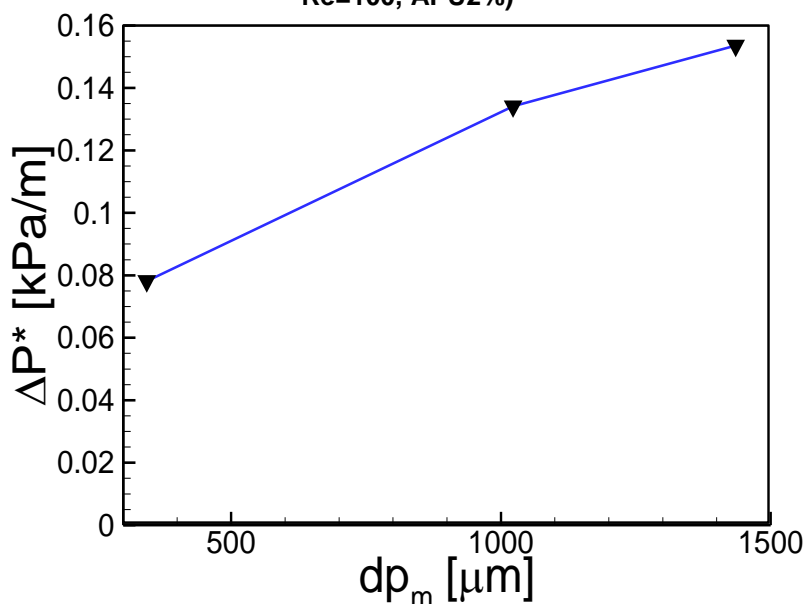
Com relação à granulometria do material particulado, a Figura 54 apresenta os resultados da influência do diâmetro na perda de carga do sistema ao longo do tempo. Os resultados foram plotados para o mesmo fluido de trabalho, CBP10, seguindo as configurações 4 (padrão), 7 e 8 apresentadas na Tabela 19. Mais uma vez, as partículas foram injetadas no tanque misturador a partir do instante 120s. A partir deste momento a perda de carga aumenta à medida que as partículas vão sendo carregadas pelo escoamento. Percebe-se que quanto maior o diâmetro médio das partículas, mais elevada é a perda de carga no escoamento. Porém, entre os diâmetros dp₂ (0,8 – 1,2 mm) e dp₃ (1,2 – 3,5 mm) a perda de carga apresentou pouca alteração no patamar final, em regime permanente.

Figura 54 - Gradiente de pressão ao longo do tempo: influência da granulometria do LCM. (CBP10, Re=100, APU2%)



Com o menor diâmetro, dp_1 , o sistema entrou mais rapidamente em regime permanente, por volta de 200s, e a perda de carga, gerada pela presença das partículas, foi aproximadamente metade da perda gerada pelas partículas de maior granulometria. A variação do gradiente de pressão entre as configurações com diâmetros dp_1 e dp_2 foi superior, 0,05 kPa/m, se comparada à variação entre os diâmetros dp_2 e dp_3 que foi de 0,02 kPa/m. Essas variações podem ser observadas pelo gráfico da Figura 55, em que o ΔP^* encontra-se em função do diâmetro médio (dp_m) do LCM.

Figura 55 – Diferença do gradiente de pressão em função do diâmetro das partículas. (CBP10, Re=100, APU2%)



A diferença do ΔP^* entre dp_1 e dp_2 deve-se à dp_1 ser muito menor que dp_2 . As partículas com diâmetro dp_2 possuem praticamente o triplo de tamanho em relação as partículas com dp_1 . Esta diferença diminui de dp_2 para dp_3 , onde o diâmetro médio das partículas não possui alteração tão significativa de um para o outro.

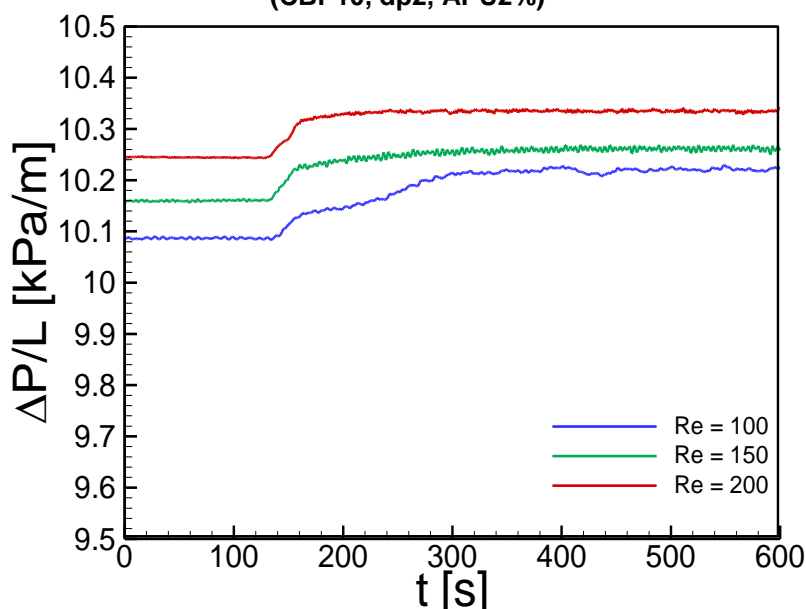
4.10 Influência do número de Reynolds

O número de Reynolds do escoamento foi variado utilizando a configuração padrão 4 (CBP10, dp_2 , APU2%), com a finalidade de avaliar a influência do aumento da vazão na seção de teste. As faixas, para as quais o número de Reynolds foi variado, foram escolhidas de acordo com as limitações do aparato experimental e características de escoamento. A menor faixa, $Re = 100$, foi determinada pelo fato de que abaixo deste patamar, o fluido utilizado no teste, não faz o carregamento adequado do material particulado. Pouca quantidade de partículas é levada à seção de teste, o que acaba por não representar um aumento suficiente para análise na perda de carga. Não obstante, a faixa superior do número de Reynolds, $Re = 200$, foi determinada por ser o valor que forneceu pressão na extremidade inferior do canal próximo ao limite estrutural das vedações e flanges do aparato experimental, ou seja, 30 kPa. Por ser arriscado trabalhar com pressões acima deste valor (poderia ocorrer

fissuras e quebra da seção de testes) optou-se por limitar o Re à 200, como limite superior.

A Figura 56 apresenta os resultados do gradiente de pressão ao longo do tempo para este experimento. Pode-se notar que conforme aumenta-se o número de Re, o gradiente de pressão inicial do escoamento no canal (sem partícula) também aumenta. Observa-se que quando o Re aumenta, o escoamento entra mais rapidamente em regime permanente. Para os valores de Re iguais a 150 e 200, o gradiente de pressão atinge o regime permanente praticamente no mesmo instante. Isso porque o aumento de velocidade no canal, facilita o transporte de LCM e assim as partículas chegam mais rapidamente à seção de testes.

Figura 56 - Gradiente de pressão em função do tempo: influência do número de Reynolds. (CBP10, dp2, APU2%)

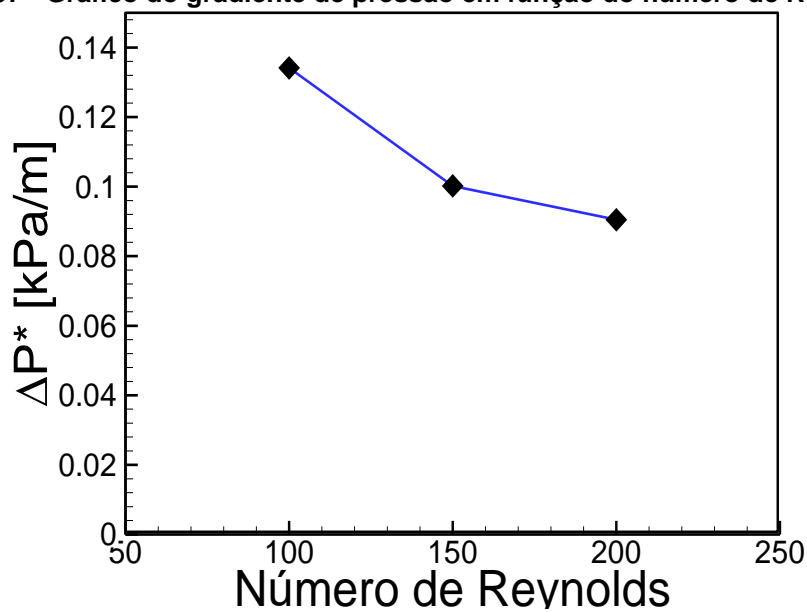


Com o Re=100, a velocidade do escoamento é mais baixa, portanto, o escoamento demora muito mais tempo para atingir a estabilidade após a injeção das partículas. No entanto, é evidente, que o aumento na perda de carga gerada pela adição das partículas é maior que para os Re de 150 e 200. Neste caso, as partículas possuem influência maior na geração da pressão do escoamento do que nos outros dois casos em que a velocidade do escoamento é mais influente.

Para as faixas maiores do número de Reynolds (150, 200) a diferença do gradiente de pressão gerada pelas partículas foi praticamente a mesma em ambos os casos (0,10 e 0,09 kPa/m respectivamente), como mostra a Figura 57. A medida que

se aumenta o Re observa-se que a diferença entre as pressões, com e sem partículas, tende a diminuir, o que indica a existência de um possível patamar de diferença de perda de carga. Esse patamar está associado a alguma configuração de material particulado (e.g. massa específica, diâmetro, concentração).

Figura 57 - Gráfico do gradiente de pressão em função do número de Reynolds.



5 Conclusões

O presente trabalho apresentou uma análise experimental da perda de carga gerada pela adição de materiais de perda de circulação (LCM) para escoamentos com fluidos não newtonianos em canal vertical.

Primeiramente, foram apresentados conceitos básicos referentes à mecânica dos fluidos e definições importantes acerca da reologia, bem como de processos de calibração de instrumentos, visando fundamentar o problema estudado e os resultados obtidos. Também foram apresentados todos os componentes da unidade experimental utilizada para o desenvolvimento deste trabalho, desde os equipamentos e características (bomba, tanque, instrumentos de medição instalados) até o projeto de confecção da seção de testes assim como a metodologia para formulação dos fluidos com material particulado.

Antes de realizar quaisquer testes preliminares, todos os instrumentos de medição foram aferidos, tendo como objetivo uma maior confiabilidade dos dados obtidos através dos testes. Testes de granulometria para o material particulado foram realizados para comprovar a faixa granulométrica informada pelo fabricante. Os resultados mostraram concordância com os dados fornecido, e foi possível obter o diâmetro médio das partículas pelos testes efetuados.

Foram realizados testes reológicos, para a determinação das curvas de escoamento dos fluidos (mistura) formulados com água-glicerina e carbopol-água, utilizados nos experimentos. O objetivo foi determinar a concentração de aditivo (e.g. carbopol, glicerina) que fornece as viscosidades de 5, 10 e 20 cP, na taxa mais alta do viscosímetro (1000 s^{-1}). Também foi determinada a massa específica dos fluidos, em que foi verificado que a mistura água-glicerina possui massa específica maior que a mistura de água-carbopol, ambos com viscosidade de 10 cP à taxa de 1000 s^{-1} .

Para este trabalho foi elaborado o procedimento operacional padrão (P.O.P) desenvolvido e apresentado em três etapas. O procedimento possibilitou que os experimentos fossem realizados de forma uniforme, diminuindo o risco de acidentes e fornecendo informações a respeito do descarte dos fluidos e partículas utilizados.

Com os procedimentos definidos, foram efetuados os experimentos para avaliar a influência das diferentes combinações fluido-partícula na geração da perda de carga no canal da seção de testes. Os resultados obtidos, para a variação do tipo de fluido

mantendo os demais parâmetros (e.g. Re, viscosidade, diâmetro das partículas, concentração de partículas) constantes, demonstraram que os LCM tiveram pouca influência ao interagir com o fluido newtoniano, GL10, o qual possui maior massa específica. Isto porque, a massa específica do fluido foi a principal fonte de pressão no escoamento, ofuscando a presença do material particulado. A influência do LCM foi muito superior em conjunto com o fluido não newtoniano, CBP10.

Os resultados para o aumento do valor da viscosidade, à taxa de 1000 s^{-1} , do fluido não newtoniano mostraram que, a perda de carga gerada pela concentração de partículas diminui, ou seja, a viscosidade tem, neste caso, maior influência na geração da pressão no canal. Foi possível verificar que existe um ponto ótimo para o aumento da perda de carga em relação ao aumento da viscosidade para a taxa mais alta. Para o fluido formulado com carbopol, o crescimento da viscosidade entre 5 e 10 cP, facilitou a interação das partículas com o fluido gerando acréscimo também na perda de carga do escoamento.

Como esperado, o aumento da concentração, ou seja, da quantidade de partículas no escoamento, gera um aumento gradativo da perda de carga no canal. Com o aumento da concentração de LCM o sistema demora mais tempo para entrar em regime permanente, a pressão aumenta de forma mais lentamente.

Com relação ao diâmetro do LCM, quanto maior o diâmetro médio das partículas, mais elevada é a perda de carga no escoamento. Porém, entre os diâmetros dp_2 e dp_3 a perda de carga apresentou pouca alteração no patamar final, em regime permanente. Utilizando o menor diâmetro, dp_1 , o sistema entrou mais rapidamente em regime permanente, por volta de 200s, e a perda de carga, gerada pela presença das partículas, foi aproximadamente metade da perda gerada pelas partículas de maior granulometria.

Por fim, foi variado o número de Reynolds no canal. Os resultados demonstraram que a maior influência do Re foi observada para a faixa mais baixa ($Re = 100$), para o qual foi obtido um acréscimo de $0,13 \text{ kPa/m}$ à diferença do gradiente de pressão. Para as faixas superiores (150, 200) o aumento da perda de carga foi inferior e alcançou praticamente o mesmo patamar em ambos os casos, $0,10 \text{ kPa/m}$.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Considerando as frentes de estudo desenvolvidas pelo LaMP-CERNN-UTFPR os resultados deste trabalho servem como base para diferentes aplicações de LCM's em conjunto com fluidos não newtonianos (e.g. tamponamento de fratura, formação de reboco, formulação de fluidos de perfuração). Muitos outros estudos podem ser realizados a partir dos resultados do presente trabalho, e visando a melhoria na condução destes estudos, nesta seção serão elencadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- I. Desenvolver nova metodologia para efetuar a separação da solução fluido-partícula, para otimizar processo de peneiração, e assim não consuma tempo demasiado grande entre a repetição dos experimentos;
- II. Utilização de diferentes fluidos não newtonianos (e.g., pseudoplástico, viscoplástico);
- III. Utilizar granulometrias com faixas diferentes para os diâmetros;
- IV. Utilizar diferentes tipos de LCM's com materiais diferentes (e.g., esferas de vidro, esferas de acrílico);
- V. Utilizar conjunto de diferentes tipos de LCM's (e.g., partículas de Urea e acrílico, Partículas de Urea e vidro);
- VI. Geometria com canal vertical em contato com superfície porosa para a avaliação de reboco particulado em problemas de perda de circulação;
- VII. Geometria com fraturas para verificar o tamponamento particulado em problemas de perda de circulação com altas vazões de fuga;
- VIII. Modificação estrutural da seção de testes para que possibilite maior variação do número de Reynolds e, conseqüentemente maior pressão no canal;

Referências

ALMAGRO, S. P. B.; FRATES, C.; GARAND, J.; MEYER, A. Sealing fractures: Advances in lost circulation control treatments. **Oilfield Review Autumn**, v. 26, n. 3, p. 4–13, 2014.

American Society Mechanical Engineers (ASME) Sahle Shake Committee. **Drilling Fluid Processing Handbook**. Elsevier, p. 666, 2005.

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

BARNES, H. A.; HUTTON, J. F.; WALTERS, K. **An Introduction to Rheology**. Elsevier, 1989.

BIRD, R. B.; ARMSTRONG, R. C.; HASSAGER, O. **Dynamics of polymeric liquids** New York John Wiley & Sons, , 1987.

BIRD, R. B.; FREDRICKSON, A. G.:”**Friction Factor for Axial Non-Newtonian Annular Flow**”, Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 50, No. 3, March 1958.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Transport phenomena**. New York: John Wiley & Sons, 2002.

BOMBETEC. **BMX-DF Agitadores/Misturadores** BMIXDiademaBombetec Bombas Químicas Ltda, , 2015.

CALÇADA, L. A.; DUQUE NETO, O. A.; MAGALHÃES, S. C.; SCHEID, C. M.; BORGES FILHO, M. N.; WALDMANN, A. T. A. **Evaluation of suspension flow and particulate materials for control of fluid losses in drilling operation**. Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 131, p. 1–10, 2015.

CHEN, J. J. J.:”**Technical Note 400: A Simple Explicit Formula for The Estimation of Pipe Friction Factor**”, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Part 2, Vol. 77, March 1984.

CHEN, Y. L.; CAO, X. D.; ZHU, K. Q. A gray lattice Boltzmann model for power-law fluid and its application in the study of slip velocity at porous interface. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 159, n. 1–3, p. 130–136, 2009.

CONTEMP. **Manual De Instruções Técnicas** São Caetano do Sul - SPContemp Ind. Com. e Serviços Ltda., , 2015.

DEMIRDAL, B.: **“The Study of Flow of Paraffin Based Synthetic Drilling Fluids at Elevated Pressure and Elevated Temperature (EPET) Conditions”**, M. Sc. Thesis, May 2001.

DI GIUSEPPE, E.; CORBI, F.; FUNICIELLO, F.; MASSMEYER, A.; SANTIMANO, T. N.; ROSENAU, M.; DAVAILLE, A. Characterization of Carbopol® hydrogel rheology for experimental tectonics and geodynamics. **Tectonophysics**, v. 642, n. 1, p. 29–45, 2015.

DODGE, D., MEZTNER, A.: **“Turbulent Flow of Non-Newtonian Systems”**, A.I.Ch.E. Journal, Vol. 5, 1959.

ESHGHINEJADFARD, A., SHARMA, K., THÉVENIN, D.: **Effect os Polymer and Fiber Additivies on Pressure Drop in a Rectangular Channel**. Journal oh Hydrodynamics, April 2017.

FANN. **Model 35 Viscometer Instruction Manual**. Houston, Texas: Fann Instrument Company, 2015. v. 207198

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

GRAY, G. R.; DARLEY, H. C. H. **Composition and Properties of Oil Well Drilling Fluids**. 4. ed.Houston, TX: Gulf Publishing Company, 1980.

IRGENS, F. **Rheology abd Non-Newtonian Fluids**. Springer, 2014.

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.

JENSEN, T. B., SHARMA, M. P.: **“Study of Friction Factor and Equivalent Diameter Correlations for Annular Flow of Non-Newtonian Drilling Fluids”** Journal of Energy Resources Tech, Vol. 119, December 1987.

KIM, N. H., LEE, Y. P., YOUNG, S. Y., JURNG, J. S.: **A Study on the Pressure Loss, Heat Transfer Enhancement and fouling Control in a vertical Particulate Flow**. KSME Journal, Vol. 10, No. 4, pp. 450-457, April 1995.

KUMAR, A.; SAVARI, S. Lost Circulation Control and Wellbore Strengthening : Looking Beyond Particle Size Distribution. **Aade-11-Ntce-21**, n. 2010, 2011.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O.. **Fluidization Engineering**. Butterworth Heinemann, 1989.

KOZICKI, W., CHOU, C. H., TIU, C.: “**Non-Newtonian Flow in Duct of Arbitrary Cross-section Shape**”, Chemical Engineering Science, Vol. 21, pp. 665-679, 1966.

LABVIEW. **National Instruments: LabView - Help**, 2016.

LAVROV, A. **Lost Circulation: Mechanisms and Solutions**. Cambridge, UK: Gulf Professional Publishing, 2016.

MACOSKO, C. W. **Rheology: Principles, Measurements and Applications**. Wiley-VCH, 1996. v. 86

MADLENER, K.; FREY, B.; CIEZKI, H. K. Generalized reynolds number for non-newtonian fluids. **Progress in Propulsion Physics**, v. 1, p. 237–250, 2009.

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

MICROTRAC. **Microtrac FLEX Software Operations Manual**, 2016

MOISES, A. S, SHAH, S. N.:”**Friction Pressure Correlations of Newtonian and Non-Newtonian Fluids Through Concentric and Eccentric Annuli**”, SPE 60720, presented at SPE/ICTA held in Houston, TX, April 2000.

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

NELSON, E. B. **Well cementing**. 2nd. ed.S, 2006.

NETZSCH. **Bomba Nemo** BYPomerodeNetzsch Fábrica Ind. e Com. Ltda., , 2006.

OBRZUT, L. Q. **Análise Experimental de Escoamento Líquido-sólido para o Controle de Fuga de Fluido em Canal Fraturado**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

ODEH, A. S., YANG, H. T.: **Flow of Non-Newtonian Power Law Fluids Through Porous Media**, SPE, June 1979.

RÜCKEN. **Transmissor de Pressão Diferencial RTP420-DIF**São PauloRücken Instrumentação e Automação Industrial, , 2014.

RAMALHO, A.; ROSAS, R. **Petrobras: produção de petróleo no Brasil deve crescer 38% até 2022**. Valor Econômico, Rio de Janeiro, 21 dez. 2017. Disponível em: <http://www.valor.com.br/empresas/5234669/petrobras-producao-de-petroleo-no-brasil-deve-crescer-38-ate-2022>. Acessado em: 10 jun. 18.

SCHAFFEL, S.B. **A questão ambiental na Etapa de Perfuração de Poços Marítimos de Óleo de Gás no Brasil**. 2004 130 f. Dissertação (Mestrado em ciências

em Planejamento Energético) – Programa de pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

SCHRAMM, G. A. **A Practical Approach to Rheology and Rheometry**. Haake, 1994.

SHAH, S. N., EL FADILI, Y., CHHABRA, R. P.: **New Model for Single Spherical Particle Settling Velocity in Power Law Fluids**. INT. J. MULTIPH. FLOW, 2007

SCHNEIDER, C. L. **Estudo Experimental do Preenchimento de Fraturas com Escoamento Particulado em Canal Fraturado**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

TOMS, B. A.: **Some Observations on the Flow of Linear Polymer Solutions Through Straight Tubes at Large Reynolds Number**. First International Congress on Rheology, 1948.

WIKA. **Flush Pressure Transmitter for Viscous and Solids-containing Media Model S-11** Klingerberg Wika Alexander Wiegang SE & Co. KG., , 2012.

WIKIPÉDIA, 2013. **Pseudoplasticidade**. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Pseudoplasticidade>. Acessado em: 25 maio 2018.

APÊNDICE A – DADOS DE MEDIÇÃO REALIZADA COM O VISCOSÍMETRO ROTACIONAL FANN 35 A PARA A OBTENÇÃO DAS CURVAS DE ESCOAMENTO

Este Apêndice apresenta as tabelas com os dados de medições obtidos para os fluidos, com o viscosímetro rotacional Fann 35A, bem como, as curvas de viscosidade e tensão de cisalhamento, ambas em função da taxa de deformação.

A Tabela A1 mostra as constantes do viscosímetro rotacional Fann 35A, utilizado para obter os dados referentes às viscosidades e tensões de cisalhamento para cada fluido.

São apresentados os resultados das medições, em triplicata, com o viscosímetro rotacional Fann 35A para os seguintes fluidos:

- CBP5 (Tabelas A2, A3 e A4)
- CBP10 (Tabelas A7, A8 e A9)
- CBP20 (Tabelas A12, A13 e A14)
- GLI10 (Tabelas A17, A18 e A19)

São apresentadas as constantes e valores obtidos para os ajustes das curvas de escoamento para:

- CBP5 (Tabelas A5 e A6)
- CBP10 (Tabelas A10 e A11)
- CBP20 (Tabelas A15 e A16)

São apresentadas as curvas de viscosidade e tensão em função da taxa de cisalhamento para:

- CBP5 (Figuras A1 e A2)
- CBP10 (Figuras A3 e A4)
- CBP20 (Figuras A5 e A6)
- GLI10 (Figuras A7 e A8)

Tabela A 1 - Constantes do viscosímetro rotacional Fann 35A.

Equipamento	Constantes		
FANN 35 A	K_1	K_2	K_3
	300	0,01323	1,7023

Fonte: Fann 35 A.

Tabela A 2 - Dados de medição reológica para CBP 5 - Medida 01

Medida 01					
Grandeza	N	θ	$\dot{\gamma}$	τ	η
Unidade	rpm	($^\circ$)	1/s	Pa	cP
MEDIÇÕES	3	2	5,1069	0,7938	155,44
	6	2,5	10,2138	0,99225	97,15
	100	5,5	170,23	2,18295	12,82
	200	8	340,46	3,1752	9,33
	300	10	510,69	3,969	7,77
	600	15,5	1021,38	6,15195	6,02

Fonte: Elaboração própria.

Tabela A 3 - Dados de medição reológica para CBP 5 - Medida 02.

Medida 02					
Grandeza	N	θ	$\dot{\gamma}$	τ	η
Unidade	rpm	($^\circ$)	1/s	Pa	cP
MEDIÇÕES	3	2,5	5,1069	0,99225	194,30
	6	2,5	10,2138	0,99225	97,15
	100	5	170,23	1,9845	11,66
	200	7,5	340,46	2,97675	8,74
	300	9,5	510,69	3,77055	7,38
	600	15	1021,38	5,9535	5,83

Fonte: Elaboração própria.

Tabela A 4 - Dados de medição reológica para CBP 5 - Medida 03.

Medida 03					
Grandeza	N	θ	$\dot{\gamma}$	τ	η
Unidade	rpm	($^\circ$)	1/s	Pa	cP
MEDIÇÕES	3	2,5	5,1069	0,99225	194,30
	6	2,5	10,2138	0,99225	97,15
	100	5	170,23	1,9845	11,66
	200	7,5	340,46	2,97675	8,74
	300	9,5	510,69	3,77055	7,38
	600	15	1021,38	5,9535	5,83

Fonte: Elaboração própria.

Tabela A 5 - Dados obtidos para realização do ajuste pelo modelo Herschel-Bulkley, com o auxílio do LAB Fit.

Constantes para o ajuste	Valor
τ_0	0,896691
n	0,828
k	0,0163288

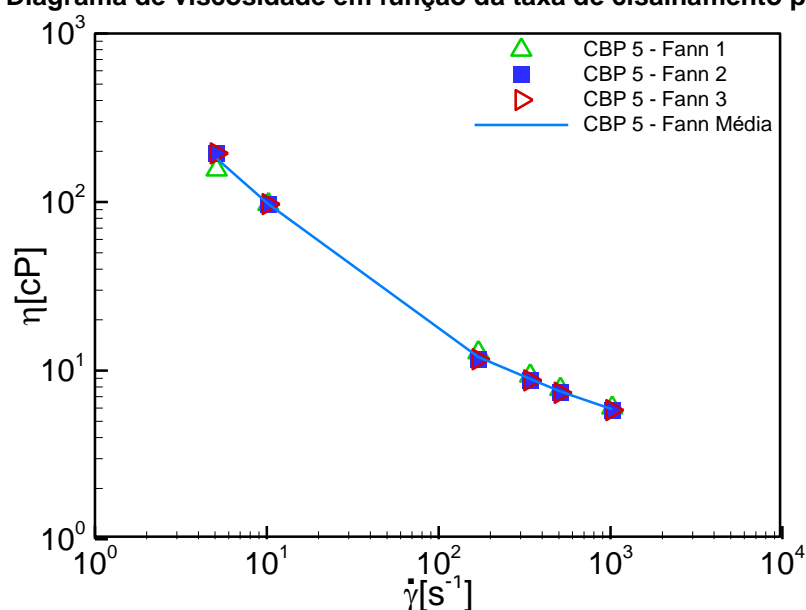
Fonte: Elaboração própria.

Tabela A 6 - Dados obtidos com o ajuste, para o CBP 5, pelo modelo Herschel-Bulkley.

Ajuste Herschel-Bulkley	
$\dot{\gamma}$	τ
5,1069	0,96
10,2138	1,01
170,23	2,05
340,46	2,94
510,69	3,75
1021,38	5,96

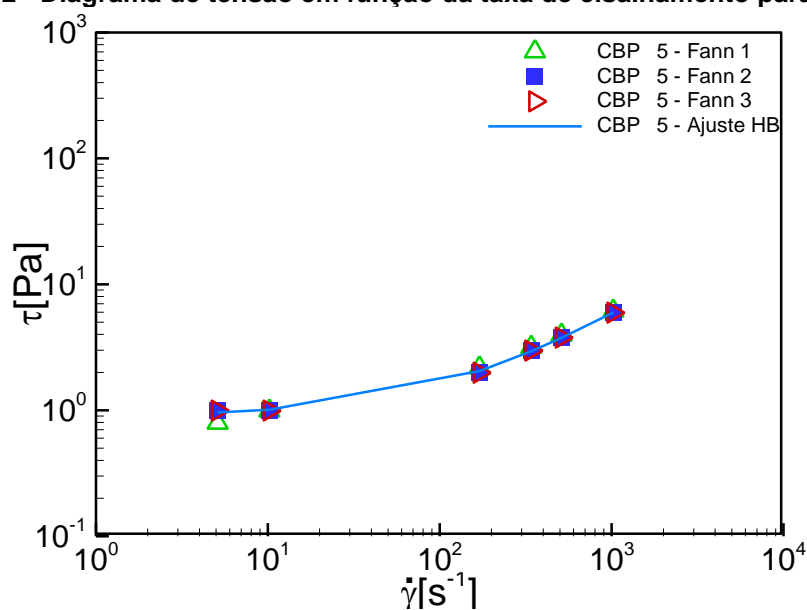
Fonte: Elaboração própria.

Figura A 1 - Diagrama de viscosidade em função da taxa de cisalhamento para o CBP 5.



Fonte: Elaboração própria.

Figura A 2 - Diagrama de tensão em função da taxa de cisalhamento para o CBP 5.



Fonte: Elaboração própria.

Tabela A 7 - Dados de medição reológica para CBP 10 - Medida 01

Medida 01					
Grandeza	N	θ	$\dot{\gamma}$	τ	η
Unidade	rpm	($^{\circ}$)	1/s	Pa	cP
MEDIDAS	3	2	5,1069	1,38915	272,01
	6	2,5	10,2138	1,78605	174,87
	100	5,5	170,23	3,969	23,32
	200	8	340,46	5,75505	16,90
	300	10	510,69	7,34265	14,38
	600	15,5	1021,38	11,1132	10,88

Fonte: Elaboração própria.

Tabela A 8 - Dados de medição reológica para CBP 10 - Medida 02.

Medida 02					
Grandeza	N	θ	$\dot{\gamma}$	τ	η
Unidade	rpm	($^{\circ}$)	1/s	Pa	cP
MEDIDAS	3	2,5	5,1069	1,38915	272,01
	6	2,5	10,2138	1,78605	174,87
	100	5	170,23	3,969	23,32
	200	7,5	340,46	5,75505	16,90
	300	9,5	510,69	7,34265	14,38
	600	15	1021,38	11,1132	10,88

Fonte: Elaboração própria.

Tabela A 9 - Dados de medição reológica para CBP 10 - Medida 03.

Medida 03					
Grandeza	N	θ	$\dot{\gamma}$	τ	η
Unidade	rpm	($^{\circ}$)	1/s	Pa	cP
MEDIDAS	3	2,5	5,1069	1,38915	272,01
	6	2,5	10,2138	1,78605	174,87
	100	5	170,23	3,969	23,32
	200	7,5	340,46	5,9535	17,49
	300	9,5	510,69	7,34265	14,38
	600	15	1021,38	11,5101	11,27

Fonte: Elaboração própria.

Tabela A 10 - Dados obtidos para realização do ajuste, para o CBP 10, pelo modelo Herschel-Bulkley, com o auxílio do LAB Fit.

Constantes para o ajuste	Valor
τ_0	1,2777
n	0,7137
k	0,0701

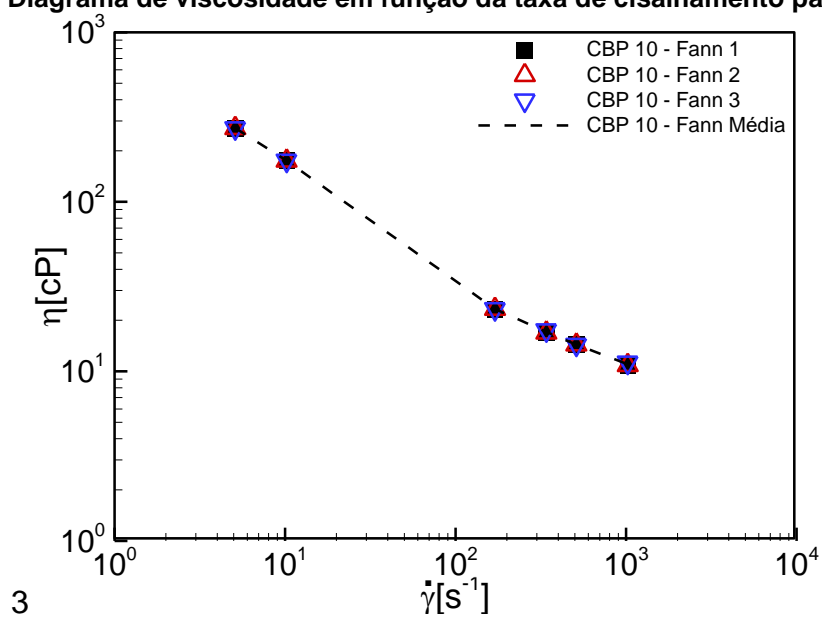
Fonte: Elaboração própria.

Tabela A 11 - Dados obtidos com o ajuste, para o CBP 10, pelo modelo Herschel-Bulkley.

Ajuste Herschel-Bulkley	
$\dot{\gamma}$	τ
5,1069	1,50
10,2138	1,65
170,23	4,02
340,46	5,77
510,69	7,28
1021,38	11,13

Fonte: Elaboração própria.

Figura A 3 - Diagrama de viscosidade em função da taxa de cisalhamento para o CBP 10.



Fonte: Elaboração própria.

Figura A 4 - Diagrama de tensão em função da taxa de cisalhamento para o CBP 10.

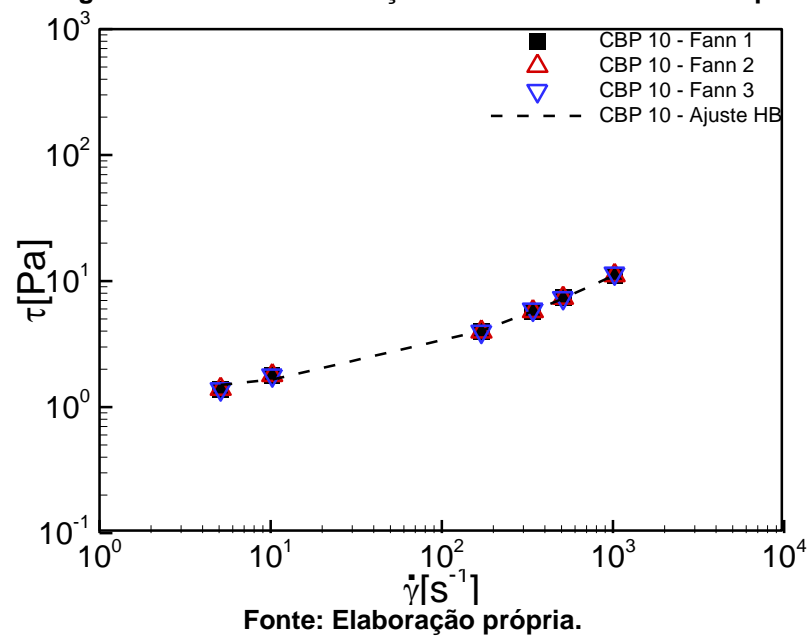


Tabela A 12 - Dados de medição reológica para CBP 20 - Medida 01

Medida 01					
Grandeza	N	θ	$\dot{\gamma}$	τ	η
Unidade	rpm	($^\circ$)	1/s	Pa	cP
MEDIDAS	3	2	5,1069	2,18295	427,45
	6	2,5	10,2138	2,97675	291,44
	100	5,5	170,23	7,73955	45,47
	200	8	340,46	11,31165	33,22
	300	10	510,69	13,8915	27,20
	600	15,5	1021,38	20,44035	20,01

Fonte: Elaboração própria.

Tabela A 13 - Dados de medição reológica para CBP 20 - Medida 02.

Medida 02					
Grandeza	N	θ	$\dot{\gamma}$	τ	η
Unidade	rpm	($^\circ$)	1/s	Pa	cP
MEDIDAS	3	2,5	5,1069	2,18295	427,45
	6	2,5	10,2138	2,97675	291,44
	100	5	170,23	7,73955	45,47
	200	7,5	340,46	10,91475	32,06
	300	9,5	510,69	13,69305	26,81
	600	15	1021,38	20,2419	19,82

Fonte: Elaboração própria.

Tabela A 14 - Dados de medição reológica para CBP 20 - Medida 03.

Medida 03					
Grandeza	N	θ	$\dot{\gamma}$	τ	η
Unidade	rpm	($^\circ$)	1/s	Pa	cP
MEDIDAS	3	2,5	5,1069	2,18295	427,45
	6	2,5	10,2138	2,97675	291,44
	100	5	170,23	7,73955	45,47
	200	7,5	340,46	10,91475	32,06
	300	9,5	510,69	13,69305	26,81
	600	15	1021,38	20,2419	19,82

Fonte: Elaboração própria.

Tabela A 15 - Dados obtidos para realização do ajuste, para o CBP 20, pelo modelo Herschel-Bulkley, com o auxílio do LAB Fit.

Constantes para o ajuste	Valor
τ_0	1,16486
n	0,61665
k	0,2621

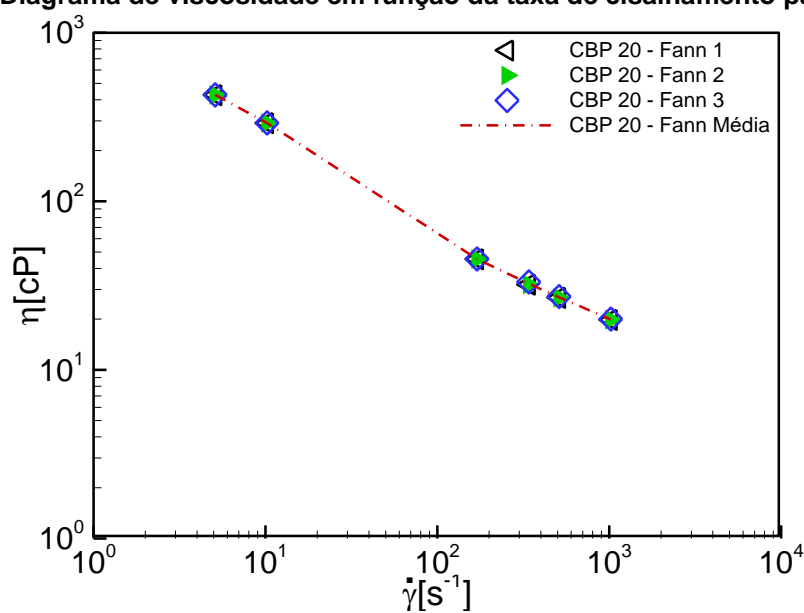
Fonte: Elaboração própria.

Tabela A 16 - Dados obtidos com o ajuste, para o CBP 20, pelo modelo Herschel-Bulkley.

Ajuste Herschel-Bulkley	
$\dot{\gamma}$	τ
5,1069	1,88
10,2138	2,26
170,23	7,39
340,46	10,71
510,69	13,42
1021,38	19,96

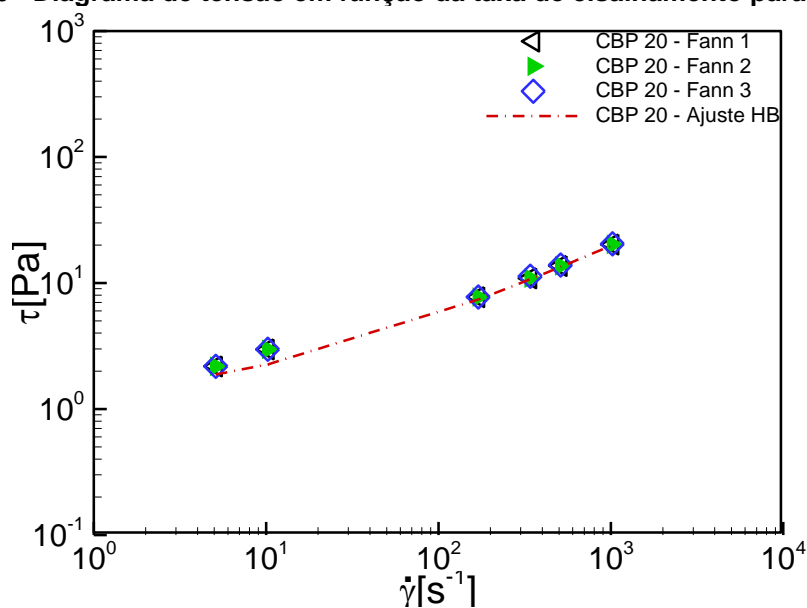
Fonte: Elaboração própria.

Figura A 5 - Diagrama de viscosidade em função da taxa de cisalhamento para o CBP 20.



Fonte: Elaboração própria.

Figura A 6 - Diagrama de tensão em função da taxa de cisalhamento para o CBP 20.



Fonte: Elaboração própria.

Tabela A 17 - Dados de medição reológica para GLI 10 - Medida 01

Medida 01					
Grandeza	N	θ	$\dot{\gamma}$	τ	η
Unidade	rpm	($^{\circ}$)	1/s	Pa	cP
MEDIDAS	3	2	5,1069	0,59535	116,58
	6	2,5	10,2138	0,7938	77,72
	100	5,5	170,23	1,78605	10,49
	200	8	340,46	3,5721	10,49
	300	10	510,69	5,1597	10,10
	600	15,5	1021,38	10,3194	10,10

Fonte: Elaboração própria.

Tabela A 18 - Dados de medição reológica para GLI 10 - Medida 02.

Medida 02					
Grandeza	N	θ	$\dot{\gamma}$	τ	η
Unidade	rpm	($^{\circ}$)	1/s	Pa	cP
MEDIDAS	3	2,5	5,1069	0,59535	116,58
	6	2,5	10,2138	0,7938	77,72
	100	5	170,23	1,78605	10,49
	200	7,5	340,46	3,5721	10,49
	300	9,5	510,69	5,1597	10,10
	600	15	1021,38	10,3194	10,10

Fonte: Elaboração própria.

Tabela A 19 - Dados de medição reológica para GLI 10 - Medida 03.

Medida 03					
Grandeza	N	θ	$\dot{\gamma}$	τ	η
Unidade	rpm	($^{\circ}$)	1/s	Pa	cP
MEDIDAS	3	2,5	5,1069	0,59535	116,58
	6	2,5	10,2138	0,7938	77,72
	100	5	170,23	1,78605	10,49
	200	7,5	340,46	3,5721	10,49
	300	9,5	510,69	5,1597	10,10
	600	15	1021,38	10,3194	10,10

Fonte: Elaboração própria.

Figura A 7 - Diagrama de viscosidade em função da taxa de cisalhamento para o CBP 20.

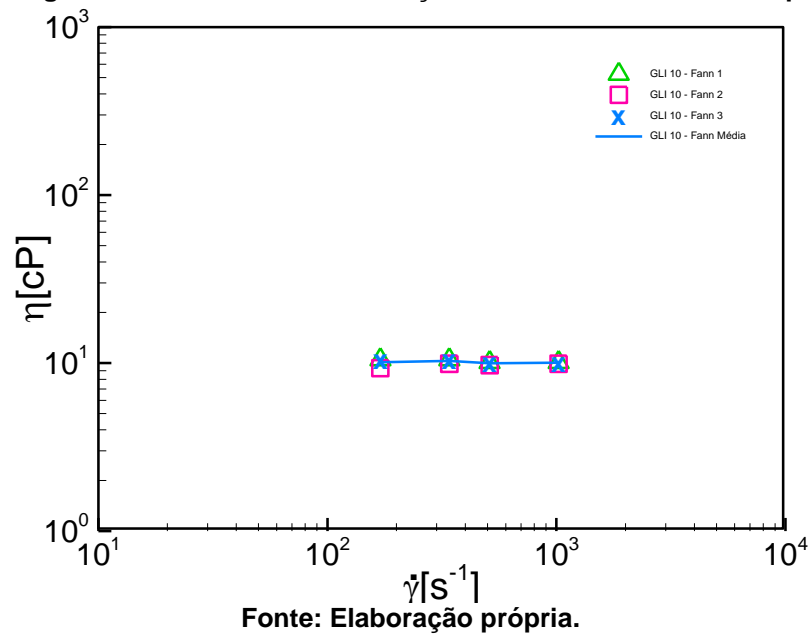
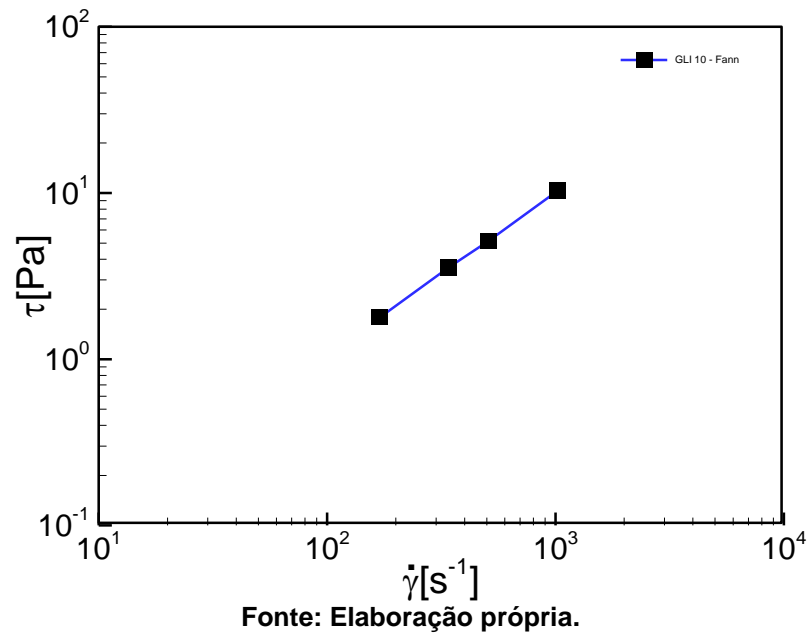


Figura A 8 - Diagrama de tensão em função da taxa de cisalhamento para o CBP 20.



APÊNDICE B – PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO

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

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

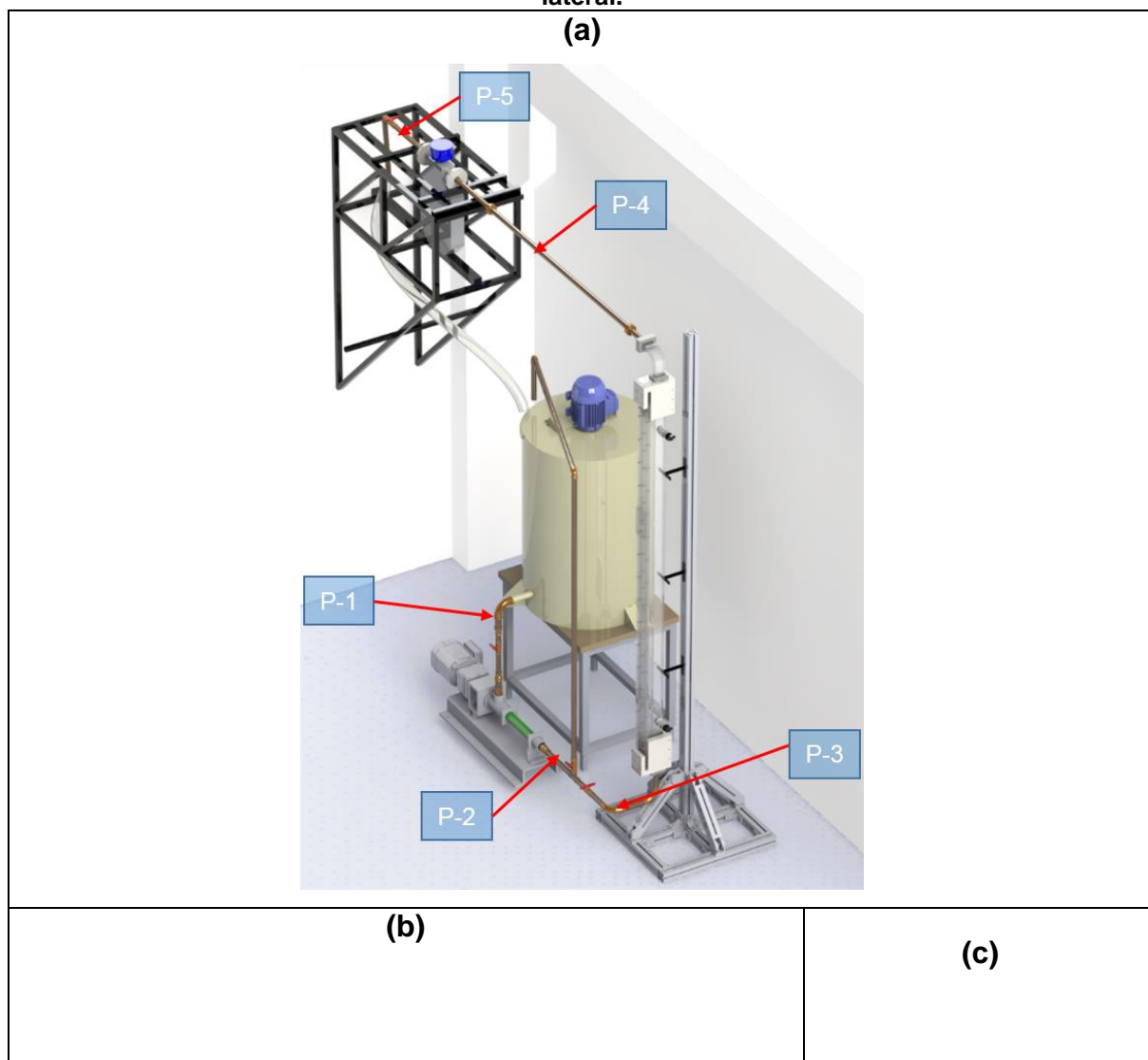
Este POP aplica-se a todos os alunos que trabalham diretamente com os testes realizados no aparato experimental.

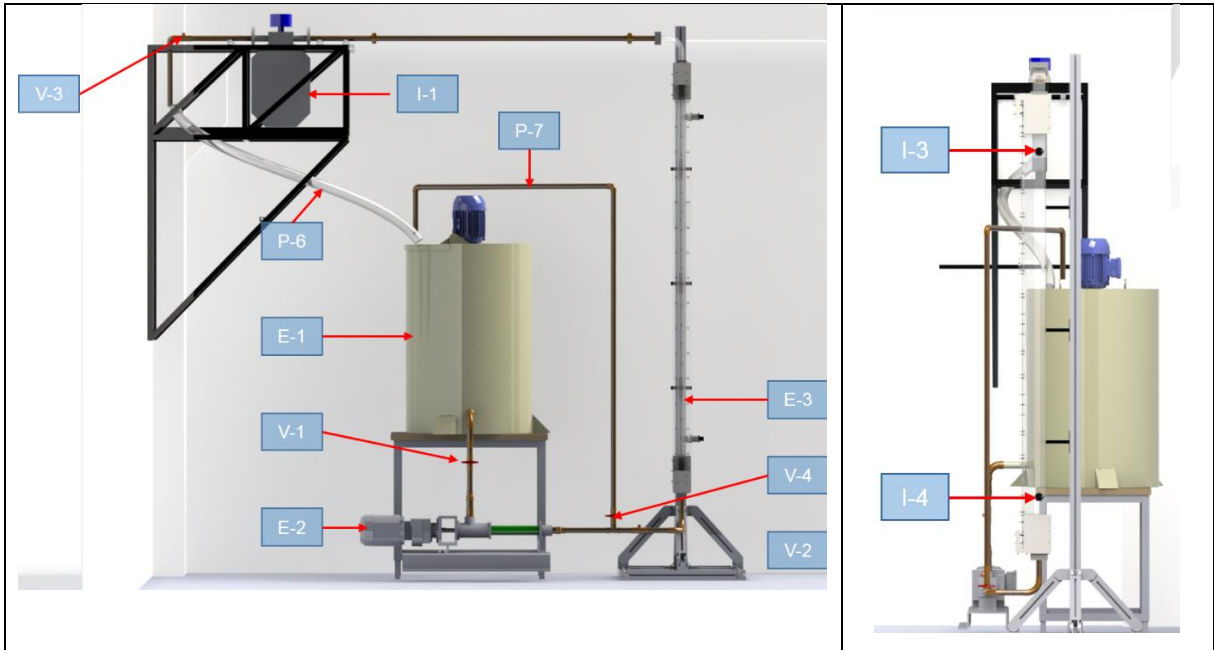
CONTEÚDO

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 B 1 e listados na Tabela B 1. A Figura B 2 apresenta um esquema do circuito hidráulico do aparato experimental.

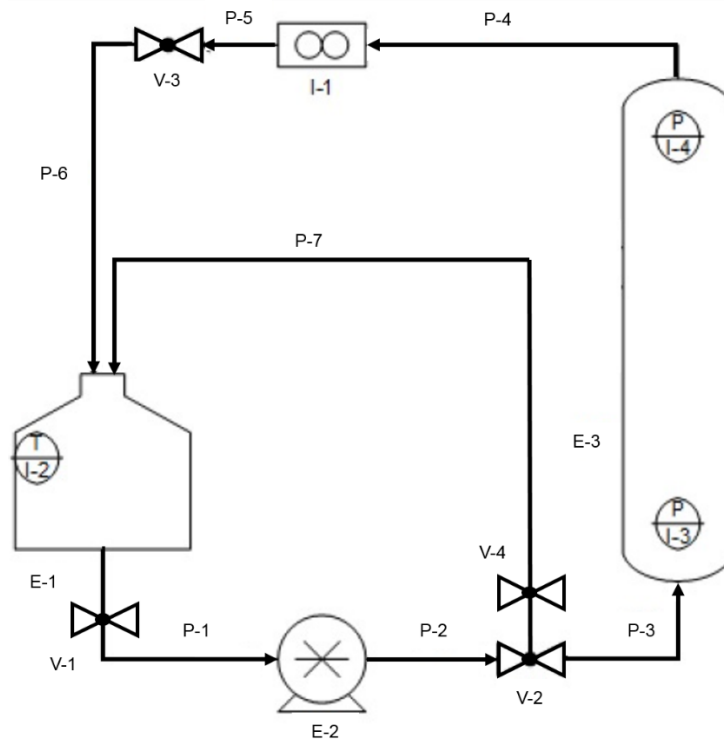
Figura B 1 - Bancada experimental: projeto 3D: a) Vista isométrica, b) vista frontal e c) vista lateral.





Fonte: Elaboração própria.

Figura B 2 – Circuito hidráulico da bancada.



Fonte: Elaboração própria.

Tabela B 1 – Relação dos componentes da bancada experimental.

Sigla	Descrição
E-1	Tanque misturador
E-2	Bomba helicoidal
E-3	Seção de teste

I-1	Medidor de vazão
1-2	Termopar
1-3/1-4	Transdutor de pressão relativa
P-1	Tubulação sucção
P-2	Tubulação recalque
P-3	Tubulação entrada da seção de teste
P-4	Tubulação de saída da seção de teste
P-5	Tubulação saída do medidor de vazão
P-6	Tubulação de retorno ao tanque
P-7	Tubulação by-pass
V-1	Válvula de saída do tanque
V-2	Válvula da entrada da seção de teste
V-3	Válvula do medidor de vazão
V-4	Válvula de bypass

Fonte: Elaboração própria.

ETAPAS PARA INICIAÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

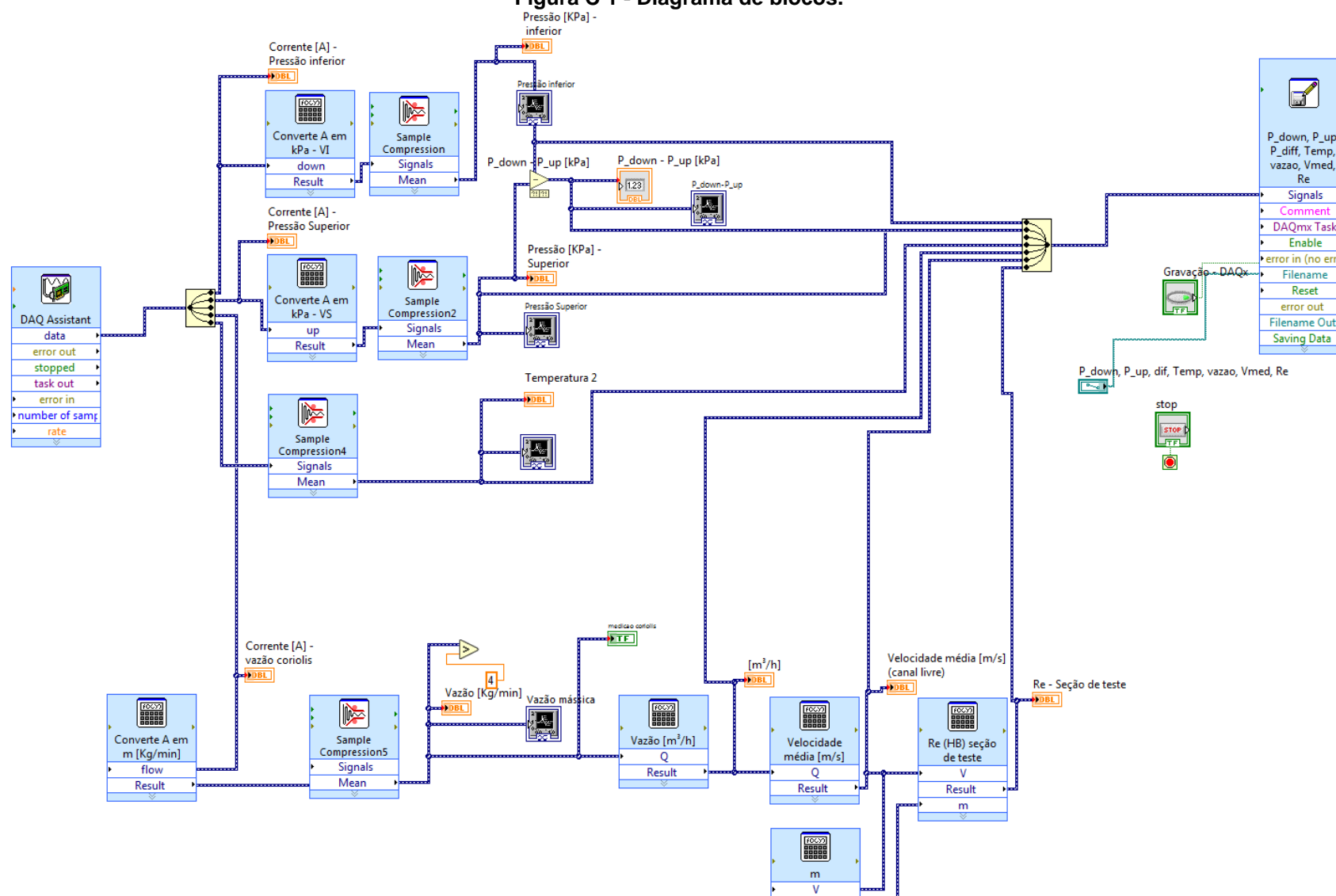
1. Fechar válvula V-1 para a bomba E-2
2. Fechar a válvula V-2, para a seção de teste E-3
3. Fechar a válvula V-4, para o by-pass
4. Abrir software LabVIEW
5. No quadro Q-1, ligar disjuntor D-1
6. Iniciar programa “Perda de Carga” no LabVIEW
7. No diagrama de blocos do LabVIEW, ajustar tempo e frequência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

16. Ajustar a rotação da bomba para a vazão (ou Reynolds) desejada (o)
17. Iniciar gravação de dados de teste no LabVIEW
18. Injetar partículas de LCM
19. Aguardar o sistema atingir o regime permanente
20. Parar a gravação no momento desejado

APÊNDICE C – DIAGRAMA DE BLOCOS

Neste apêndice apresenta o diagrama de blocos utilizado, no programa LabVIEW, para a obtenção dos dados de medição (e.g. número de Reynolds, pressões, vazão, velocidade média, temperatura). O diagrama utilizado é o mesmo para todos os fluidos, com a diferença apenas na formulação do número de Reynolds que muda conforme o tipo de fluido. A Figura C 1 representa o diagrama de blocos.

Figura C 1 - Diagrama de blocos.



Fonte: Elaboração própria.

ANEXO A – PROPRIEDADES FÍSICAS DA MISTURA ÁGUA – GLICERINA.

Este anexo apresenta propriedades físicas de misturas água-glicerina de acordo com a concentração mássica de glicerina em água. A Figura A.A 1 apresenta os valores de viscosidade dinâmica da mistura água-glicerina, para diversas concentrações mássicas de glicerina em água, em função da temperatura na qual o fluido se encontra. A Figura A.A 2 apresenta os valores de massa específica da solução água-glicerina também em função da temperatura e da concentração mássica de glicerina em água da solução. Ambas as tabelas foram retiradas de Dorsey (1940).

Figura A.A 1 – Viscosidade dinâmica da solução em função da concentração mássica de glicerina e da temperatura.

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

Fonte: Adaptado de Dorsey, 1940.

Figura A.A 2 – Massa específica da solução em função da concentração mássica de glicerina e da temperatura.

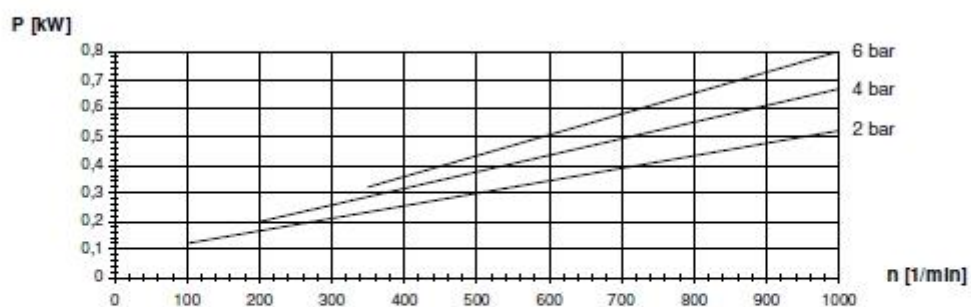
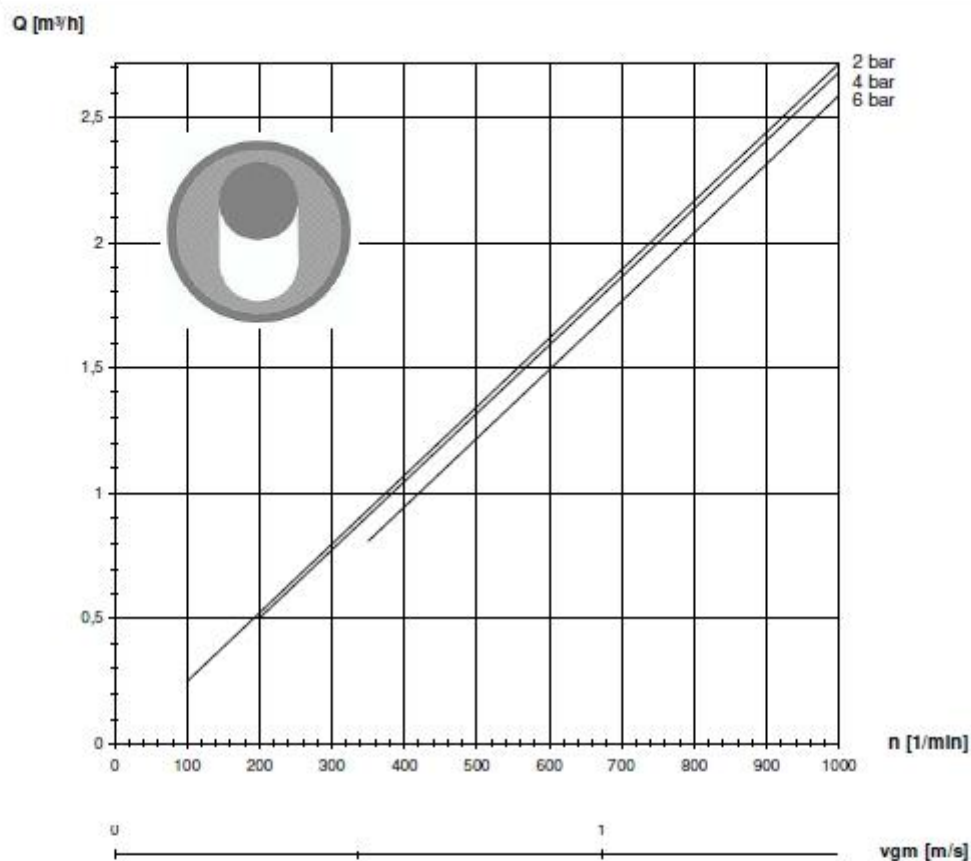
Glicerina (%)	Densidade (g/cm ³)					Glicerina (%)	Densidade (g/cm ³)				
	15°C	15.5°C	20°C	25°C	30°C		15°C	15.5°C	20°C	25°C	30°C
100	1.26415	1.26381	1.26108	1.25802	1.25495	50	1.12870	1.12845	1.12630	1.12375	1.12110
99	1.26160	1.26125	1.25850	1.25545	1.25235	49	1.12600	1.12575	1.12360	1.12110	1.11845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

Fonte: Adaptado de Dorsey, 1940.

ANEXO B – CURVA CARACTERÍSTICA DA BOMBA NETZSCH

A Figura B.B 1 apresenta a curva característica da bomba helicoidal de deslocamento positivo utilizada neste trabalho. Duas curvas são apresentadas na imagem, vazão (Q [m^3/h]) em função da rotação (n [rpm]) e pressão (p [bar]) em função da rotação. Os valores expostos referem-se a água à viscosidade de 1 cP, para 20°C.

Figura B.B 1 - Curva característica da bomba.

NM021--01LCurva Característica / Performance Curve
Material do Estator/ elastomer quality: standard**NETZSCH**

Torque de Partida / starting torque T(L) = 10 Nm

Pressão/pressure	T
2 bar	10 Nm
4 bar	11 Nm
6 bar	12 Nm

Valores válidos para Água (1 cP) a 20 °C. Tolerância conforme VDMA 24294 (+10%/-5%).
Valid for water (1 cP) at 20 °C (70 °F). Tolerances are in accordance with VDMA 24294 (+10%/-5%).

Rev.: 01/2011 Alterações Técnicas Reservadas / Technical changes reserved

www.netzsch.com.br

Fonte: Netzsch, 2011.