



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

BRUNO RENAN STAHLKE
GIOVANI DE SOUZA FRITOLI

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE BANCADA EXPERIMENTAL PARA O
ESTUDO DE ESCOAMENTO PARTICULADO EM CANAL FRATURADO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2014

BRUNO RENAN STAHLKE
GIOVANI DE SOUZA FRITOLI

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE BANCADA EXPERIMENTAL PARA O
ESTUDO DE ESCOAMENTO PARTICULADO EM CANAL FRATURADO**

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

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

Co-Orientador: Prof. Dr. Admilson T. Franco.

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

CURITIBA

2014

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa de título "Projeto e Construção de Bancada Experimental para o Estudo de Escoamento Particulado em Canal Fraturado", realizado pelos alunos Bruno Renan Stahlke e Giovani de Souza Fritoli, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Silvio L. M. Junqueira.

Damec - UTFPR

Orientador

Prof. Dr. Luciano.F. S. Rossi

Damec - UTFPR

Avaliador

Prof. Dr. Rigoberto E. M. Morales.

Damec - UTFPR

Avaliador

Curitiba, 22 de maio de 2014.

RESUMO

STAHLKE, B.R.; FRITOLI, G.S. **Projeto e Construção de Bancada Experimental para o Estudo de Escoamento Particulado em Canal Fraturado**. Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Industrial Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 124 p., 2014.

Durante operações de perfuração de poços petrolíferos, os problemas de invasão e perda de circulação para eventuais fraturas presentes nas paredes do poço são recorrentes. Uma solução de destaque é a utilização de aditivos particulados na vedação de fraturas, cujo estudo desperta grande interesse tanto no âmbito acadêmico como no industrial. A presente monografia propõe a construção e a validação de uma bancada experimental capaz de permitir o estudo de escoamentos de diferentes sistemas particulados em seções de teste com seção transversal retangular. São apresentados como produtos do desenvolvimento deste trabalho a concepção, especificação, construção e montagem do aparato experimental, bem como a sua instrumentação. Com o intuito de verificar o funcionamento da bancada, alguns testes iniciais para determinação do número de Reynolds e da perda de carga na seção de testes utilizando água como fluido de trabalho foram realizados. São mostrados e documentados resultados para ensaios de calibração estática dos instrumentos de medição e para experimentos preliminares de filmagem de escoamento particulado.

Palavras-chave: Perda de circulação, Aditivos particulados, Escoamento fluido-sólido, Bancada experimental, Instrumentação.

ABSTRACT

STAHLKE, B.R.; FRITOLI, G.S. **Projeto e Construção de Bancada Experimental para o Estudo de Escoamento Particulado em Canal Fraturado**. Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Industrial Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 124 p., 2014.

During drilling operations in oil wells, fluid invasion and lost circulation problems, caused due to the presence of fractures in the well wall, are recurrent. One highly used solution is the use of particulate additives in the sealing of fractures, whose study is a great interest in both the academic and industrial scope. This monograph proposes the construction and validation of an experimental array able to allow the study of various particulate systems flow in rectangular test sections. As products of the project development are presented the conception, specification, construction and assembling of the experimental array, as well as its instrumentation. With the intent of verifying the system operation, some initial tests for the determination of the Reynolds number and the pressure drop in the test section, utilizing water as work fluid. The results obtained in the measurement instruments static calibration and in the preliminary filming and particulate flow tests are shown and documented.

Palavras-chave: Lost circulation, Particulate additives, Fluid-solid flow, Experimental array, Instrumentation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1. Representação de um reservatório de petróleo real.	15
Figura 1.2. Representação da circulação do fluido de perfuração em uma operação de perfuração de petróleo.	16
Figura 1.3. Operação de perfuração de poço com geração de partículas de cascalho e presença de fissura na formação rochosa.	17
Figura 1.4. Perda de circulação para formação rochosa e para fraturas na perfuração de um poço de petróleo.	19
Figura 1.5. Representação da vedação de fraturas utilizando aditivos particulados.	20
Figura 2.1. Esquema de relação entre fluido e material particulado.	31
Figura 2.2. Diagrama funcional dos sensores do aparato experimental.	33
Figura 2.3. Diferença entre os conceitos de precisão e exatidão.	34
Figura 2.4. Fluxograma representativo de processos de medição e das grandezas de influência.	35
Figura 2.5. Representação do erro de medição e de suas parcelas sistemática e aleatória.	37
Figura 2.6. Escopo dos erros de medição.	38
Figura 2.7. Representação do processo de monitoramento dos sinais para obtenção dos valores em regime permanente na entrada (X) e na saída (Y) do instrumento.	39
Figura 2.8. Esquema da metodologia para construção de curvas estáticas para um dado instrumento.	40
Figura 2.9. Representação da região de interesse para a caracterização dinâmica de instrumentos, nas funções temporais do sinal de entrada e de saída.	40
Figura 2.10. Linearidade de uma curva de caracterização estática.	42
Figura 2.11. Histerese em curva de caracterização estática.	44

Figura 3.1. Fluxograma dos procedimentos metodológicos para desenvolvimento do projeto.	47
Figura 3.2. Poço de perfuração vertical com presença de fratura.....	50
Figura 3.3. Simplificação de um poço vertical com a presença de um plano de fratura.....	50
Figura 3.4. Corte longitudinal e transversal do poço simplificado.....	51
Figura 3.5. Geometria preliminar projetada para representar a situação problema formulada.	52
Figura 3.6. Projeto de seção de teste vertical de perfil retangular, livre de preenchimento.	52
Figura 3.7. Representação de geometrias de teste de perfil retangular com meios porosos de porosidades e permeabilidades distintas.	53
Figura 3.8. Projeto da seção de testes.....	55
Figura 3.9. Detalhe 1 da seção de testes.....	56
Figura 3.10. Detalhe 2 da seção de testes.....	57
Figura 3.12. Representação esquemática do circuito hidráulico do aparato experimental. Desenho feito por meio do programa Microsoft VISIO 2013.	58
Figura 3.13. Vista frontal da concepção final do projeto da bancada experimental.....	59
Figura 3.14. Vista lateral da concepção final do projeto da bancada experimental.....	60
Figura 3.15. Modelagem tridimensional da concepção final do aparato experimental.....	61
Figura 4.1. Imagem do aparato experimental construído.	62
Figura 4.2. Detalhe do canal de escoamento da seção de teste.....	63

Figura 4.3. Aspectos construtivos do sistema de bombeamento, Detalhes do tanque, bomba, medidor de vazão do tipo turbina e sistema de válvulas do aparato	64
Figura 4.4. Imagem de catálogo do novo reservatório, em vias de aquisição..	65
Figura 4.5. Bomba centrífuga que estava disponível no LACIT.	65
Figura 4.6. Bomba centrífuga magnética.	66
Figura 4.7. Entrada do escoamento na seção de testes.	67
Figura 4.8. Saída do escoamento na seção de testes.	68
Figura 4.9. <i>Layout</i> da seção de testes da bancada experimental com determinação da posição dos instrumentos de medição instalados.	69
Figura 4.10. Transdutor de pressão relativa e detalhe da membrana metálica.	70
Figura 4.11. Transdutor de pressão diferencial e detalhe dos pontos de tomada de pressão.	71
Figura 4.12. Esquema de funcionamento do medidor de vazão tipo turbina....	72
Figura 4.13. Filtro de tela adquirido e instalado.....	73
Figura 4.14. Medidor de vazão mássica do tipo coriolis.	74
Figura 4.15. Quadro de comando e placa de aquisição de dados.	75
Figura 4.16. Representação do sistema modular de aquisição de dados.	76
Figura 4.17. Chassi e módulos para a aquisição de dados.....	77
Figura 4.18. Diagrama de bloco programado no <i>LabVIEW</i>	78
Figura 4.19. Interface de trabalho, leitura e controle de dados.	79
Figura 4.20. Curva de caracterização estática do transdutor de pressão relativa 1.	82
Figura 4.21. Curva de caracterização estática do transdutor de pressão relativa 2.	84
Figura 4.22. Curva de caracterização estática do transdutor de pressão diferencial.....	86

Figura 4.23. Detalhe de equipamentos auxiliares ao ensaio de calibração do medidor de vazão.....	87
Figura 4.24. Curva de caracterização estática do medidor de vazão do tipo turbina.	88
Figura 4.25. Fluxograma orientativo dos experimentos preliminares de verificação do funcionamento da bancada experimental.	90
Figura 4.26. Perda de carga em função do número de Reynolds do escoamento.....	93
Figura 4.27. Sistema de filmagem e aquisição de quadros de imagem.	96
Figura 4.28. Fotografia do escoamento de microesferas de vidro.....	97
Figura 4.29. Escoamento abrasivo plástico - seis primeiros frames.....	98
Figura C.1. Representação do circuito e dos componentes de concepção preliminar do projeto do aparato experimental. Desenho feito por meio do programa Microsoft VISIO 2013.....	120
Figura C.2. Vista isométrica da modelagem tridimensional de concepção preliminar do aparato experimental.....	121
Figura C.3. Modelagem tridimensional de concepção preliminar do aparato experimental.....	122
Figura C.4. Detalhes da modelagem tridimensional de concepção preliminar do aparato experimental.....	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Comprimento de desenvolvimento para diferentes números de Reynolds	56
Tabela 4.1. Relação entre a vazão e o número de Reynolds do escoamento .	65
Tabela 4.2 - Especificações da bomba a ser utilizada na bancada	66
Tabela 4.3. Características dos transdutores de pressão relativa.....	70
Tabela 4.4. Características do transdutor de pressão diferencial.....	71
Tabela 4.5. Características do medidor de vazão do tipo turbina.....	73
Tabela 4.6. Características do medidor de vazão mássica adquirido.	74
Tabela 4.7. Características dos módulos de aquisição de dados utilizados.....	76
Tabela 4.8. Resultados obtidos para os ensaios de variação de coluna de água para o transdutor de pressão relativa 1.....	81
Tabela 4.9. Resultados obtidos para os ensaios de variação de coluna de água para o transdutor de pressão relativa 2.....	83
Tabela 4.10. Resultados obtidos para os ensaios de variação de coluna de água para o transdutor de pressão diferencial.	85
Tabela 4.11. Resultados obtidos para os ensaios de caracterização estática do medidor de vazão do tipo turbina.	88
Tabela 4.12. Resultados obtidos nos testes.....	92
Tabela 4.13. Perda de carga calculada pra escoamento com pressões negativas.....	93
Tabela 4.14. Resultados obtidos com pressão positiva	94
Tabela 4.15. Perdas de carga obtidas para escoamentos com pressão positiva	94
Tabela 4.16. Características da câmara utilizada.....	95
Tabela 4.17. Características das partículas utilizadas.	97
Tabela 4.18. Velocidade aproximada das partículas.....	99

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

Sigla/Acrônimo	Correspondência
CENPES	Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis
LACIT	Laboratório de Ciências Térmicas
LCM	Materiais para Perda de Circulação
PIB	Produto Interno Bruto
PIV	Velocimetria por Imagem de Partículas
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
SI	Sistema Internacional de Unidades

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
ρ	Massa específica	[kg/m ³]
m	Massa	[kg]
V	Volume	[m ³]
τ	Tensão de cisalhamento	[Pa]
V	Velocidade	[m/s]
μ	Viscosidade absoluta	[Pa.s]
ν	Viscosidade cinemática	[m ² /s]
Re	Número de Reynolds	[-]
\bar{V}	Velocidade Média	[m/s]
D	Diâmetro da tubulação	[m]
D_h	Diâmetro hidráulico	[m]
A	Área	[m ²]
P	Perímetro	[m]
Q	Vazão volumétrica	[m ³ /h]
\dot{m}	Vazão mássica	[kg/h]
h_{IT}	Perda de carga total	[J/kg]
p	Pressão	[Pa]
g	Aceleração da gravidade	[m ² /s]
z	Altura	[m]
f	Fator de atrito de Darcy	[-]
α	Coefficiente cinético	
h_l	Perda de carga devido ao atrito	[J/kg]
L	Comprimento sujeito à perda de carga	[m]
h_{lm}	Perda de carga menor	[J/kg]
K	Coefficiente experimental de perda de carga	[-]
L_e	Comprimento equivalente de tubo reto	[m]
$\left(\frac{dp}{dL}\right)_{total}$	Diferencial de pressão total	[Pa/m]
$\left(\frac{dp}{dL}\right)_f$	Diferencial de pressão devido ao atrito	[Pa/m]

Símbolo	Descrição	Unidade
$\left(\frac{dp}{dL}\right)_h$	Diferencial de pressão devido à diferença de altura	[Pa/m]
$\left(\frac{dp}{dL}\right)_a$	Diferencial de pressão devido à aceleração	[Pa/m]
θ	Ângulo de inclinação da tubulação	[°]
m_p	Massa da partícula	[kg]
ρ_s	Massa específica da partícula	[kg/m ³]
r_{QC}	Raio da partícula	[m]
S_p	Superfície de contato com o fluido	[m ²]
$(\vec{a}_s)_c$	Vetor aceleração do centro de massa da partícula	[m ² /s]
\vec{T}_F	Tensor tensão que atua sobre o fluido	[Pa]
\forall_p	Volume da partícula	[m ³]
\vec{b}	Vetor da intensidade das forças externas de campo que atuam sobre a partícula	[N]
ρ_f	Massa específica do fluido	[kg/m ³]
$(\vec{V}_F)_Q$	Vetor velocidade do fluido num ponto Q sobre a partícula	[m/s]
$(\vec{V}_s)_c$	Vetor velocidade do centro de massa da partícula	[m/s]
$\vec{\omega}$	Vetor velocidade angular da partícula	[rad/s]
\vec{r}_{QC}	Vetor posição do ponto Q sobre a partícula em relação ao ponto de massa	[m]
$\vec{\ell}$	Vetor da força resistiva	[N]
C_D	Coeficiente de arraste	[-]
\vec{u}	Vetor velocidade do fluido não perturbado pela presença da partícula	[m/s]
\vec{v}	Vetor velocidade de translação da partícula	[m/s]
D_P	Diâmetro volumétrico	[m]
ϕ	Esfericidade	[-]
V_t	Velocidade terminal de partícula	[m/s]
y	Valor da medição indicado pelo instrumento	[-]
$y_{\text{verdadeiro}}$	Valor obtido numa medição perfeita	[-]
e_s	Erro sistemático	[-]
e_a	Erro aleatório	[-]

Símbolo	Descrição	Unidade
R^2	Coeficiente de determinação	[-]
u_Y	Incerteza padrão associada à indicação do instrumento	[-]
u_X	Incerteza padrão para a estimativa do mensurando	[-]
P_{bar}	Pressão medida em bar	[bar]
mH_2O	Metro de coluna de água	[m.c.a]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Formulação do problema.....	18
1.2	Revisão da literatura.....	21
1.3	Objetivos.....	23
1.4	Justificativa	23
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	26
2.1	Noções básicas	26
2.2	Material particulado	29
2.3	Interação fluido-partícula.....	30
2.4	Instrumentos de medição	32
2.5	Calibração	38
2.6	Expressão de incertezas experimentais.....	44
2.7	Síntese	44
3	METODOLOGIA E PROJETO CONCEITUAL.....	45
3.1	Características previstas inicialmente para o escoamento	45
3.2	Metodologia de projeto	46
3.3	Projeto da bancada experimental.....	49
3.3.1	Seção de testes	49
3.3.2	Circuito hidráulico.....	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	62
4.1	Construção e montagem do aparato experimental	62
4.2	Instrumentação da bancada experimental	68
4.2.1	Transdutores de pressão relativa	69
4.2.2	Transdutor de pressão diferencial	70
4.2.3	Medidores de vazão.....	72
4.2.4	Sistemas de aquisição de dados	75
4.2.5	Caracterização estática dos instrumentos	77
4.3	Testes preliminares para verificação do funcionamento da bancada	89
4.3.1	Monitoramento do escoamento na seção de teste	89
4.3.2	Filmagem do escoamento.....	95
5	CONSIDERAÇÕES finais.....	100
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	102
	REFERÊNCIAS	104
	APÊNDICE A – NOÇÕES BÁSICAS DE MECÂNICA DOS FLUIDOS ..	110
	APÊNDICE B – EXPRESSÃO DE INCERTEZAS EXPERIMENTAIS....	114
	APÊNDICE C – CONCEPÇÕES PRELIMINARES	119

1 INTRODUÇÃO

A indústria de petróleo e gás, no escopo da organização produtiva e econômica atual, demanda o crescente desenvolvimento de novas tecnologias a fim de prover o aperfeiçoamento das técnicas e processos e garantir competitividade.

A perfuração de poços é uma etapa da exploração de petróleo realizada por meio de uma broca. Ao longo do processo de perfuração, a broca entra em contato com diferentes formações, dentre as quais são observadas rochas impermeáveis, rochas porosas e camadas de sal. Destaca-se neste contexto a perfuração de rochas porosas, que podem conter óleo, gás e água em seus poros, como mostrado na Figura 1.1.

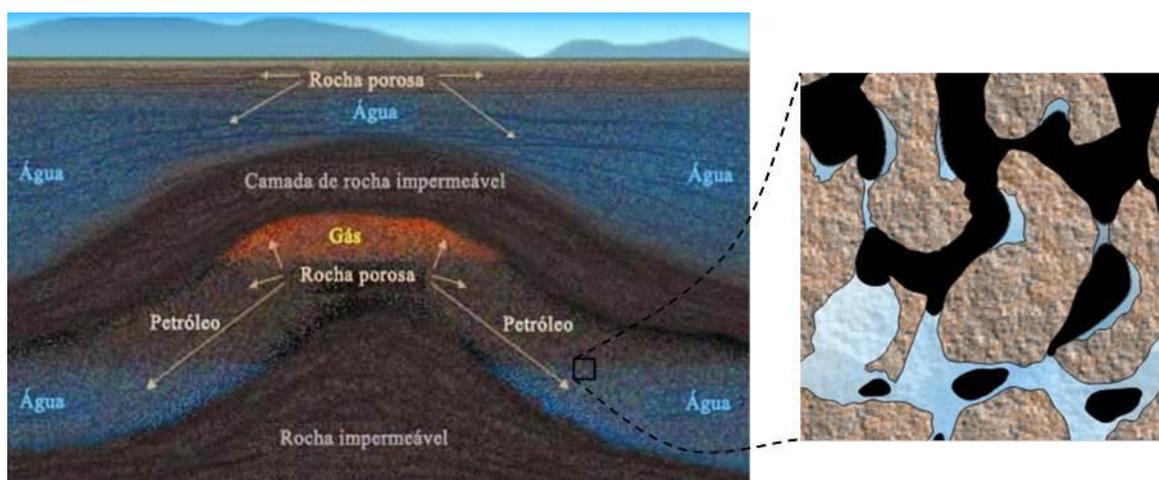


Figura 1.1. Representação de um reservatório de petróleo real.

Fonte: De Lai (2009).

A perfuração ocorre devido à rotação da broca somada ao efeito do peso da coluna de perfuração (FREUDENRICH, 2013). Ao mesmo tempo, como esquematizado na Figura 1.2 o fluido de perfuração é injetado pelo interior da coluna, passa pela broca cortante acoplada à extremidade e retorna pelo espaço entre as paredes do poço e a coluna de perfuração, denominado de espaço anular.

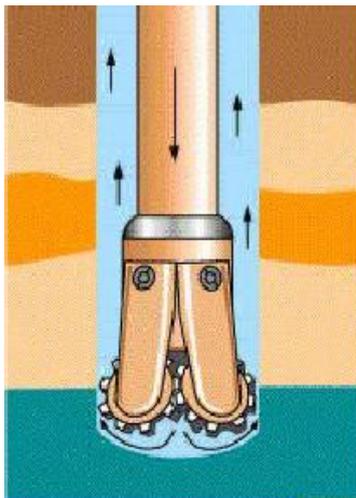


Figura 1.2. Representação da circulação do fluido de perfuração em uma operação de perfuração de petróleo.

Fonte: Freudenrich (2013).

O fluido de perfuração pode, a partir do espaço anular, penetrar na formação rochosa, assim como fluidos da formação (e.g. água, óleo e gás) podem penetrar no poço, fenômenos caracterizados como invasão e influxo, respectivamente. Notadamente, os fenômenos de invasão e influxo estão atrelados à faixa operacional de pressões do poço de petróleo, i.e., à relação entre a pressão de operação e o gradiente de pressão entre poço e formação.

Barbosa (2006) afirma que o desenvolvimento de fluidos de perfuração está cada vez mais especializado, de forma que todas as propriedades necessárias aos fluidos sejam adquiridas por meio da incorporação de aditivos desenvolvidos especialmente para corrigir ou melhorar o desempenho destes fluidos durante a operação de perfuração de poços.

A perfuração de poços de petróleo é uma operação onerosa, em que é altamente desejável a minimização de tempos e de danos ao reservatório produtor. Possuem destaque neste universo a observância de grandes profundidades e altos gradientes de pressão, a inevitável ocorrência de escoamentos multifásicos, a eventual presença de fraturas nas rochas e as propriedades e características permo-porosas e termo-hidráulicas dos processos físicos envolvidos.

A Figura 1.3 ilustra este contexto e enfoca a perfuração em formações porosas com fraturas e escoamento particulado. Vale ressaltar que diversas partículas estão naturalmente presentes e são inerentes ao meio físico da

perfuração de poços, como exemplo do cascalho gerado a partir da ação da broca cortante.

Segundo Darley e Gray (1988), a concentração de sólidos no fluido de perfuração está entre as propriedades mais importantes e frequentemente testadas durante a perfuração de poços.



Figura 1.3. Operação de perfuração de poço com geração de partículas de cascalho e presença de fissura na formação rochosa.

Fonte: Adaptado de Halliburton (2014).

Diferentes tipos de fluidos são utilizados para perfurar um poço e, à medida que a broca penetra no reservatório, diversas interações entre o fluido de perfuração e a rocha podem ocorrer. Porções da parte líquida do fluido e partículas sólidas menores que os poros da formação podem invadir a rocha reservatório, promovendo a redução das permeabilidades a gás, óleo e água. Já partículas maiores que os poros da formação podem se acumular na parede do poço.

Segundo Thomas (2004), a capacidade de um fluido de perfuração, ou da mistura fluido-aditivos, em formar uma camada de partículas sólidas úmidas sobre as rochas permeáveis expostas pela broca é de fundamental importância para o

sucesso da operação de perfuração. Thomas (2004) pondera, ainda, que é imprescindível ao fluido de perfuração ter uma fração razoável de partículas com dimensões ligeiramente menores que as dos poros das rochas expostas.

A principal característica dos meios fraturados é o escoamento preferencial através das redes de fraturas, que atuam como condutores hidráulicos, de acordo com as características geométricas das fraturas (e.g. forma e orientação) (DE LAI, 2009).

Na etapa de produção de petróleo, a ocorrência de fraturas na formação é considerada positiva, pois oferece caminhos preferenciais de escoamento e gera aumento de produtividade. Entretanto, devido ao fato de intensificar os fenômenos de invasão, a presença de fraturas é em geral inconveniente durante a operação de perfuração, em que pode gerar perdas e contaminações.

No contexto da perfuração de poços petrolíferos podem ser observados os fenômenos de influxo e de invasão. Os influxos, também chamados *kicks*, dizem respeito à invasão não controlada de fluidos presentes na formação para o espaço anular. Quando se perde o controle sobre as barreiras a este fluxo e ele atinge a superfície, é denominado *blowout* (THOMAS, 2004). As invasões, por sua vez, podem causar as perdas de circulação, que constituem o problema foco de estudo deste projeto e são tratadas na próxima seção.

1.1 Formulação do problema

A perda de circulação consiste na perda não intencional de fluido de perfuração para a formação e constitui um problema, à medida que pode gerar perdas financeiras significativas (IVAN E BRUTON, 2005), modificar o cronograma de operação, alterar as previsões do projeto de engenharia para execução da perfuração, propiciar contaminações e gerar diminuição de pressão hidrostática no espaço anular, o que em casos críticos pode ser causa de *kick* e *blowout*.

A perda de circulação pode ser caracterizada como total ou parcial e ocorrer de forma natural ou induzida. A perda de circulação é denominada total quando provoca uma redução no nível de fluido de perfuração no poço, com a consequente redução da pressão hidrostática.

Em formações porosas em que a pressão é anormalmente baixa, com pressão do escoamento livre maior que a pressão do meio poroso, a perda de circulação ocorre de forma natural. Quando provocada por excesso de pressão hidrostática, excessiva perda de carga no espaço anular, aumento de pressão devido à alta velocidade de descida da coluna de perfuração, testes de formação que danificaram o poço ou erros de planejamento e de execução, a perda de circulação é dita induzida (ADAMS, 1980).

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). Na Figura 1.4, ficam evidenciadas as perdas de circulação de fluido para a formação permeável e para fraturas, que intensificam o problema.

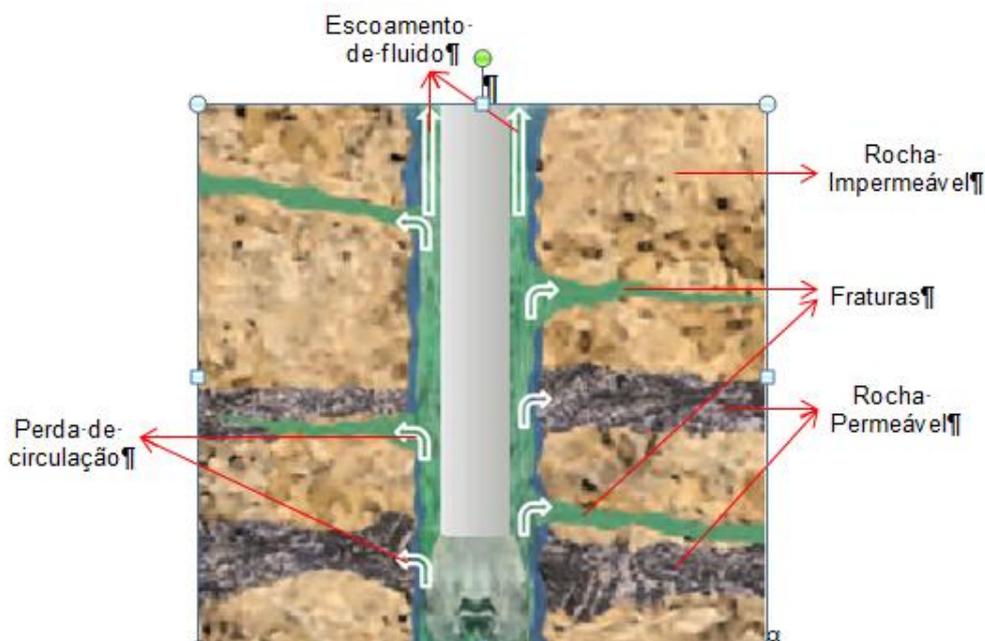


Figura 1.4. Perda de circulação para formação rochosa e para fraturas na perfuração de um poço de petróleo.

Fonte: Adaptado de Cook *et al.* (2012).

Uma solução utilizada para o tratamento do problema da perda de circulação é a utilização de aditivos ao fluido de perfuração contendo partículas voltadas para vedação total ou parcial de formações porosas e de fraturas. A Figura 1.5 ilustra a

utilização de partículas sólidas obturantes como aditivo ao fluido de perfuração para selar fraturas presentes no poço.

No primeiro instante, Figura 1.5 (a), circula-se fluido de perfuração pelo interior do poço; i.e., o fluido é injetado pelo interior da coluna, atravessa orifícios existentes na broca e retorna pelo espaço anular formado entre as paredes do poço e a coluna de perfuração. As setas denotam o sentido de escoamento e a presença de uma fratura pode ser verificada. A partir desta fenda ocorre perda de circulação de fluido de perfuração.

No quadro (b) da Figura 1.5 o aditivo particulado preenche a fratura, de forma a reduzir ou eliminar a perdas de fluido de perfuração para a formação rochosa através da fratura. As setas, neste caso, indicam a manutenção de pressão para baixo tanto na coluna quanto no anular, de modo que o aditivo fique concentrado na região de atuação. Por fim, a Figura 1.5 (c) retrata a sequência dos procedimentos de perfuração, com o movimento rotacional da broca representado pelas setas e a fissura devidamente preenchida e vedada pelo aditivo particulado.

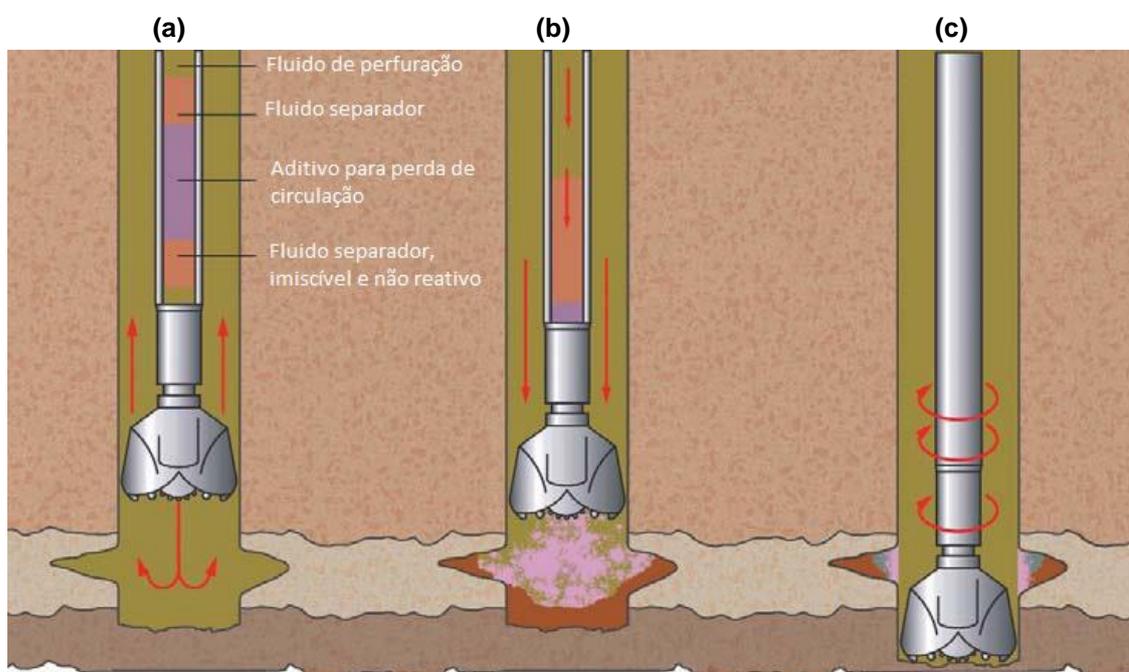


Figura 1.5. Representação da vedação de fraturas utilizando aditivos particulados.
Fonte: Adaptada a partir do catálogo “*BAROID Fluid Services*” (HALLIBURTON, 2008).

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

1.2 Revisão da literatura

Os trabalhos que embasam, contribuem ou estão relacionados com os desenvolvimentos desta monografia dizem respeito a processos de perfuração de poços de petróleo, problemas de perda de circulação de fluidos de perfuração, fluidodinâmica de sistemas particulados, construção e instrumentação de bancadas experimentais e análise de dados amostrais.

Thomas (2004) fornece uma base abrangente para a engenharia de petróleo. O livro trata o processo de produção de óleo e gás desde as etapas de prospecção até as etapas de refino, descrevendo os equipamentos e as operações de cada etapa. Especificamente para este trabalho, traz conceitos nos contextos da operação de perfuração de poços e do problema de perda de circulação.

ASME (2005) constitui um compêndio sobre fluidos de perfuração de poços de petróleo e aditivos particulados, além de abordar processos e equipamentos relacionados. Informações sobre características e propriedades das partículas são fundamentais ao projeto hidráulico do aparato experimental.

Telles (2005 e 2006) orienta os procedimentos de cálculos hidráulicos para os dimensionamentos de tubulação e válvulas, além da seleção dos componentes da bancada experimental. Adicionalmente, são descritas maneiras de levantar os parâmetros referentes à fase fluida do escoamento em circuitos hidráulicos.

Diniz (1998) propõe correções aos cálculos hidráulicos de maneira a considerar o sistema particulado, a partir de um estudo experimental de escoamento bifásico (sólido-líquido) em condutos inclinados sobre pressão. São apresentadas considerações neste sentido para escoamento vertical, horizontal e inclinado, bem como formas de calcular a perda de carga de escoamentos particulados em tubulações de diferentes inclinações.

Baker (2005) reúne informações sobre medidores de vazão, apresenta guias de seleção e calibração de uma variada gama de medidores, auxiliando na fundamentação teórica sobre estes equipamentos e na seleção adequada. França

(2007) apresenta uma visão geral de sensores e instrumentos de medição, explica os princípios de operação, descreve como são aplicados e coloca exemplos de aplicação. Também realiza uma apresentação introdutória aos conceitos de incerteza, erro e análise estatística de medição.

Massarani (2002) fundamenta a abordagem física e desenvolve modelos matemáticos para a fluidodinâmica de sistemas particulados, tratando desde o estudo de uma partícula sólida isolada até o escoamento de partículas em suspensão. São abordadas as forças e trajetórias envolvidas, o fenômeno de separação, o escoamento bifásico em meios porosos e a filtração com formação de torta. A abordagem matemática do escoamento líquido-sólido é realizada por meio da relação entre trajetória das partículas com forças atuantes. As forças, por sua vez, são relacionadas com parâmetros do escoamento e com características físicas das partículas, como diâmetro e massa específica.

Peker e Helvaci (2008) trazem teorias e modelos a respeito do escoamento sólido-fluido, reunindo trabalhos oriundos de diversos autores colaboradores. Apresentam estudos sobre a interação de partículas, cinética de agregação e, estabilização. Adicionalmente, abordam a reologia da mistura, utilizando fluidos newtonianos e não newtonianos para caracterização das propriedades e do movimento das partículas.

Wendland e Himmelsbach (2002) utilizam métodos experimentais e numéricos para estudar a migração de soluto. Utilizando um modelo numérico calibrado através de testes experimentais com uma rocha fraturada, concluem que a migração de soluto é controlada pela abertura da fratura. Analisando o modelo experimental, concluem que a difusão pela matriz porosa influencia o processo de transporte, agindo como elemento retardador.

Dietrich *et al.* (2005) apresentam estudos de caracterização de fraturas, escoamentos na região da fratura e métodos para determinação de permeabilidade e condutividade de meios porosos fraturados. Graf e Therrien (2005) estudam experimentalmente o escoamento bifásico em meio parcialmente poroso com fratura única, porém, com o objetivo de estudar a influência da densidade do fluido na migração de soluto.

Aguirre Oliveira *et al.* (2009) estudam numericamente o problema de deposição de material particulado em uma fenda (fratura). Souza *et al.* (2011)

apresentam desenvolvimentos preliminares sobre o problema da deposição de partículas em reservatórios fraturados.

Souza *et al.* (2010) apresentam uma concepção para o estudo do escoamento líquido-sólido em canal fraturado. O estudo é acompanhado por simulações numéricas. Este trabalho influenciou em diversas modificações no projeto preliminar e conceitual da bancada experimental do presente trabalho. De Lai (2013) estuda numericamente o escoamento sólido-líquido em canais fraturados. Este trabalho direciona a idealização da geometria da seção de teste e a definição de diversos parâmetros operacionais da bancada experimental.

Em resumo, esta revisão da literatura parte de fundamentos relacionados à situação problema, indicando as principais referências que orientam o desenvolvimento do projeto, que fazem referência ao escoamento particulado em canais fraturados.

1.3 Objetivos

O objetivo geral do presente trabalho é o estudo experimental do escoamento particulado em canais fraturados. Para tanto, o principal objetivo e resultado esperado para o trabalho é o projeto, construção e montagem de um aparato experimental. O segundo objetivo é a instrumentação adequada da bancada e a calibração dos instrumentos de medição instalados.

Objetivos adicionais são a filmagem de escoamento particulado na seção de teste e a realização de testes preliminares utilizando água como fluido de trabalho, com o intuito de verificar o funcionamento do circuito experimental.

1.4 Justificativa

Em conferência realizada no Rio de Janeiro, a IBP (2012) divulgou que a participação do setor relacionado com a indústria petrolífera no PIB (Produto Interno Bruto) brasileiro aumentou de 3% em 1990 para 12% em 2010. As expectativas são de que esse número chegue em 20% em 2020. Estes dados mostram a importância econômica do escopo do projeto.

O custo do fluido perdido em razão do fenômeno de invasão é em muitos casos significativo. Na literatura acerca de estudos de caso sobre o emprego de

aditivos particulados para solucionar perdas severas de circulação, os valores atribuídos às perdas chegam, em casos críticos, à ordem de milhões de dólares e a invasão excessiva em poços exploratórios pode comprometer seu processo de avaliação.

Magnitudes milionárias atribuídas às perdas de circulação são descritas em estudos de caso em Rueda (2008) e em Halliburton (2010). Ivan e Bruton (2005) estimaram que os custos ocasionados pela perda de circulação para a empresa Hart Energy chegam a U\$800 milhões por ano, enquanto o custo de materiais para perda de circulação (LCM) chega à U\$200 milhões por ano.

O trabalho e os desenvolvimentos propostos neste texto são parte de um projeto mais abrangente. Um grupo de pesquisa foi criado no Laboratório de Ciências Térmicas (LACIT) da UTFPR com o objetivo de estudar, em conjunto com a PETROBRAS, o escoamento fluido-sólido em meios porosos fraturados através de duas abordagens: numérica e experimental. A presente monografia incorpora a frente de estudo experimental do projeto e se refere à conclusão de uma etapa deste projeto.

A maioria dos trabalhos científicos acerca do problema da perda de circulação lança mão de ferramentas numéricas. Um problema evidenciado a partir da revisão da literatura que utiliza esta abordagem é a escassez de dados experimentais para fornecer subsídio às validações.

A grande quantidade de incertezas na modelagem numérica do problema resultou na observação da janela de oportunidade de se realizar a concepção de um aparato experimental como ferramenta de estudo para propiciar a análise e caracterização da vedação de poros e fraturas, auxiliar a busca de soluções para problemas de perda de circulação e suprir as necessidades de se comparar e corroborar resultados oriundos de soluções numéricas.

No que concerne a argumentos de multidisciplinaridade, esta proposta de trabalho é bastante interdisciplinar e desafiadora, já que alcança as seguintes áreas do conhecimento, entre outras:

- Mecânica dos Fluidos.
- Mecânica Estrutural.
- Fluidodinâmica de Sistemas Particulados.

- Fenômenos de Transporte em Meios Porosos.
- Máquinas de Fluxo.
- Geologia.
- Fundamentos de Engenharia do Petróleo.
- Projeto e Desenho de Máquinas.
- Desenho Auxiliado por Computador.
- Métodos Numéricos.
- Instrumentação de Bancadas Experimentais.
- Medições de Grandezas Mecânicas.
- Estatística Aplicada à Análise de Dados Amostrais.

Além da indústria, há crescente atenção da comunidade acadêmica voltada para desenvolvimentos sobre fenômenos de transporte associados ao escoamento sólido-fluido e acerca de meios porosos. A intenção de gerar contribuição científica relevante é fator motivador e ímpeto compartilhado com a equipe do LACIT que orienta e auxilia este trabalho. Pretende-se que o desenvolvimento do projeto facilite a compreensão dos fenômenos físicos envolvidos e traga crescimento pessoal e profissional.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentadas fundamentações teóricas e revisões bibliográficas relacionadas ao desenvolvimento do projeto. Cada subdivisão desta seção aborda um grupo específico de conceitos e considerações utilizados na concepção do aparato experimental, na instrumentação da bancada, na realização de ensaios ou na análise de dados.

2.1 Noções básicas

Uma série de conceitos físicos e definições de mecânica dos fluidos estão presentes nos desenvolvimentos desta monografia. Os conceitos básicos auxiliares, que não sejam estritamente necessários para a compreensão do trabalho, são apresentados no Apêndice A. Os fundamentos principais, que são utilizados diretamente no projeto da bancada experimental ou nos ensaios realizados, são apresentados nesta seção a partir da referência de Fox *et al.* (2006).

O número de Reynolds (Re) é um parâmetro adimensional cujo conceito consiste na relação entre as forças de inércia e as forças viscosas de um fluido em escoamento. Para o escoamento confinado, o número de Reynolds é dado pela Eq.(2.1).

$$\text{Re} = \frac{\rho \bar{V} D}{\mu} \quad (2.1)$$

em que \bar{V} é a velocidade média do escoamento e D é o diâmetro da tubulação.

Correlações empíricas para escoamentos confinados em tubulações de seção circular podem ser estendidas para seções de geometria não-circular por meio do conceito do diâmetro hidráulico (D_H), definido como quatro vezes a área da seção transversal (A) da tubulação dividida pelo perímetro molhado (P) (comprimento de parede em contato com fluido escoando), segundo a Eq. (2.2).

$$D_H = \frac{4A}{P} \quad (2.2)$$

O número de Reynolds permite determinar se o escoamento está em regime laminar, de transição, ou turbulento. Os limites que constam na literatura para se determinar o regime do escoamento completamente desenvolvido em tubulações lisas, para escoamentos viscosos incompressíveis, são de até 2300 para o regime laminar. Acima disto ocorre transição e turbulência. Considerações menos conservativas consideram regime turbulento para Re superiores a 4000 e considerações mais conservativas garantem regime turbulento apenas para Re acima de 10000.

No aparato experimental, os parâmetros vazão e velocidade média do escoamento são monitorados. A definição de vazão decorre do conceito de continuidade do fluido e corresponde à quantidade de material que escoar através de uma seção por unidade de tempo, sendo uma medida da rapidez que um volume ou uma massa escoar. A vazão em volume ou volumétrica (Q) através de uma seção de uma superfície de controle de área A é dada pela Eq. (2.3) e a velocidade média do escoamento em uma seção pode ser calculada pela Eq. (2.4).

$$Q = \int_A \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (2.3)$$

$$\bar{V} = \frac{Q}{A} = \frac{1}{A} \int_A \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (2.4)$$

A vazão mássica (\dot{m}) é relacionada à vazão volumétrica por meio da massa específica e dada conforme a Eq. (2.5).

$$\dot{m} = \int_A \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad (2.5)$$

Outro conceito importante, que decorre da conservação da massa para escoamento incompressível e da condição de não deslizamento nas paredes, é o de comprimento de desenvolvimento. Após uma determinada distância da entrada da tubulação, a camada limite em desenvolvimento (região que separa os comportamentos viscoso e invíscido) atinge a linha de centro e o escoamento se torna inteiramente viscoso. Após esta distância o escoamento está completamente desenvolvido e o perfil de velocidades se torna constante. O comprimento de

entrada (L) para se atingir o desenvolvimento é uma função de Re para o escoamento laminar, conforme Eq. (2.6).

$$L \approx 0,06 Re D \leq 138D \quad (2.6)$$

Para o escoamento turbulento, experiências mostram que normalmente o comprimento de entrada se encontra na faixa mostrada pela Eq. (2.7), mas isto depende das condições operacionais e não se pode afirmar com propriedade.

$$25D \leq L \leq 40D \quad (2.7)$$

A definição de perda de carga se dá a partir do conceito da conservação de energia. Entre seções distintas 1 e 2, a perda de carga total por unidade de massa (h_{lr}) é definida pela Eq. (A.4) como a conversão irreversível de energia mecânica em energia térmica não desejada e em perda de energia por transferência de calor. A unidade da perda de carga é J/kg, que é equivalente à m^2/s^2 .

$$h_{lr} = \left(\frac{p_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{\bar{V}_1^2}{2} + gz_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{\bar{V}_2^2}{2} + gz_2 \right) \quad (2.8)$$

Devido ao fato de não ser calculado durante os testes preliminares para verificação da bancada experimental, o conceito de fator de atrito não é apresentado nesta seção, mas está explicitado no Apêndice A, bem como a descrição da maneira de avaliar perdas de carga menores em mudanças de seção transversal, entradas e saídas, válvulas e outros acessórios hidráulicos.

Para o escoamento real de um fluido em regime permanente em duto vertical, segundo Beggs e Brill (1973), o gradiente de pressão por unidade de comprimento de tubulação ocorre devido à influência de três fatores, segundo a Eq. (2.9).

$$\left(\frac{dp}{dL} \right)_{total} = \left(\frac{dp}{dL} \right)_f + \left(\frac{dp}{dL} \right)_h + \left(\frac{dp}{dL} \right)_a \quad (2.9)$$

O primeiro termo do lado direito da equação é a perda de carga devido à fricção, que representa normalmente, para o escoamento vertical ascendente, entre 5 a 20% da perda de carga total. O segundo termo é a perda de carga devido à elevação (coluna hidrostática), que para escoamento vertical ascendente representa em geral entre 80 e 95% da perda de carga total. O terceiro termo é a perda de carga devido à aceleração, que geralmente é desprezível, mas deve ser considerada caso haja alta velocidade de escoamento ou mudança significativa de velocidade (BRILL E MURKHERJEE, 1999).

2.2 Material particulado

Sistemas particulados são definidos como misturas multifásicas (e.g., sólido-fluido), na qual se faz presente, ao menos, uma fase dispersa (partículas), que se encontra em constante interação com uma fase contínua fluida (MASSARANI, 2002). A classificação destes sistemas depende, principalmente, da concentração da fase dispersa em relação à fase contínua, que proporciona diferentes formas de interações entre as duas fases (GIDASPOW, 1994).

Os conceitos sobre caracterização de propriedades de partículas (e.g. dimensão e forma) são fundamentais para a seleção de material particulado a ser ensaiado, para o dimensionamento da tubulação do circuito experimental e para a especificação de componentes e acessórios hidráulicos.

Além da determinação da massa específica, duas propriedades são imprescindíveis à caracterização de sistemas particulados, o diâmetro volumétrico (D_p) e a esfericidade (ϕ). O diâmetro volumétrico é calculado pela Eq. (2.10) e representa o diâmetro de uma esfera com o mesmo volume que a partícula em análise. O valor desta propriedade para partículas com forma irregular pode ser determinado com o auxílio da picnometria clássica ou análise *Coulter Counter* (ALLEN, 1981).

$$D_p = \left(\frac{6}{\pi} \nabla_p \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.10)$$

em que o índice P faz referência à partícula.

A esfericidade é calculada pela Eq. (2.11) e é definida como sendo o quociente entre a superfície de uma esfera com mesmo volume que a partícula sob análise e a superfície desta partícula.

$$\phi = \frac{\pi D_p^2}{S_p} \quad (2.11)$$

A esfericidade pode ser determinada pela técnica de permeamtria (ALLEN, 1981). A partícula esférica possui esfericidade 1. As partículas normalmente observadas em cascalhos de perfuração e operações de moagem apresentam esfericidade na faixa de 0,5 a 0,7 (MASSARANI, 2002).

Aspectos construtivos da tubulação, de válvulas e do sistema de bombeamento possuem como premissa os tamanhos máximos de partículas que poderão ser utilizadas. Para os fins do projeto do aparato experimental, é interessante que o diâmetro das partículas a serem utilizadas no aparato não sejam superiores a 0,15 milímetros, para se garantir estabilidade de suspensão (MASSARANI, 2002). Ainda, se o diâmetro for inferior a 0,04 milímetros, garante-se que a suspensão será homogênea independente das condições de escoamento (Durand e Condolios, 1952).

2.3 Interação fluido-partícula

O problema formulado e a janela de oportunidade proposta para estudo nesta monografia envolvem o escoamento particulado. A Figura 2.1 ilustra que, no escoamento sólido-fluido, existe interação tanto entre as fases como entre partículas individuais.

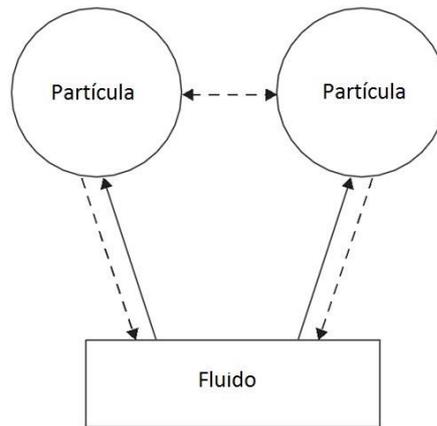


Figura 2.1. Esquema de relação entre fluido e material particulado.
Fonte: A autoria própria^[1].

O tratamento matemático dos escoamentos multifásicos é baseado no comportamento do escoamento de fluidos em tubulações e nas leis de conservação de massa, quantidade de movimento e energia tanto para a fase fluida quanto para a fase sólida. Para a fase fluida, a equação de continuidade é dada pela Eq. (2.12) e a quantidade de movimento é descrita pela Eq. (2.13).

$$\frac{\partial \rho_F}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_F \vec{V}_F) = 0 \quad (2.12)$$

$$\rho_F \left[\frac{\partial \vec{V}_F}{\partial t} + (\vec{V}_F \cdot \nabla) \vec{V}_F \right] = \nabla \cdot (\vec{T}_F) + \rho_F \vec{b} \quad (2.13)$$

sendo ρ_F , \vec{V}_F e \vec{T}_F respectivamente a massa específica, o campo de velocidades e o tensor tensão que atua sobre o fluido.

O movimento de uma partícula isolada é descrito pela Eq. (2.14).

$$m_p (\vec{a}_s)_c = \int_{S_p} \vec{T}_F \vec{n} ds + \rho_s \forall_p \vec{b} \quad (2.14)$$

em que S_p é a superfície em contato com o fluido, m_p a massa da partícula, $(\vec{a}_s)_c$ a aceleração do centro de massa da partícula, \vec{T}_F o tensor tensão que atua sobre o

^[1] A fim de se evitar repetições com a referência para ilustrações de autoria própria, as próximas ocorrências desta natureza não trarão a indicação de fonte.

fluido, ρ_s a massa específica da partícula, \forall_p o volume da partícula e \vec{b} a intensidade de forças externas de campo que atuam sobre a partícula.

O primeiro termo do lado direito da Eq. (2.14) é a força de interação fluido-partícula, que é composta do empuxo e de uma força resistiva. Segundo Berker (1963), a força resistiva exercida pelo fluido sobre a partícula depende das dimensões e forma da partícula, do campo de velocidades do fluido não perturbado pela presença de particulado, da presença de contornos rígidos e outras partículas e do histórico de aceleração da partícula.

O tratamento da força resistiva se dá pela determinação de um parâmetro denominado coeficiente de arraste. Referências para correlações de cálculo do coeficiente de arraste e uma série de outros desenvolvimentos para descrição da interação entre fluido e partículas são encontrados em Massarani (2002).

2.4 Instrumentos de medição

De acordo com a organização norte-americana *Instrument Society of America* (ISA), um instrumento industrial é todo dispositivo usado para direta ou indiretamente medir e/ou controlar uma variável (ANSI, 1992). Esta definição inclui sensores, elementos de controle, dispositivos computacionais e dispositivos elétricos. O termo não se aplica a partes que são componentes internos de instrumentos.

Segundo a mesma norma, os instrumentos industriais podem ser classificados entre instrumentos de medição (e.g., termômetros, manômetros, velocímetros, medidores de vazão, medidores de nível), instrumentos de medição e atuação (e.g., termostatos, pressostatos, chaves de fim de curso) e instrumentos de atuação (e.g., válvulas manuais e automáticas, motores de passo, inversores de frequência, motores elétricos, bombas, aquecedores).

Os termos sensor e transdutor são sinônimos e se referem a qualquer dispositivo capaz de transformar um tipo de sinal em outro tipo, com o objetivo de realizar uma medição ou possibilitar o controle de um processo ou fenômeno (FERREIRA, 1988). Embora o termo transdutor possa se referir a um dispositivo capaz de converter uma forma de energia em outra, no contexto de sistemas de medição diz respeito apenas a um dispositivo capaz de transformar um sinal em outro.

Os sinais são informações de estímulo ou resposta e podem ser analógicos ou digitais. Esta classificação diz respeito à natureza do sinal que contém a informação desejada. O sinal analógico é uma função contínua associada ao processo que se mede. Em sinais analógicos, o valor preciso da quantidade contendo a informação (e.g. corrente, voltagem, rotação, deslocamento) é relevante.

Os sinais digitais, por outro lado, são de natureza binária, isto é, são o resultado do estado lógico (falso/verdadeiro) de um circuito eletrônico que tem um conversor analógico/digital (conversor A/D). A grande vantagem de um sinal digital é ser imune, quando transmitido, a ruídos que poderiam adulterar a informação original (FRANÇA, 2007).

Para os fins desta monografia, instrumentação diz respeito ao conceito de se instalar instrumentos industriais de medição e utilizá-los para mensurar grandezas físicas. Apresenta-se um diagrama funcional, Figura 2.2, para representar a funcionalidade dos sensores do aparato experimental.

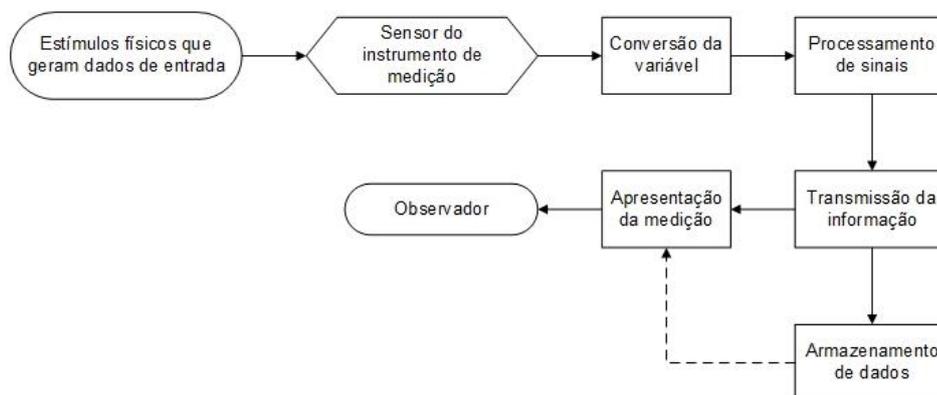


Figura 2.2. Diagrama funcional dos sensores do aparato experimental.

Medir é realizar um procedimento de comparação entre diferentes padrões de uma mesma grandeza de interesse. O objetivo de uma medição é determinar o valor do mensurando (da grandeza medida). A medição demanda uma apropriada especificação da grandeza, do método e do procedimento de medição. O resultado é uma aproximação ou estimativa do valor da grandeza, motivo pelo qual o resultado de uma medição somente está completo se estiver acompanhado da incerteza da estimativa (ISO GUM, 2008).

Em JCGM (2012) são propostas diversas definições e é apresentado o universo de vocabulário sobre metrologia. Mensurando é a grandeza específica

submetida à medição, grandeza de entrada é a variável desejada e grandeza de saída é a variável indicada por um dado instrumento de medição. Rastreabilidade é a capacidade de se determinar toda a cadeia de comparações que conduz ao padrão primário.

O conceito de exatidão é apenas qualitativo, e se refere ao grau de concordância entre o resultado da medição e o valor verdadeiro do mensurando, i.e., reflete a proximidade do valor verdadeiro. Precisão, por sua vez, é a aptidão de um instrumento de medição em fornecer indicações muito próximas, quando se mede o mesmo mensurando, sob as mesmas condições. A diferença entre os conceitos de exatidão e precisão está ilustrada na Figura 2.3.

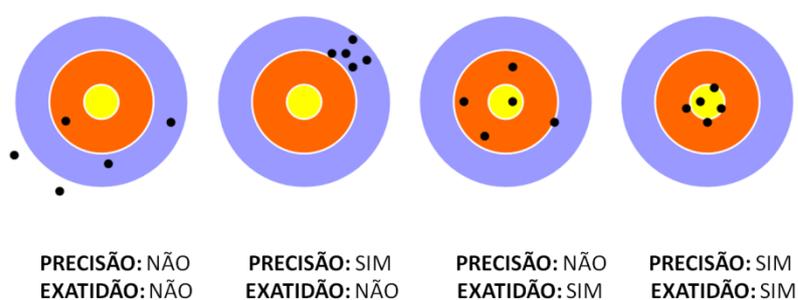


Figura 2.3. Diferença entre os conceitos de precisão e exatidão.
Fonte: CalibraEND (2013).

Doebelin (1989) apresenta conceitos fundamentais acerca de sistemas de medição, quais sejam: procedimento de medição, método exemplar, grandezas de influência interferentes e modificantes, controle estatístico, zona morta, faixa nominal, fundo de escala, faixa operacional, limiar de mobilidade e resolução.

Procedimento de medição é a realização prática de um método de medição, i.e., uma sequência de atividades para se mensurar uma grandeza ou propriedade física. Na prática, deve-se usar um método exemplar.

Método exemplar é um procedimento de medição reconhecido pelos especialistas como sendo suficientemente correto para a aplicação a qual se destina o instrumento.

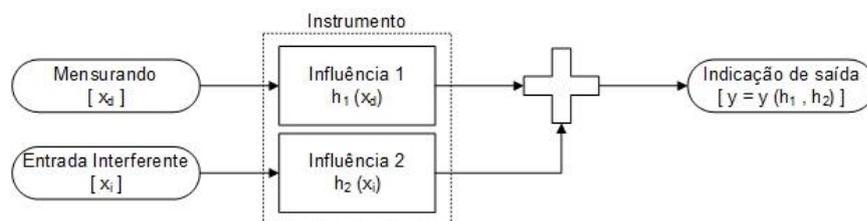
Conforme definido, mensurando é o termo referente à grandeza física que se deseja medir. Já as grandezas indesejadas são definidas como grandezas de influência, e podem ser divididas em entradas interferentes e entradas modificantes.

Entradas interferentes são grandezas que influenciam no procedimento de medição porque somam um efeito extra ao mensurando na indicação de saída do instrumento. Os sinais de entrada interferentes são quantidades às quais o instrumento de medição é acidentalmente sensível. Entradas modificantes são grandezas que alteram tanto o mensurando como as entradas interferentes, sendo também chamadas de grandezas de influência multiplicativas.

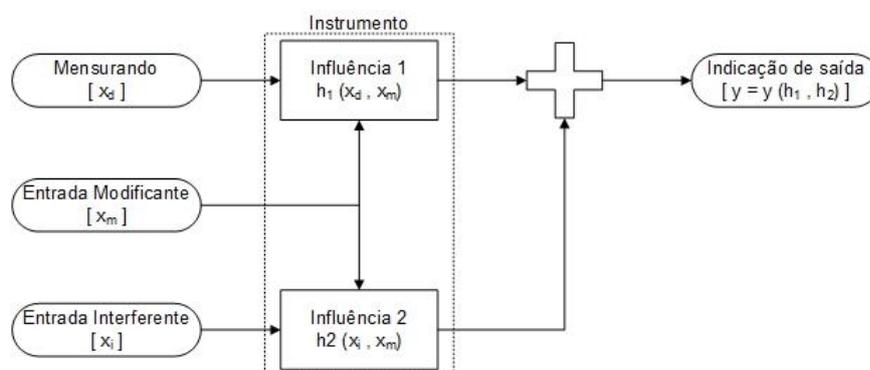
A fim de facilitar o entendimento dos conceitos de grandezas de influência interferentes e modificantes apresenta-se a Figura 2.4, em que é mostrada a diferença entre (a) um processo de medição perfeito, (b) um processo de medição com grandezas de influência interferentes e (c) um processo de medição com grandezas de influência interferentes e modificantes.



(a) Processo de medição perfeito.



(b) Processo de medição com grandezas de influência interferentes.



(c) Processo de medição com grandezas de influência interferentes e modificantes.

Figura 2.4. Fluxograma representativo de processos de medição e das grandezas de influência.

Controle estatístico é o estado de um procedimento de medição em que as entradas interferentes e modificantes são mantidas praticamente constantes, i.e., com apenas pequenas flutuações aleatórias em torno de seus valores médios.

Estímulo é um sinônimo para o dado de entrada de um instrumento, enquanto resposta é o sinônimo do dado de saída. Zona morta é a menor variação no estímulo que produz variação detectável na resposta.

Faixa nominal é o intervalo de valores que o medidor é capaz de indicar. Por exemplo, um instrumento de medição de pressão com saída em tensão que possua faixa nominal de 1V a 5V.

Fundo de escala é o maior dos valores absolutos da faixa nominal. No exemplo do instrumento de pressão com faixa nominal de 1V a 5V o fundo de escala é de 5V.

Faixa de medição, faixa de trabalho ou faixa operacional é o intervalo do mensurando para o qual o erro de medição se mantém dentro dos limites especificados. Por exemplo, um instrumento de medição de pressão projetado para medir pressões de 1 bar a 10 bar terá uma faixa de trabalho de 1 bar a 10 bar.

Limiar de mobilidade (tradução de *threshold*) é a menor variação no estímulo, sendo esta variação lenta e uniforme, que produz variação detectável na resposta. Por exemplo, atrito estático em instrumentos mecânicos impedem a deflexão inicial quando um estímulo de força está abaixo de um certo limiar (menor do que o atrito estático máximo).

Resolução é a menor diferença entre indicações de um instrumento que pode ser significativamente percebida. Por exemplo, um instrumento digital de medição de pressão que indica valores de 1,0 bar a 10,0 bar e é capaz de mostrar apenas a primeira casa decimal, possui resolução de 0,1 bar.

Segundo JCGM (2012), a medição é uma variável aleatória, já que o resultado é afetado por muitas grandezas além do mensurando, sobre as quais se conhece pouco e que podem variar de forma aleatória. É proposto que o resultado de uma medição segue a Eq. (2.15).

$$y = y_{\text{verdadeiro}} + e_s + e_a \quad (2.15)$$

A grandeza y é o valor da medição indicado pelo instrumento, o valor verdadeiro, $y_{\text{verdadeiro}}$, seria o resultado obtido em uma medição perfeita, e_s é o erro

sistemático e e_a é o erro aleatório. O conceito de erro de medição é a diferença entre o resultado indicado e o valor verdadeiro.

Erro aleatório é o resultado da medição menos a média de um número infinito de medições efetuadas sob as mesmas condições de repetitividade. Erro sistemático é a média de um número infinito de medições, efetuadas sob as mesmas condições de repetitividade, menos o valor verdadeiro. O erro aleatório está associado ao conceito de precisão e o erro sistemático ao conceito de exatidão. A Figura 2.5 representa o erro aleatório e o erro sistemático na composição do erro total de medição.

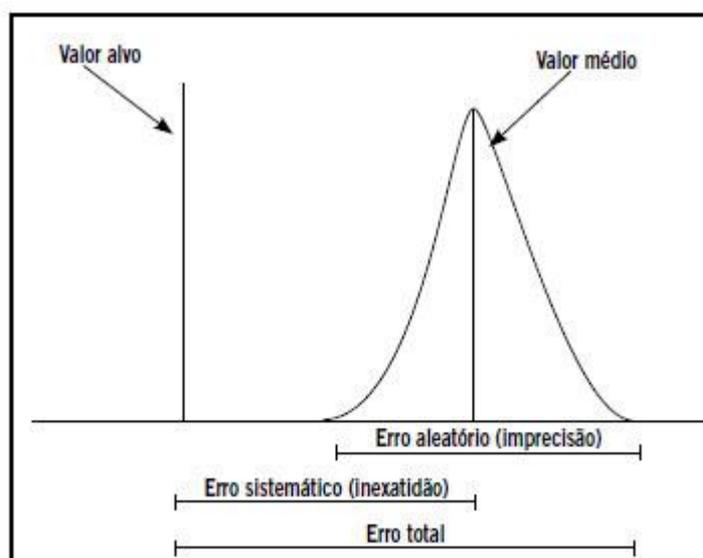


Figura 2.5. Representação do erro de medição e de suas parcelas sistemática e aleatória.
Fonte: Vieira et al. (2011).

O erro aleatório é aquele que ocorre de forma inesperada e com intensidade muito nociva aos resultados das medições. Este erro representa as pequenas variações que ocorrem em medidas repetidas de uma grandeza. Estas variações tem como causa alterações ambientais ou espaciais, variação devido ao equipamento de medição e interferência elétrica, entre outras. Embora não seja possível compensar o erro aleatório, ele pode geralmente ser reduzido ao se aumentar o número de observações ou melhorar a tecnologia do sistema de medição (melhor ambiente, novos equipamentos ou treinamento dos técnicos).

O erro sistemático é aquele que ocorre em todas as medições com a mesma intensidade. Assim como o erro aleatório, o erro sistemático não pode ser eliminado,

porém pode ser reduzido. Supondo que um erro sistemático se origina de um efeito reconhecido de uma grandeza de influência em um resultado de medição, se este efeito puder ser quantificado e se for significativo com relação à exatidão requerida da medição, uma correção ou fator de correção pode ser aplicado para compensar o efeito. (ESTATACAMP, 2010).

Repetitividade é a capacidade de um instrumento de fornecer indicações muito próximas, para o mesmo mensurando, sob as mesmas condições de medição. Reprodutibilidade é a capacidade de um instrumento de fornecer indicações muito próximas, para o mesmo mensurando, sob diferentes condições de medição. O escopo das definições apresentadas está representado na Figura 2.6.

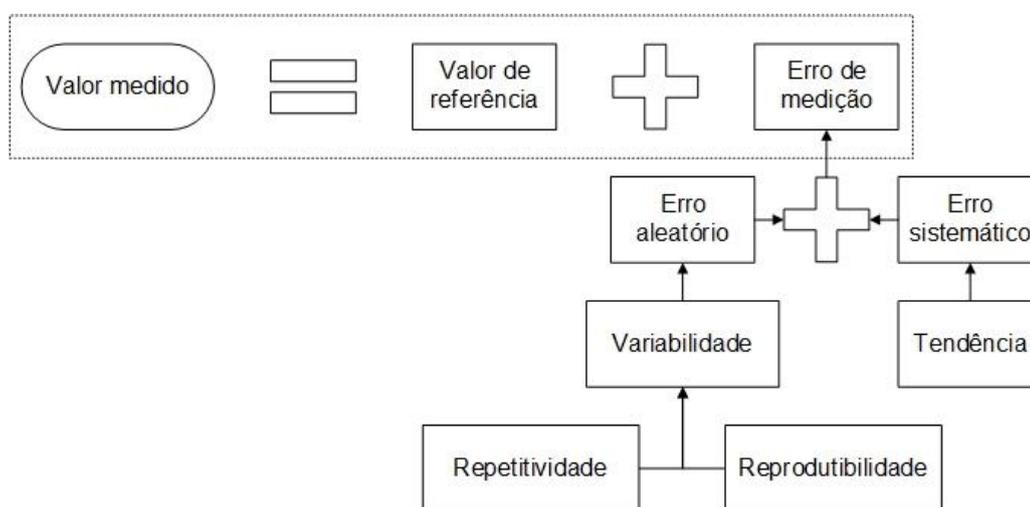


Figura 2.6. Escopo dos erros de medição.

2.5 Calibração

Calibração é um procedimento experimental que visa a correlacionar valores indicados por um sistema de medição com a correspondente grandeza sendo medida. Segundo Doebelin (1989) a calibração pode ser dividida em duas sequências distintas de procedimentos, a calibração ou caracterização estática de instrumentos e a calibração ou caracterização dinâmica de instrumentos.

A caracterização estática é a determinação da relação entre os dados de entrada e saída do instrumento quando as condições operacionais são observadas em regime permanente e o resultado é a curva característica estática, um gráfico com os pontos oriundos dos ensaios de calibração e uma função polinomial que melhor se ajuste a eles. A calibração estática possui as seguintes características:

- Todas as entradas são mantidas constantes exceto uma, a variável sob teste.
- Esta entrada sob teste é variada em diversos valores constantes, o que por consequência gera diversos valores constantes na saída.
- A relação entre a entrada e a saída é a calibração estática, e ela é válida apenas sob as condições estabelecidas no ensaio, i.e., para mesmo circuito experimental, mesmo ambiente laboratorial e mesmas condições de operação.

A Figura 2.7 representa, para um dado mensurando, as medidas da grandeza de entrada $x(t)$ em função do tempo e da grandeza de saída $y(t)$ em função do tempo. O que se busca na caracterização estática é justamente a relação entre os valores X , dado pela Eq. (2.16), e Y , dado pela Eq. (2.17). Uma vez que fomenta diversos resultados para os experimentos desta monografia, a descrição dos procedimentos de obtenção de pares de pontos $(X;Y)$ para cada instrumento de medição do aparato experimental, bem como os resultados para determinação da relação entre sinal de entrada e de saída, estão explanados na 4.2.5.



Figura 2.7. Representação do processo de monitoramento dos sinais para obtenção dos valores em regime permanente na entrada (X) e na saída (Y) do instrumento.

$$X = \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) \quad (2.16)$$

$$Y = \lim_{t \rightarrow \infty} y(t) \quad (2.17)$$

Os pares de valores de $(X;Y)$ são utilizados como pontos em um gráfico, usualmente denominado de curva característica estática de um determinado instrumento (e.g., vazão, pressão, temperatura) e retratado de forma genérica na Figura 2.8.

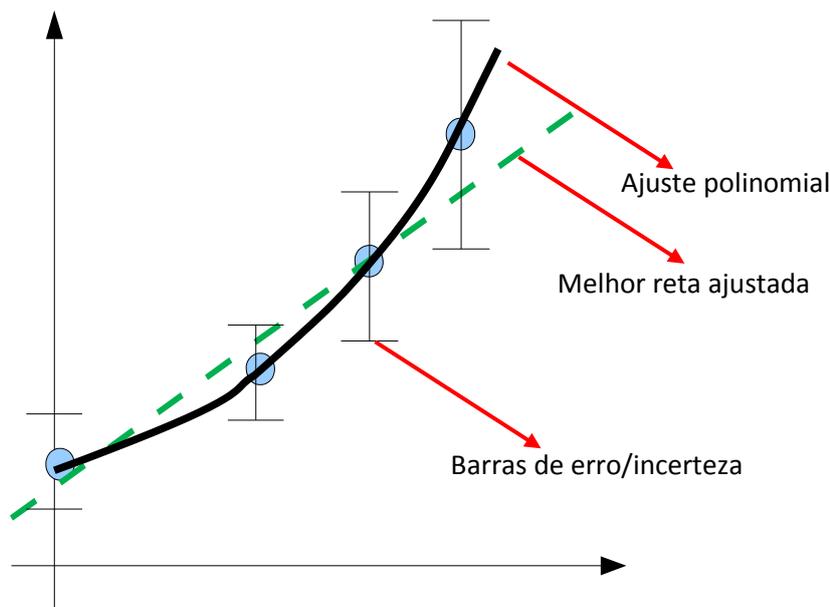


Figura 2.8. Esquema da metodologia para construção de curvas estáticas para um dado instrumento.

A caracterização dinâmica de instrumentos, por sua vez, se propõe a determinar a relação entre o comportamento transitório do sinal de entrada e de saída, as regiões destacadas em vermelho na Figura 2.9. Em geral, são formuladas e resolvidas equações diferenciais, em que a indicação de saída é função do mensurando, de variáveis de estado e das grandezas de influência interferentes e modificadoras. Por se tratar de um procedimento complexo e que não alcança o escopo desta monografia, a metodologia que envolve a calibração dinâmica não será tratada na sequência do texto.

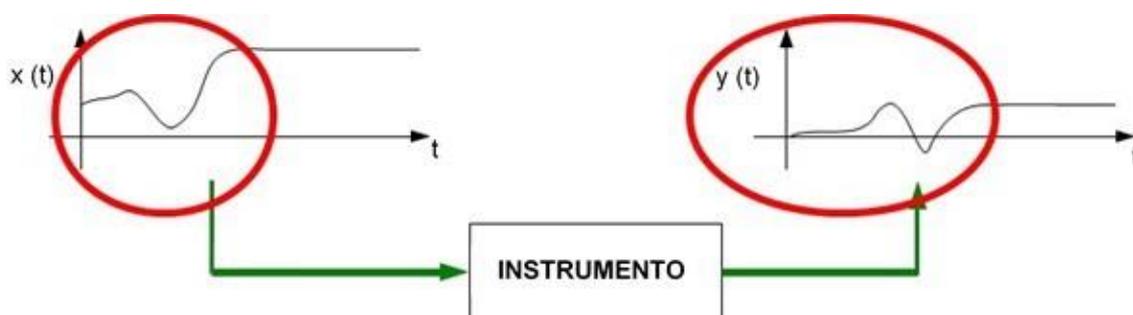


Figura 2.9. Representação da região de interesse para a caracterização dinâmica de instrumentos, nas funções temporais do sinal de entrada e de saída.

A análise e interpretação dos resultados obtidos por meio das curvas estáticas de calibração demandam conceitos estatísticos. Reis (1994) apresenta

definições para regressão linear, mínimos quadrados, linearidade, sensibilidade, coeficiente de determinação e histerese.

Regressão linear é um método estatístico para a modelagem da relação entre uma variável escalar dependente Y e uma variável independente X (ou mais variáveis independentes, quando o método é denominado regressão linear múltipla). Na regressão linear simples, utiliza-se um método teórico ou um método de aproximações polinomiais para expressar Y em função de X como uma reta que se ajuste aos pontos obtidos nos ensaios. Assim, em termos matemáticos a regressão linear pode ser expressa pela Eq. (2.18).

$$Y = \alpha + \beta X + \varepsilon \quad (2.18)$$

sendo Y a variável dependente, X a independente, α o coeficiente linear da reta (a constante que representa a interceptação da reta com o eixo vertical do gráfico), β o coeficiente angular da reta (a inclinação) e ε é a variável que inclui todos os erros de medição.

O cálculo dos coeficientes α e β é realizado com base em alguma técnica de estimativa ou otimização matemática, dentre as quais se destaca o método dos mínimos quadrados. Costuma-se modificar a Eq. (2.18) para tratar do método dos mínimos quadrados conforme a Eq. (2.19).

$$\hat{Y}_i = \hat{\alpha} + \hat{\beta} \hat{X}_i + \hat{\varepsilon}_i \quad (2.19)$$

em que “^” representa o fato de que os parâmetros se tratam de estimativas, “i” indica cada uma das observações que origina um par $(X; Y)$ e $\hat{\varepsilon}$ (o erro estimado) é chamado de resíduo.

Seja n o número de observações e de pares $(X; Y)$ obtidos, o método dos mínimos quadrados consiste em minimizar a soma dos quadrados dos resíduos, i.e., minimizar $\sum_{i=1}^n \hat{\varepsilon}_i^2$. Minimizando a soma do quadrado dos resíduos, os coeficientes estimados para a Eq. (2.19) resultam na menor diferença entre a previsão de Y e o valor realmente observado. Após alguns passos algébricos, o cálculo dos coeficientes $\hat{\alpha}$ e $\hat{\beta}$ para a regressão linear simples, segundo o método dos mínimos quadrados, é obtido pelas Eq. (2.20) e Eq. (2.21).

$$\hat{\alpha} = \bar{Y} - \hat{\beta}\bar{X} \quad (2.20)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{X}_i - \bar{X})(\hat{Y}_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (\hat{X}_i - \bar{X})^2} \quad (2.21)$$

em que \bar{Y} é a média amostral de Y e \bar{X} é a média amostral de X .

As médias amostrais podem ser calculadas pelas Eq. (2.22) e Eq. (2.23).

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \quad (2.22)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (2.23)$$

Linearidade é a maior diferença existente entre um ponto da curva de calibração estática e a melhor reta ajustada por regressão linear, no sentido de mínimos quadrados. A Figura 2.10 mostra uma curva genérica de caracterização estática com os pontos provenientes de ensaios em azul, a reta ajustada por regressão linear em vermelho e o conceito de linearidade em destaque.

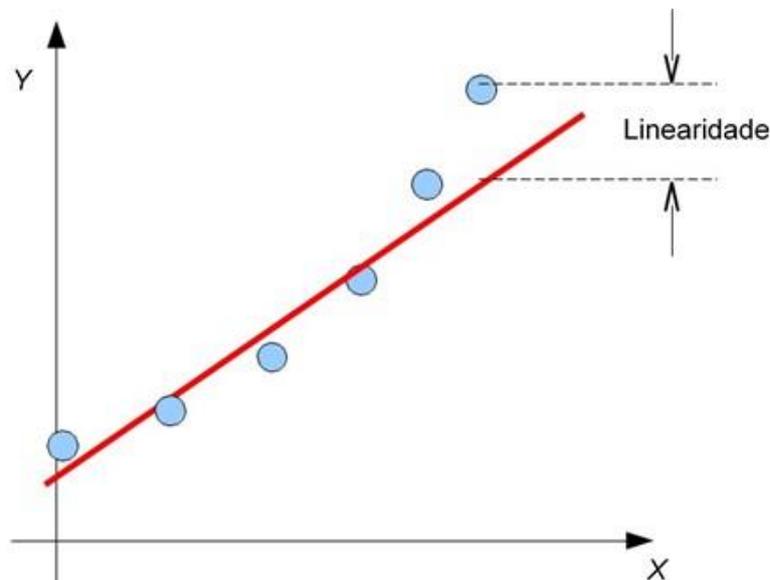


Figura 2.10. Linearidade de uma curva de caracterização estática.

Sensibilidade ou ganho (G) é o conceito definido pela Eq. (2.24), que expressa a variação na resposta de um instrumento dividida pela variação

correspondente do estímulo (para a caracterização estática é igual ao coeficiente angular da reta).

$$G = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \quad (2.24)$$

O coeficiente de determinação (R^2) é um parâmetro que varia entre 0 e 1 e mede o quanto um modelo estatístico utilizado para representar os resultados de experimentos se ajusta à amostra de dados coletada. Por exemplo, se o R^2 de um modelo de regressão linear simples é 0,82, significa que 82% da variável dependente consegue ser explicada pela regressão. Sejam definidos os parâmetros soma total quadrados (SQ_{total}), Eq. (2.25), soma dos quadrados explicada ($SQ_{explicada}$), Eq. (2.26), e soma dos quadrados dos resíduos ($SQ_{resíduos}$), Eq. (2.27), o coeficiente de determinação de uma regressão linear é calculado por meio da Eq. (2.28).

$$SQ_{total} = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (2.25)$$

$$SQ_{explicada} = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 \quad (2.26)$$

$$SQ_{resíduos} = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2 \quad (2.27)$$

$$R^2 = \frac{SQ_{explicada}}{SQ_{total}} = 1 - \frac{SQ_{resíduos}}{SQ_{total}} \quad (2.28)$$

Histerese é a maior diferença entre curvas estáticas de calibração obtidas quando o mensurando é variado com a derivada positiva (valores crescentes), em relação ao caso em que é variado com derivada negativa (valores decrescentes), conforme apresentado na Figura 2.11. Para avaliar a histerese é preciso realizar o procedimento de calibração estática primeiro aumentando os valores do mensurando, do mínimo até o máximo, e depois diminuindo, do máximo até o mínimo.

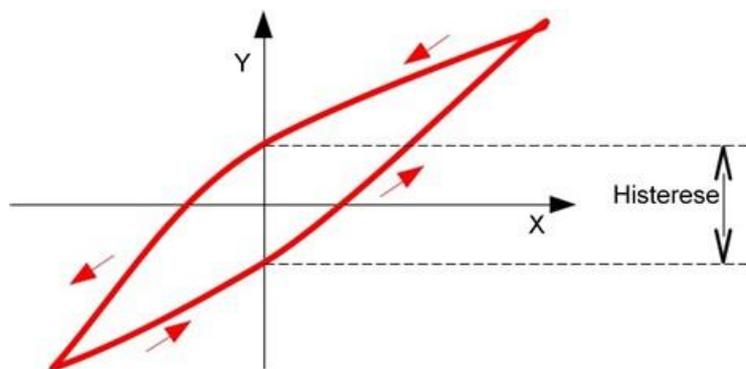


Figura 2.11. Histerese em curva de caracterização estática.

2.6 Expressão de incertezas experimentais

Os conceitos referentes ao estudo de incertezas e ao tratamento estatístico de dados amostrais são fundamentais na análise de resultados provenientes de trabalhos experimentais. Uma vez que não estão contemplados nos objetivos e resultados deste trabalho, estes fundamentos são apresentados no Apêndice B.

2.7 Síntese

A fundamentação teórica apresentada neste capítulo, em resumo, trata inicialmente de fundamentos relacionados à mecânica dos fluidos, utilizados diretamente tanto no projeto como nos ensaios da bancada experimental. As considerações envolvem perda de carga e a determinação do tipo regime e do comprimento de desenvolvimento do escoamento.

Em seguida, é abordada a caracterização de sistemas particulados, um fator importante para o projeto da bancada experimental. São realizados comentários sobre a modelagem de escoamentos sólido-fluido, que são o foco de estudo deste trabalho.

No escopo da instrumentação do aparato experimental, são apresentados conceitos sobre instrumentos de medição e a metodologia utilizada na calibração estática dos instrumentos. O próximo capítulo trata da metodologia de projeto para concepção e construção da bancada.

3 METODOLOGIA E PROJETO CONCEITUAL

No presente capítulo, será apresentada a metodologia desenvolvida para a concepção e construção da bancada experimental. Inicialmente são apresentadas considerações preliminares para o escoamento previsto. Na sequência, são abordados os projetos definitivos para a seção de teste e para o circuito hidráulico, além de considerações sobre os aspectos construtivos.

3.1 Características previstas inicialmente para o escoamento

De forma similar à maioria dos problemas que envolvem fenômenos de transporte, a concepção do aparato experimental, foco deste trabalho, tem por início o levantamento de hipóteses e de condições de operação. Algumas hipóteses e condições operacionais são impostas pela formulação do problema e correspondem a características de geometria, do escoamento e dos modelos matemáticos. Outras restrições são relacionadas a aspectos construtivos, e dizem respeito ao orçamento, à limitações espaciais ou impossibilidades de montagem e funcionamento.

Para a validação da bancada experimental e escoamento com água, seria interessante observar tanto escoamentos laminares quanto turbulentos. Do ponto de vista da modelagem matemática para caracterização de vedação de fraturas, seria interessante trabalhar com regime de escoamento laminar e fluidos de maior viscosidade, como mistura água-glicerina e fluidos de perfuração usuais. Assim, o mais adequado é a possibilidade de controle da faixa de operação de vazão. A possibilidade de operar com ampla gama controlável de velocidades e números de Reynolds passa a ser requisito de projeto. Para tanto, pode-se configurar os parâmetros operacionais da bomba (e.g. com um inversor de frequência) ou utilizar um sistema controlado de válvulas.

A velocidade média do escoamento nas condições de regime, durante os experimentos, deve necessariamente ser superior à velocidade crítica de sedimentação das partículas, para que estas não decantem e venham a entupir a tubulação ou danificar os componentes.

De acordo com o fluido de trabalho em operação, o escoamento poderá ser compressível ou incompressível. Vale ressaltar que a intenção inicial é a utilização

de água como fluido de trabalho, por motivo de facilidade de tratamento, visualização e custo.

3.2 Metodologia de projeto

Alguns procedimentos metodológicos foram estabelecidos como diretrizes para o projeto e construção do aparato experimental. As etapas planejadas têm por base as metodologias para desenvolvimento de projetos e produtos propostas por Back *et al.* (2008) e Pahl *et al.* (2005).

As atividades propostas e etapas gerais de execução seguem uma sequência lógica bem definida, apresentada com descrições em forma de fluxograma na Figura 3.1. O ponto de partida é a identificação da oportunidade de projeto, seguida de uma série de procedimentos visando à criação de um alicerce teórico para a elaboração do projeto do dispositivo experimental (e.g. estudos de projetos hidráulicos, mecânica dos fluidos, sistemas particulados, instrumentação, coleta e análise de amostras de dados experimentais).

Estes procedimentos consistem de uma vasta pesquisa bibliográfica com o intuito de se consultar livros, artigos científicos, estudos, normas e manuais técnicos em geral, de modo que sirvam às fundamentações e provenham subsídios para comparações e complementações.

A revisão bibliográfica contempla a adoção de convenções e nomenclaturas. Os Conceitos basilares da fundamentação teórica servem de suporte à formulação do problema e sua contextualização. Fica evidente, dentro deste escopo, as vantagens de se abordar a aplicabilidade de particulados em soluções para o problema de perda de circulação lançando mão de um experimento. Ainda, é percebida a escassez de trabalhos deste caráter, bem como a necessidade de gerar dados para comprovar resultados numéricos.

Após a compreensão dos conceitos físicos envolvidos, iniciam as etapas de projeto informacional e projeto conceitual do circuito experimental. São levantadas as necessidades a serem contempladas, que são transformadas em condições de contorno, requisitos e limitações de projeto.

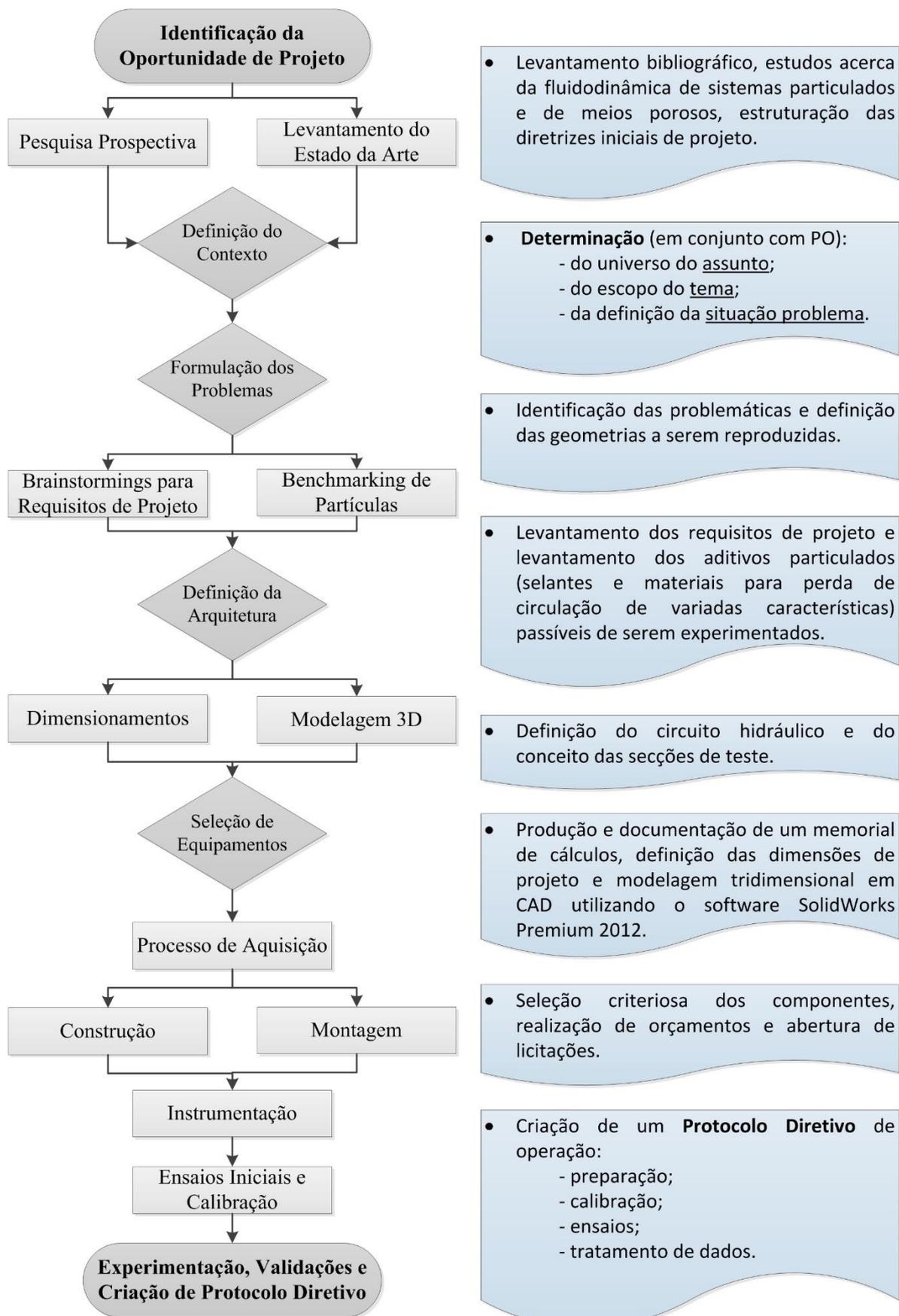


Figura 3.1. Fluxograma dos procedimentos metodológicos para desenvolvimento do projeto.

A partir da abrangência do contexto e formulação dos problemas, iniciam as definições de geometrias a serem reproduzidas. São realizadas uma série de reuniões envolvendo a equipe do LACIT visando à idealização do circuito e dos resultados a serem esperados, além das inúmeras considerações e nuances sobre a seleção de equipamentos e possibilidades de construção. Nesta etapa, diferentes concepções são idealizadas, a fim de analisar as diferentes possibilidades construtivas e definir a abordagem mais adequada ao tratamento do problema a ser estudado. Surge a necessidade de estabelecer um documento diretivo orientando a concepção e a sequência de procedimentos para realização do projeto.

É produzido um banco de dados englobando os mais diversos aditivos para perda de circulação empregados na indústria e, a partir de suas propriedades, estabelecidos alguns limites para tamanho e forma de particulados a serem experimentados. Estas restrições tiveram reflexo nas dimensões da seção de teste e tubulação.

Uma série de comparações com outros experimentos e prospecções de mercado são então realizadas, em paralelo à modelagem tridimensional das concepções mais viáveis. Finalmente, as dimensões e parâmetros de todo o aparato experimental são definidos, e uma seleção criteriosa dos equipamentos adequados é direcionada. A partir daí são feitos orçamentos e abertos processos de licitação. Vale ressaltar a ocorrência de dificuldades no processo de aquisição, sobretudo com referência a prazos.

A construção e montagem da bancada é realizada no espaço físico do LACIT no campus central da UTFPR, com auxílio e suporte do corpo técnico do laboratório. São levantadas necessidades acerca de instrumentos de medição e sistemas de aquisição de dados, devidamente orçados, licitados, adquiridos e instalados.

A etapa atual de desenvolvimento contempla testes preliminares de funcionamento da bancada, a programação da interface de aquisição e interpretação de sinais, estudos do comportamento estático dos instrumentos de medição e o respectivo processo de calibração e a filmagem de escoamento particulado na seção de teste.

Quanto às metodologias para visualização e tratamento de dados, embora existam diversas técnicas experimentais para o estudo dos escoamentos

particulados, a utilização de uma câmera de alta velocidade poderá ser bastante eficaz, uma vez que as estruturas verificadas no escoamento (eg. as partículas, o fluido transparente e as geometrias) são bem definidas.

3.3 Projeto da bancada experimental

A construção da bancada experimental é o principal objetivo a que se destina este trabalho. O propósito da montagem da bancada, conforme explicado no primeiro capítulo, é permitir o estudo da fluidodinâmica de sistemas particulados, reproduzindo o escoamento sólido-fluido em um canal parcialmente poroso com fraturas discretas e o processo de vedação das fraturas com o material particulado.

Na etapa atual de projeto e para os fins desta monografia não são contemplados meio poroso e fraturas, e a concepção da bancada diz respeito aos projetos da seção de testes e do circuito hidráulico e à execução destes projetos, conforme explicado na sequência.

As concepções preliminares do circuito hidráulico e da seção de testes são apresentadas no Apêndice C.

3.3.1 Seção de testes

O requisito inicial de projeto da seção de teste é possibilitar o estudo e caracterização dos fenômenos formulados no escopo da situação problema. Após o embasamento teórico realizado, as concepções preliminares da seção de testes e de todo o circuito hidráulico foram remodeladas a partir de reuniões realizadas no CENPES e nas dependências do LACIT.

O problema proposto foi simplificado, visando permitir o seu estudo de maneira experimental. Como modelo inicial para a seção de testes foi considerado um poço de perfuração vertical real, com diâmetro de oito polegadas e meia com a consideração da existência de um plano de fratura. A Figura 3.2 (a) apresenta um poço de perfuração vertical fraturado e a Figura 3.2 (b) o início do processo de inserção de partículas selantes. A Figura 3.2 (c) representa a fratura vedada pelas partículas e o fim da perda de circulação.

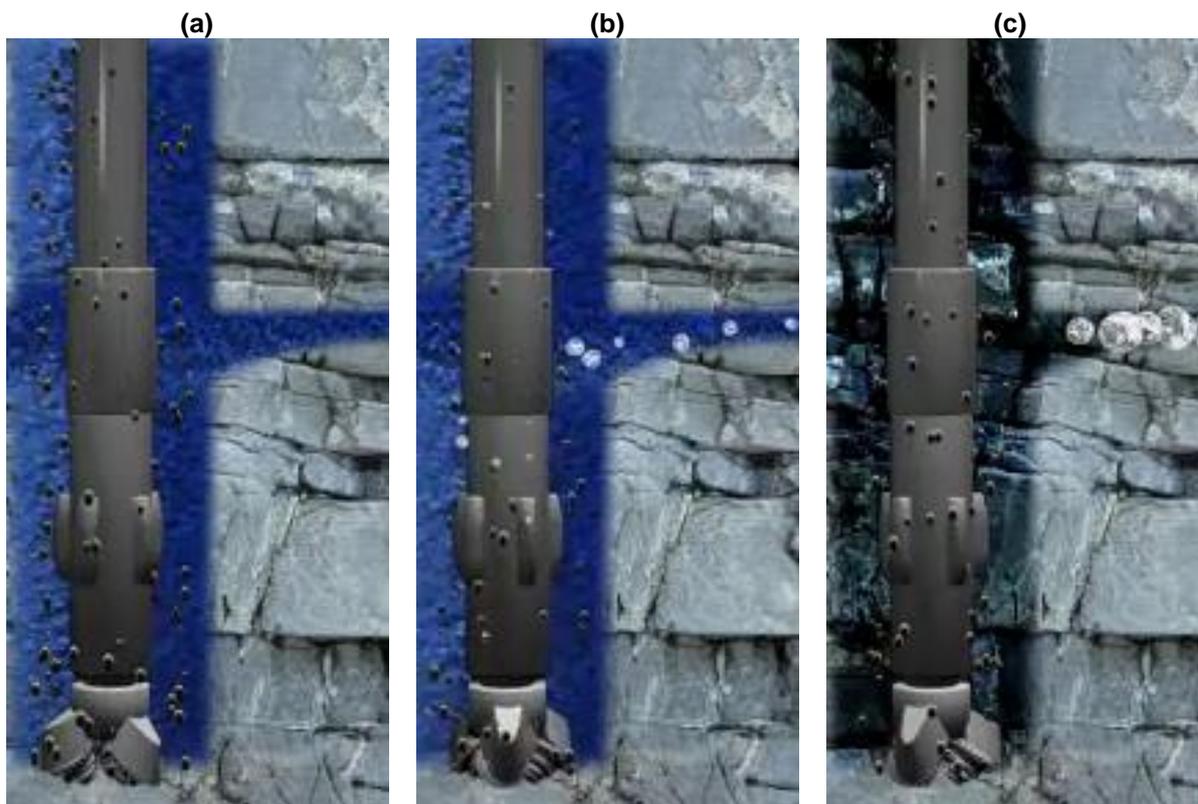


Figura 3.2. Poço de perfuração vertical com presença de fratura
Fonte: Adaptado de Matex (2014).

Para a construção da seção de testes, a fratura foi considerada como um plano de fratura com comprimento (Z_{FR}) muito maior que o diâmetro do poço e do que a espessura da fratura (e_{FR}), conforme apresentado na Figura 3.3.

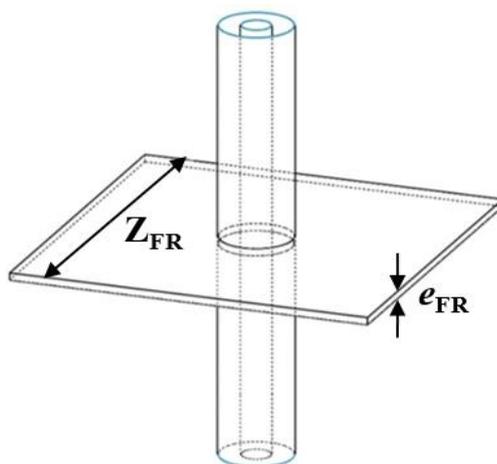


Figura 3.3. Simplificação de um poço vertical com a presença de um plano de fratura.
Fonte: De Lai (2013).

A Figura 3.4 apresenta a vista do poço considerado em corte.

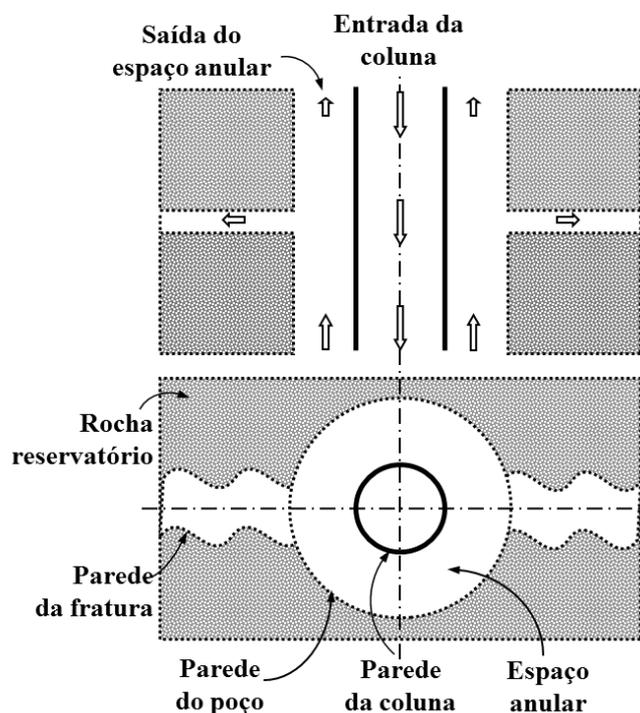


Figura 3.4. Corte longitudinal e transversal do poço simplificado
Fonte: De Lai (2013).

A partir das considerações realizadas, a seção de estudo foi definida como o canal anular do poço, e devido à complexidade de se monitorar experimentalmente o escoamento e a perda de circulação em uma seção de testes cilíndrica e à dificuldade de simular numericamente o problema tridimensional, a seção de testes foi tomada como bidimensional, com uma pequena espessura, com o intuito de desconsiderar o efeito tridimensional do escoamento.

Neste sentido, a modelagem preliminar da geometria concebida para representar a situação problema é apresentada na Figura 3.5, em que as escalas da fratura e das partículas são exageradas intencionalmente com o intuito de facilitar a abstração. A imagem representa o escoamento de um fluido de perfuração com partículas em suspensão em um canal parcialmente poroso contendo uma fratura discreta.

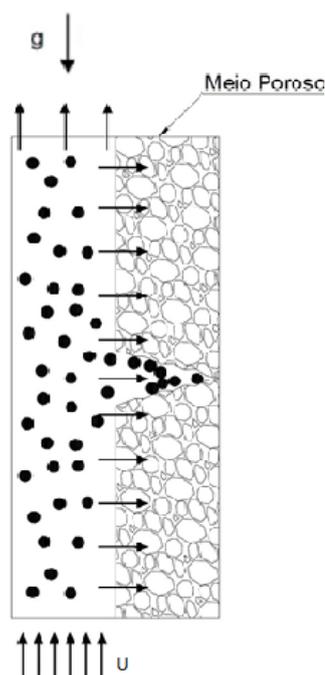


Figura 3.5. Geometria preliminar projetada para representar a situação problema formulada.

Todavia, não é possível reproduzir no aparato experimental todas as condições e características observadas no problema real, motivo pelo qual geometrias idealizadas se fazem necessárias. A intenção é estudar inicialmente uma seção de teste de perfil retangular livre de preenchimento, conforme Figura 3.6, para progressivamente alterar a configuração inserindo meios porosos e fraturas discretas.

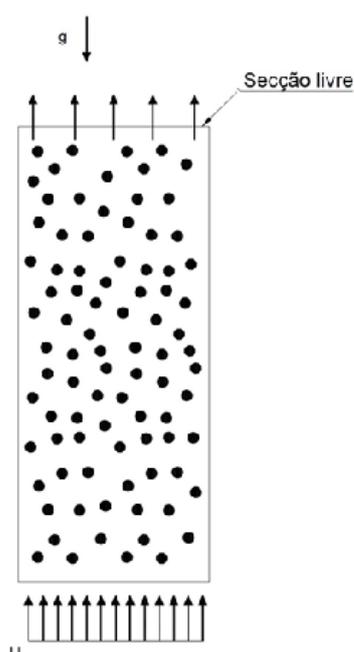


Figura 3.6. Projeto de seção de teste vertical de perfil retangular, livre de preenchimento.

Além da seção livre de preenchimento, uma sequência progressiva de incrementos foi prevista para geometrias da seção de teste, conforme mostrado na Figura 3.7.

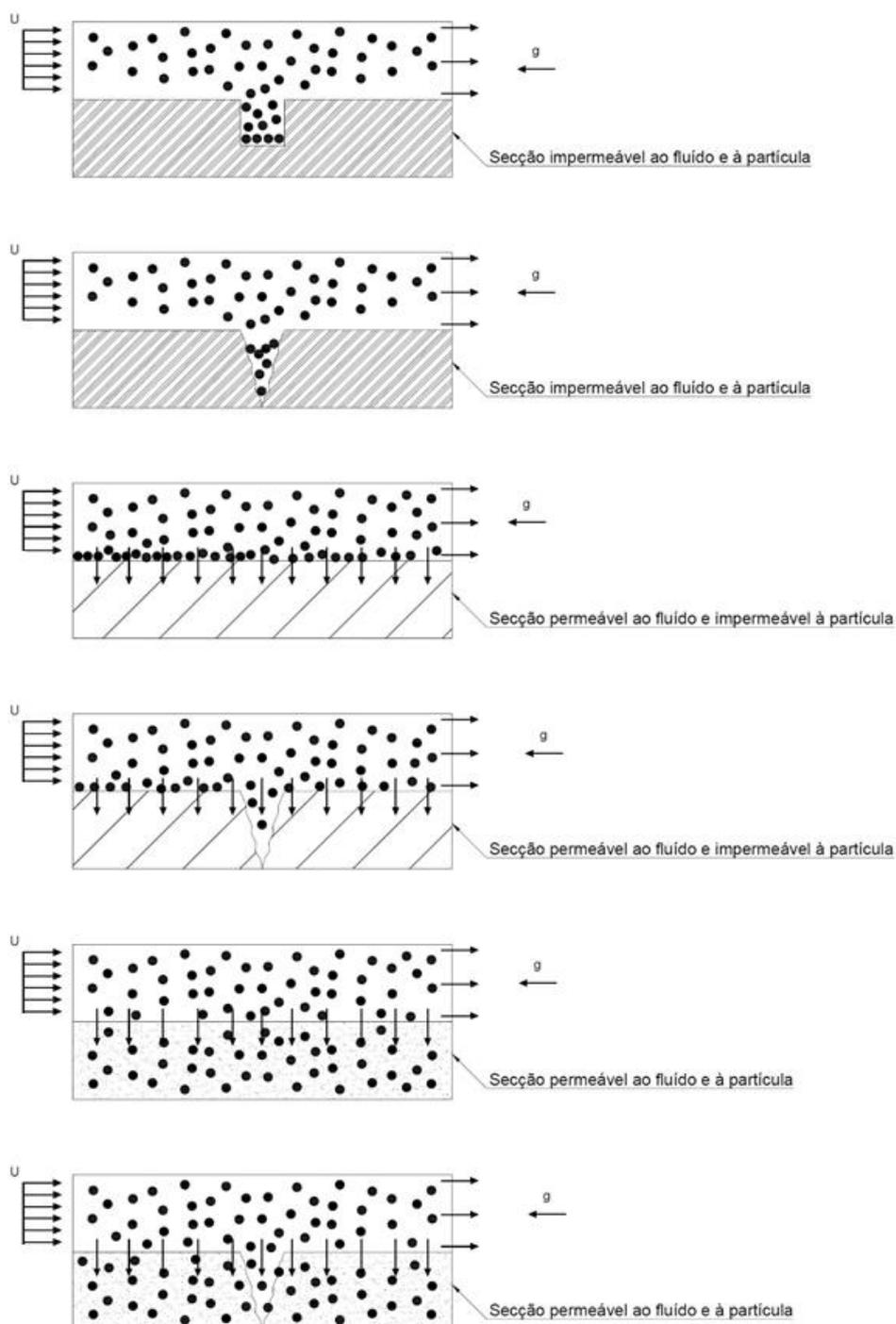


Figura 3.7. Representação de geometrias de teste de perfil retangular com meios porosos de porosidades e permeabilidades distintas.

A primeira das progressivas configurações a serem testadas seria a seção de teste de perfil retangular sem preenchimento. Esta seção simularia uma câmara de sedimentação e seria importante para os resultados preliminares, sobretudo para a instrumentação e calibração de parâmetros de operação (e.g. volumes de mistura adequados, rotação e vazão da bomba, requisitos de garantia de suspensão).

A utilização inicial de uma seção livre de preenchimento também é interessante do ponto de vista da definição da técnica de aquisição e tratamento de imagens mais adequado para visualizar e mensurar as propriedades do escoamento.

Além de reproduzir a geometria da situação problema, inicialmente para situação livre de preenchimento, foram definidos como requisitos de projeto para a seção de testes:

- Geometria de configuração prismática (perfil de seção retangular), em razão de características do sistema e técnica de aquisição de imagens.
- Material de fabricação: acrílico cristal, de forma a prover condições de transparência propícias à filmagem do escoamento.
- Possibilitar o desenvolvimento do perfil de escoamento desejado.
- Permitir a inserção posterior de meios porosos e de fraturas, bem como a variação das características do meio poroso fraturado (e.g. quantidade de fraturas, largura, comprimento, permeabilidade, porosidade).
- Permitir pressurização da câmara ou a produção de gradiente de pressão do canal para a fratura (e.g. através do fechamento de válvula posterior à seção de teste ou via sucção por bomba de vácuo)

Vale ressaltar a importância da instalação de válvulas de segurança de acordo com as pressões às quais o sistema será submetido, de maneira a limitar a pressão máxima possível a um valor seguro.

A Figura 3.8 apresenta o projeto final da seção de testes, modelado em 3D no programa SolidWorks. A sustentação da seção é realizada por um suporte de alumínio perfurado, também reproduzido no desenho. A seção de testes foi confeccionada em acrílico cristal com cinco milímetros de espessura. Contabilizando os bocais, a parcela da seção de testes que corresponde ao escoamento livre possui um volume de 2,7 litros.

A Figura 3.9 apresenta detalhes da seção de testes, que pode ser dividida em dois canais com 45 mm de largura cada. O primeiro canal foi projetado tendo como base o canal anular de um poço de perfuração de oito polegadas e meia de diâmetro e é destinado ao escoamento de fluidos e o segundo canal é destinado, dentro do escopo desta monografia, à alocação de uma matriz sólida e, no âmbito da sequência do projeto, à inserção de meio poroso e fratura. A seção de testes foi projetada com uma espessura de 26 mm, para facilitar o acoplamento com a tubulação.

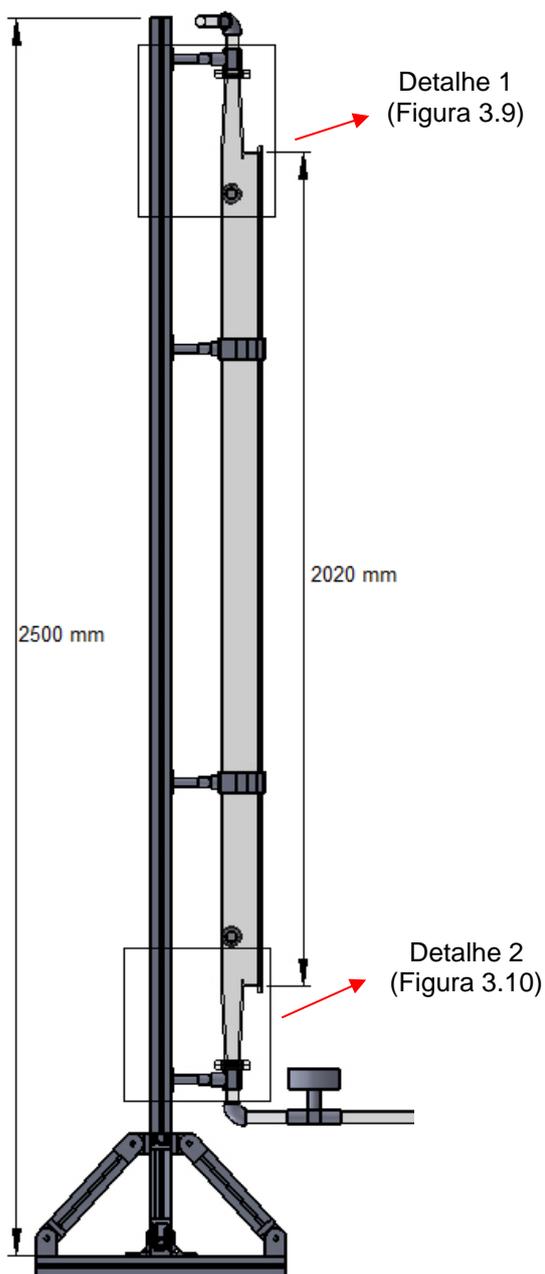


Figura 3.8. Projeto da seção de testes.

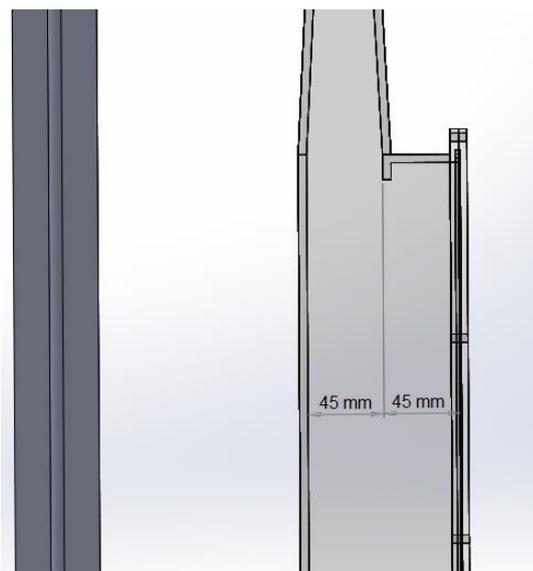


Figura 3.9. Detalhe 1 da seção de testes.

O comprimento da seção de testes foi definido tomando como base o estudo do comprimento necessário para o pleno desenvolvimento do escoamento. Para escoamentos laminares, o comprimento de desenvolvimento é dado pela Eq. (2.6) e para escoamentos turbulentos através da Eq. (2.7).

Uma estimativa do comprimento de desenvolvimento foi feita para diferentes números de Reynolds laminares e para o caso de escoamentos turbulentos. Estas estimativas foram realizadas para um tubo de PVC com diâmetro interno de 26 mm e para a seção de testes, que possui um diâmetro hidráulico de 32,96 mm. A Tabela 3.1 apresenta os cálculos realizados. Para menores números de Reynolds é possível que o escoamento se desenvolva na tubulação de PVC, porém, este escoamento será perturbado pela presença de curvas, cotovelos e, principalmente, a mudança de seção circular para prismática. O comprimento definido para a seção de testes foi o maior possível, sem causar problemas de mobilidade e operação da bancada, visando permitir a adaptação e o desenvolvimento do escoamento proveniente da tubulação.

Tabela 3.1. Comprimento de desenvolvimento para diferentes números de Reynolds

Re	Tubo de PVC (mm)	Seção de testes (mm)
1	1,56	1,98
500	780	989
1000	1560	1978
1500	2340	2966
2000	3120	3955
Turbulento (40xD)	1040	1318

A Figura 3.10 apresenta a entrada da seção de testes, detalhando o flange de acoplamento e o bocal de expansão. Este flange tem por função acoplar a tubulação de recalque do sistema de bombeamento à seção de teste. O bocal de expansão é responsável por modificar a seção transversal do escoamento de circular, proveniente da tubulação, à retangular, com o objetivo de causar mínima perturbação ao escoamento.

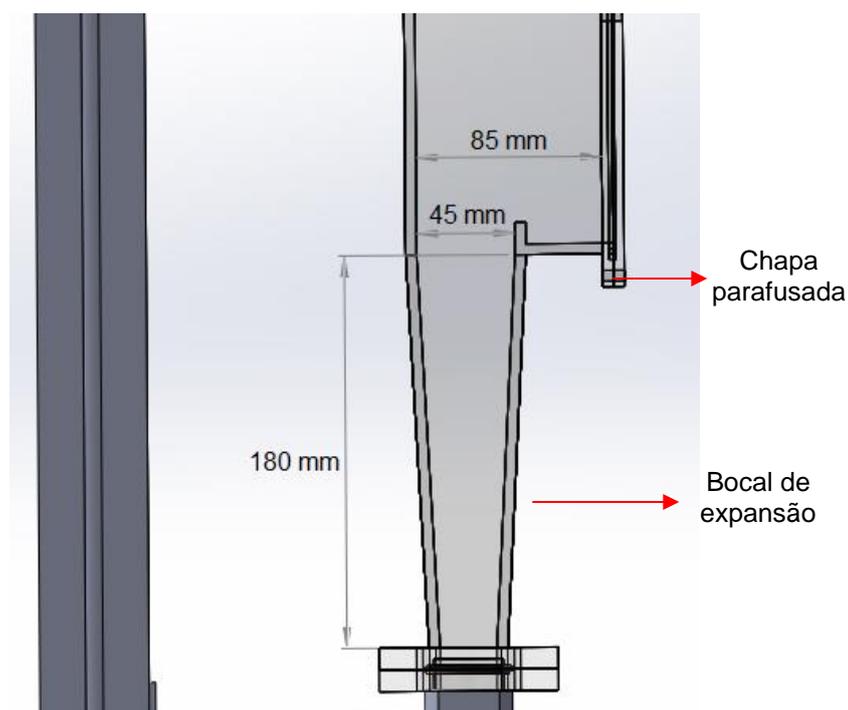


Figura 3.10. Detalhe 2 da seção de testes

A seção de teste foi projetada para permitir a substituição da matriz sólida possibilitando a inserção de fraturas e de meios porosos. Essa troca ocorre pela lateral da seção de testes, que possui uma chapa parafusada. Esta chapa está indicada na Figura 3.10.

Com a concepção da seção de testes finalizada, foi desenvolvida a arquitetura do circuito hidráulico do aparato experimental, apresentado em sequência.

3.3.2 Circuito hidráulico

Previamente ao desenvolvimento do projeto do circuito hidráulico, foi realizado um estudo da arquitetura de circuitos hidráulicos e de seus principais componentes (e.g. bombas, válvulas, medidores). Nesta seção é apresentada a definição do circuito hidráulico do aparato. A seleção de equipamentos e os aspectos construtivos dos componentes instalados são tratados no Capítulo 4.

A partir dos requisitos de projeto da seção de teste, foi definido o circuito hidráulico da bancada, mostrado na Figura 3.11.

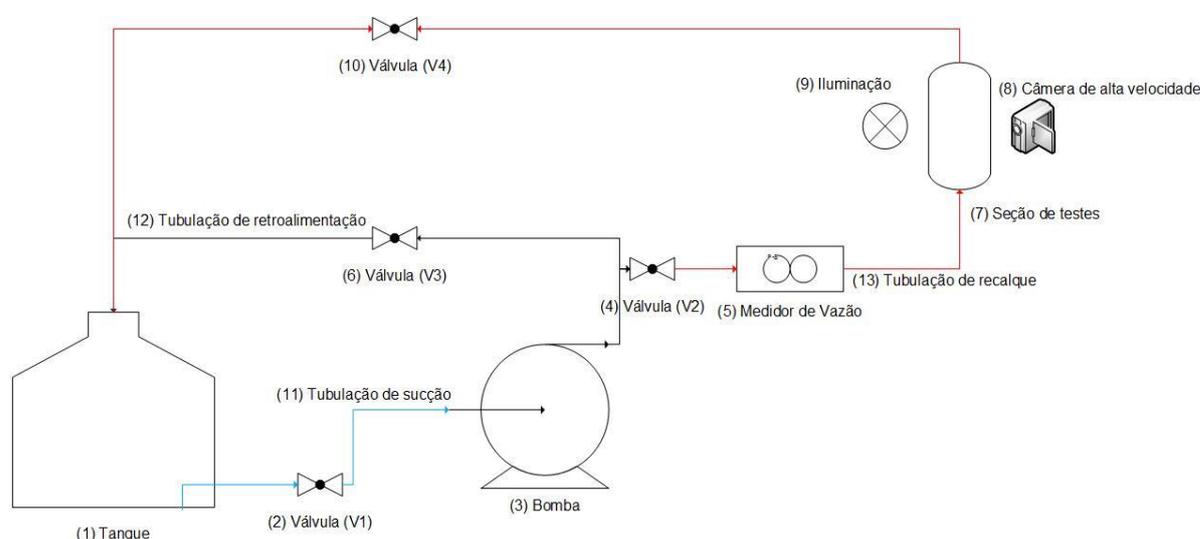


Figura 3.11. Representação esquemática do circuito hidráulico do aparato experimental. Desenho feito por meio do programa Microsoft VISIO 2013.

A Figura 3.12 mostra a vista frontal, a Figura 3.13 a vista lateral e a Figura 3.14 a modelagem em 3D do projeto do aparato experimental. Nas ilustrações estão indicados (a) a bomba centrífuga, (b) o tanque reservatório, (c) o quadro de comando, (d) a câmera de alta resolução, (e) o sistema de iluminação da câmera, (f) o medidor de vazão e (g) a seção de testes.

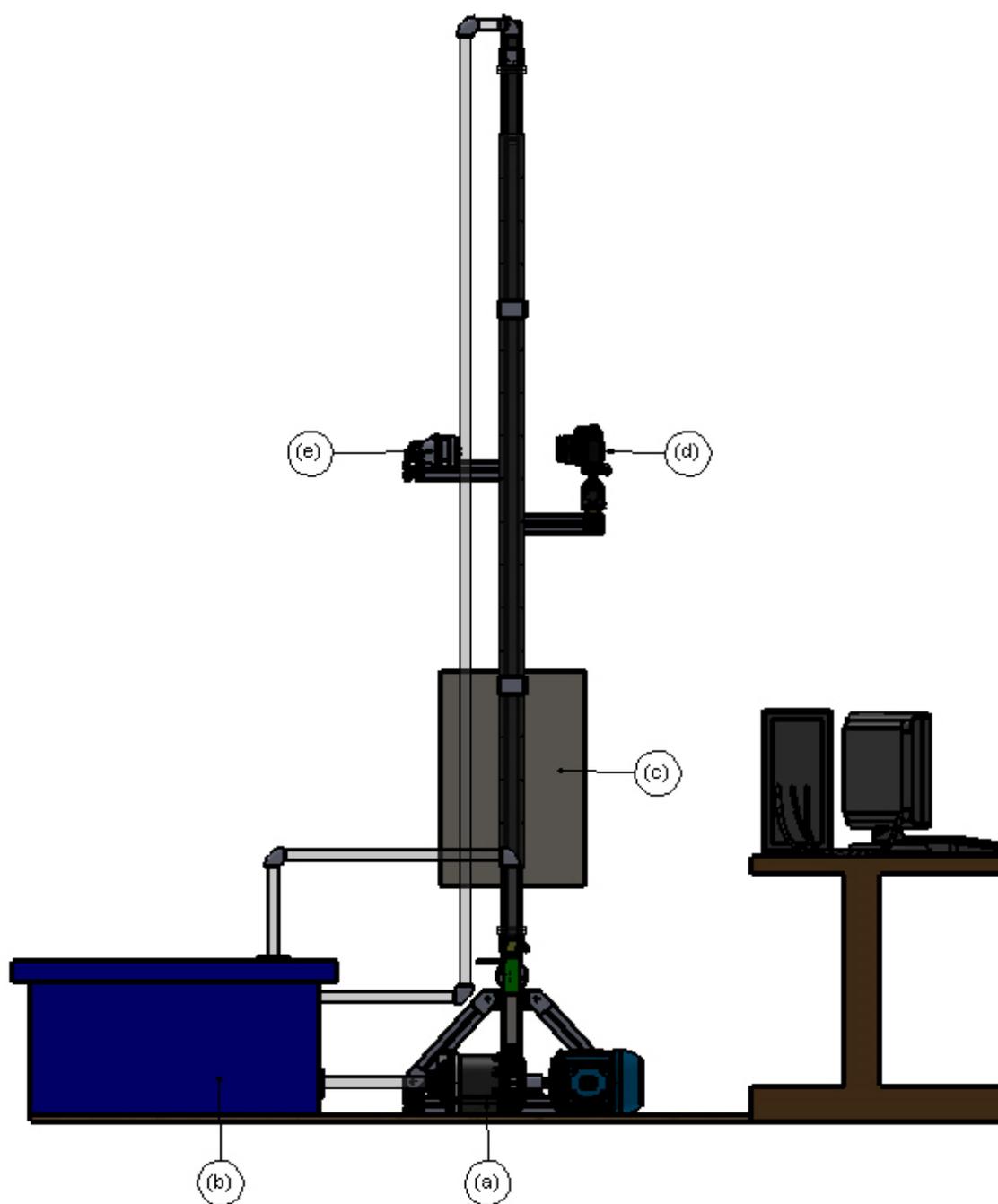


Figura 3.12. Vista frontal da concepção final do projeto da bancada experimental.

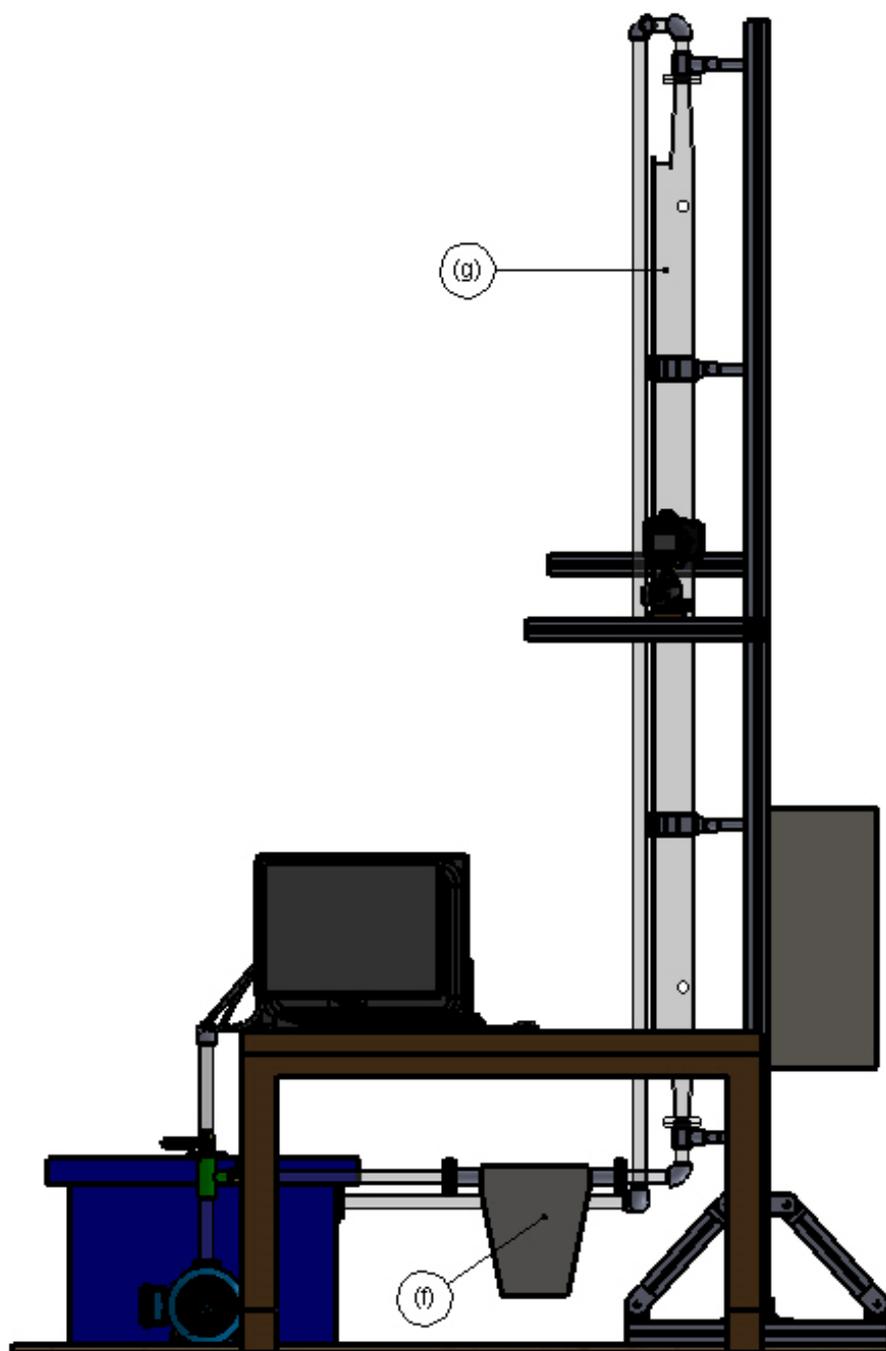


Figura 3.13. Vista lateral da concepção final do projeto da bancada experimental.

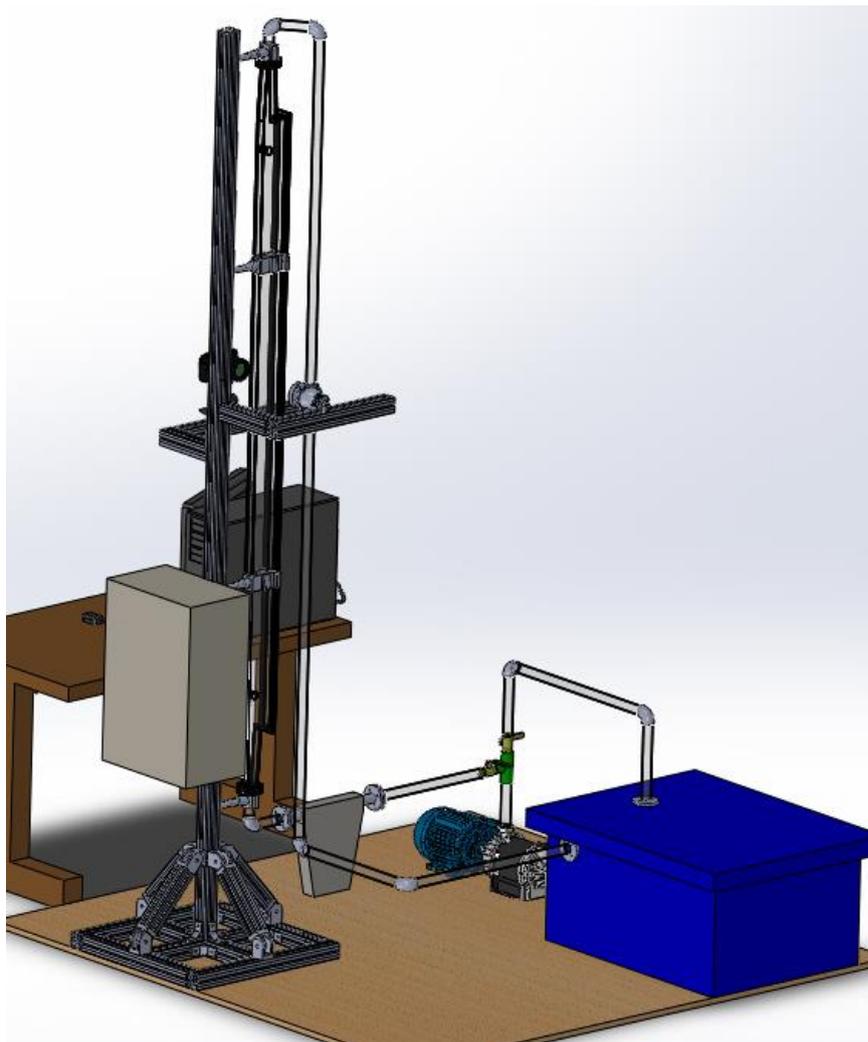


Figura 3.14. Modelagem tridimensional da concepção final do aparato experimental.

Com a definição dos elementos constituintes do aparato experimental, os equipamentos necessários foram adquiridos por meio de processo licitatório e a bancada foi construída nas dependências do Licit. A bancada experimental construída e as especificações dos itens adquiridos são apresentadas nas Seções 4.1 e 4.2.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados do desenvolvimento e execução do projeto de pesquisa proposto e está estruturado de acordo com a proposição dos objetivos realizada na Seção 1.3. São descritas e comentadas a construção do aparato experimental, a instrumentação da bancada, a calibração dos instrumentos de medição e os testes preliminares realizados para verificação do funcionamento da bancada e filmagem de escoamento particulado.

4.1 Construção e montagem do aparato experimental

O principal resultado e produto do desenvolvimento deste trabalho é a bancada experimental construída e montada. A Figura 4.1 apresenta a bancada experimental construída, cuja descrição é realizada com detalhes na sequência.

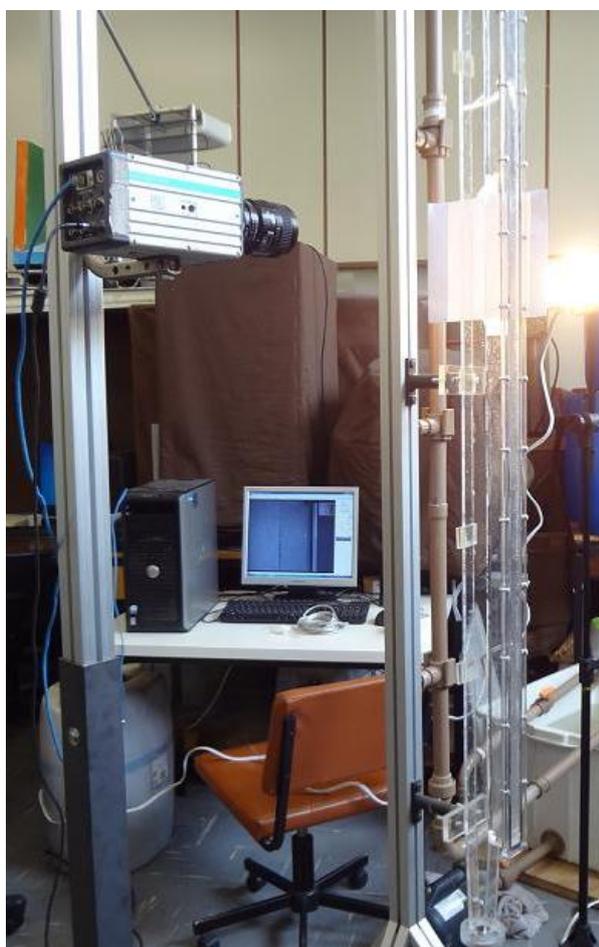


Figura 4.1. Imagem do aparato experimental construído.

A construção do aparato experimental se deu a partir do projeto realizado, explanado na Seção 3.3. Antes da montagem foram concluídas as etapas de levantamento do estado da arte, desenvolvimento de possíveis concepções, determinação de requisitos de projeto, definição do circuito hidráulico, desenho e modelagem 3D, especificação de componentes, realização de orçamentos, de licitações e a efetiva aquisição de equipamentos.

O aparato experimental foi construído e instrumentado. Foram realizados diversos ensaios com filmagem de escoamento sólido-fluido e monitoramento de vazão e pressão de escoamento monofásico de água como fluido de trabalho.

A Figura 4.2 apresenta em detalhe o canal de escoamento da seção de testes projetada para os testes iniciais apresentados neste trabalho. Conforme explicado na Seção 3.3.1, o canal é dividido em duas metades, a primeira destinada ao escoamento livre e a segunda à alocação de fraturas e meios porosos, atualmente preenchida por uma matriz sólida de acrílico.

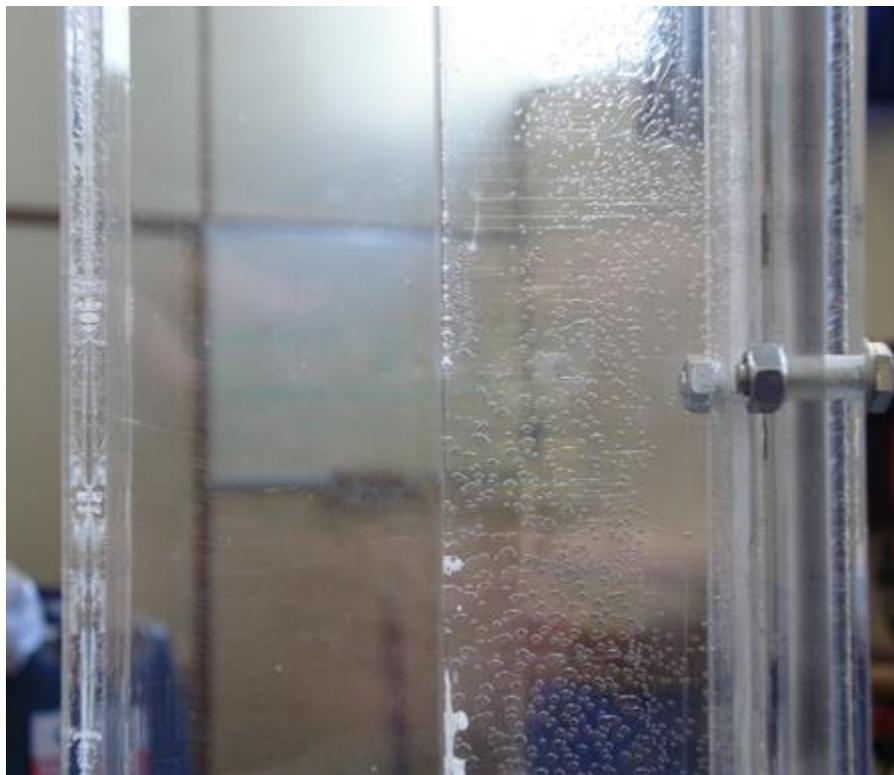


Figura 4.2. Detalhe do canal de escoamento da seção de teste.

O sistema de bombeamento envolve um conjunto de tanque reservatório, bomba centrífuga e um circuito hidráulico como retroalimentação para o tanque e alimentação para a seção de testes. O controle das válvulas instaladas no sistema permite a determinação dos regimes de operação e a variação de vazão. O sistema de bombeamento é representado na Figura 4.3, que é uma fotografia dos detalhes de instalação do tanque, bomba, sistema de válvulas, filtro e medidor de vazão.

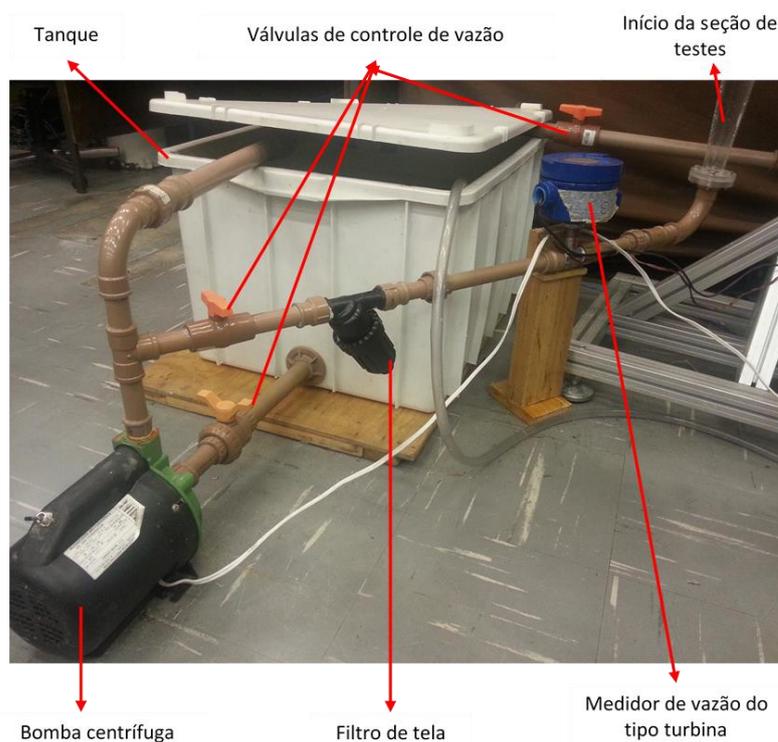


Figura 4.3. Aspectos construtivos do sistema de bombeamento, Detalhes do tanque, bomba, medidor de vazão do tipo turbina e sistema de válvulas do aparato

O tanque reservatório instalado possui 140 litros de capacidade e conexão de tubulação de 1 polegada. Vale ressaltar que, embora funcional, este reservatório não atende às necessidades dos experimentos envolvendo o bombeamento de partículas, motivo pelo qual um outro tanque está em vias de aquisição.

Este novo reservatório é provido de um agitador acoplado, conforme representado na Figura 4.4 do catálogo do fabricante. Além de conter o fluido de trabalho, este tanque possui a função de receber os aditivos e promover a mistura. É possível, com ele, garantir a homogeneidade da suspensão (ou, se desejável, trabalhar com sólidos em suspensão).

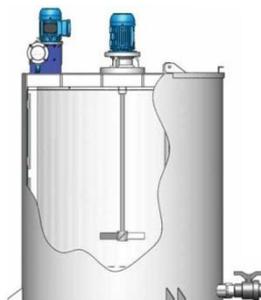


Figura 4.4. Imagem de catálogo do novo reservatório, em vias de aquisição.
Fonte: Catálogo “*Bombas, tanques, agitadores e filtros industriais*” (BOMAX, 2001).

Para uma correta seleção da bomba utilizada, foram estimadas as vazões necessárias correspondentes a diferentes números de Reynolds laminares. Estas estimativas foram realizadas utilizando água, e duas misturas de água e glicerina, com 60% e 73,7% de glicerina em volume. Utilizaram-se as correlações obtidas por Palacios (2011) para a determinação das propriedades das misturas. A Tabela 4.1 apresenta os resultados de vazão obtidos.

Tabela 4.1. Relação entre a vazão e o número de Reynolds do escoamento

Re	Q água (m ³ /h)	Q 60% (m ³ /h)	Q 73,7% (m ³ /h)
1	0,00012	0,001	0,003
500	0,06	0,52	1,50
1000	0,128	1,05	3
1500	0,194	1,57	4,5
2000	0,26	2,09	6

A bomba centrífuga provisoriamente utilizada na bancada estava disponível no LACIT, é mostrada na Figura 4.5 e suas especificações são apresentadas na Tabela 4.2.



Figura 4.5. Bomba centrífuga utilizada no experimento.

Tabela 4.2 - Especificações da bomba a ser utilizada na bancada

Especificações Bomba Centrífuga - LACIT						
Fabricante	Modelo	Frequência	Voltagem	Potência	Altura	Vazão Mínima
Schneider Motobombas	BCR 2000V	60 Hz	220 V	0,5 C.V.	7 - 20 m.c.a.	1,2 – 5,3 m ³ /h

A menor vazão que a bomba centrífuga em uso consegue proporcionar, mesmo quando utilizada em conjunto com o sistema de válvulas, é superior à vazão necessária para caracterizar o escoamento de água como laminar. A utilização de misturas de água e glicerina proporcionaria o estudo de escoamentos laminares, visto que estes fluidos são mais viscosos que a água, resultando numa vazão maior para um mesmo número de Reynolds.

Em testes de escoamento com a presença de partículas, a bomba utilizada foi capaz de bombear a mistura, porém apresentou um pequeno problema de desgaste devido à abrasividade do particulado. Outro inconveniente relativo a esta bomba diz respeito ao contato de sua carcaça de ferro fundido com o fluido de trabalho, que frequentemente suja o fluido e demanda troca e limpeza constantes.

Vale ressaltar que, a exemplo do reservatório, outro modelo de bomba foi cotado e está expresso na Figura 4.6. Trata-se de uma bomba centrífuga magnética voltada para o bombeamento de sólidos, com as palhetas revestidas em polipropileno e tefzel, que permite bombear suspensões com concentração de partículas superior à 40% sem alterar suas propriedades reológicas.

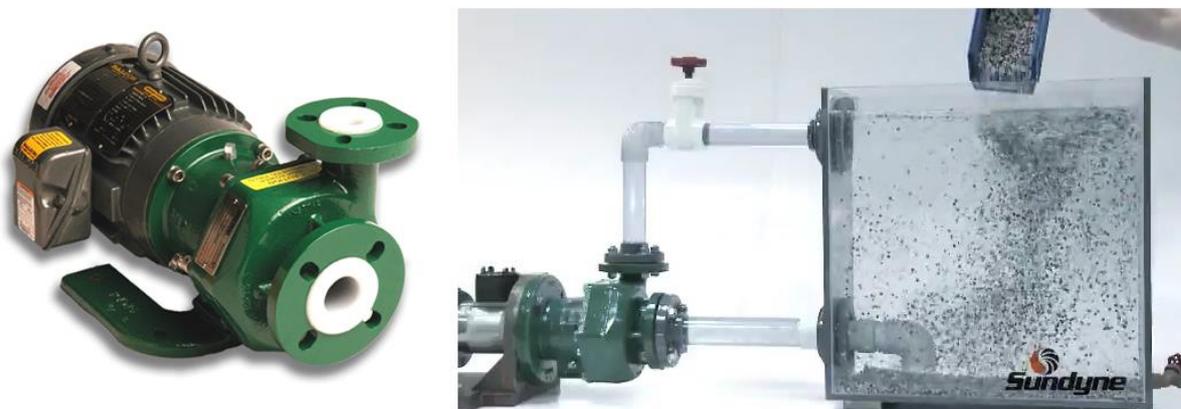


Figura 4.6. Bomba centrífuga magnética.

Fonte: Adaptação a partir do catálogo “ANSIMAG – Build for Reliability” (SUNDYNE, 2010).

A cotação da nova bomba inclui um inversor de frequência acoplado ao motor elétrico que aciona a bomba. O inversor será responsável por conferir o controle da rotação e, por consequência, da velocidade de escoamento e da vazão. Na configuração atual o controle de vazão é realizado por meio de diferentes configurações no sistema de válvulas.

A Figura 4.7 (a) mostra a entrada do escoamento na seção de testes, após experimental mudança de seção e bocal de expansão, em detalhe no quadro (b).

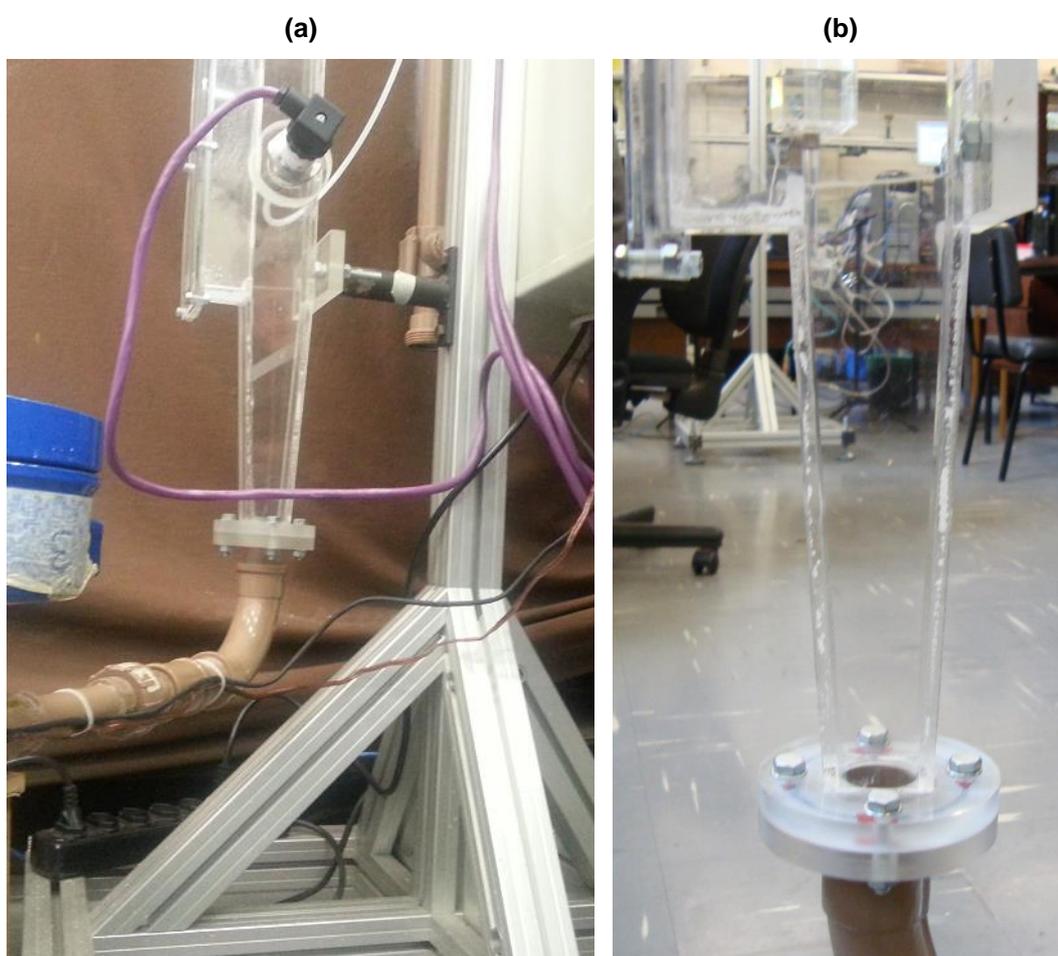


Figura 4.7. Entrada do escoamento na seção de testes.

A Figura 4.8 (a) mostra a saída do escoamento na seção de testes, mostrando a configuração de retorno que experimenta um efeito sifão. A nova mudança de seção transversal é mostrada em detalhe no quadro (b).

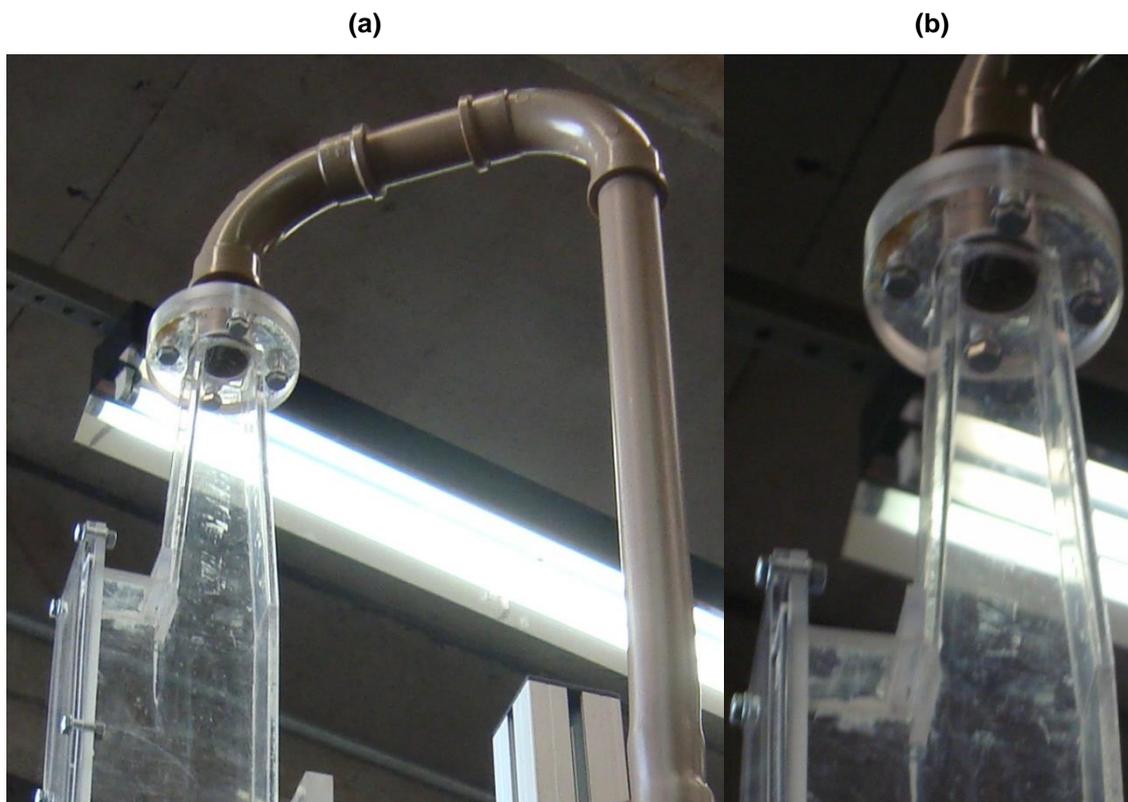


Figura 4.8. Saída do escoamento na seção de testes.

4.2 Instrumentação da bancada experimental

O segundo grande objetivo proposto para o escopo de realização desta monografia é a instrumentação do dispositivo experimental. A instrumentação adequada da bancada se deu a partir da especificação, aquisição e instalação de medidores, da implementação de um sistema de aquisição de sinais e da elaboração de uma interface de aquisição de dados.

Para tanto, foram adquiridos e instalados um medidor de vazão e três transdutores de pressão, sendo dois deles medidores de pressão relativa com membrana rasante e um medidor diferencial.

Foram realizados experimentos de caracterização do comportamento estático dos instrumentos de medição com a determinação das relações entre sinal de entrada e de saída para cada um.

O medidor de vazão do tipo turbina foi instalado no início do circuito experimental, em posição posterior ao sistema de bombeamento e às válvulas de controle, e anterior à seção de teste. Os medidores de pressão foram instalados na

seção de teste. A Figura 4.9 mostra os pontos de instalação das tomadas de pressão e vazão.

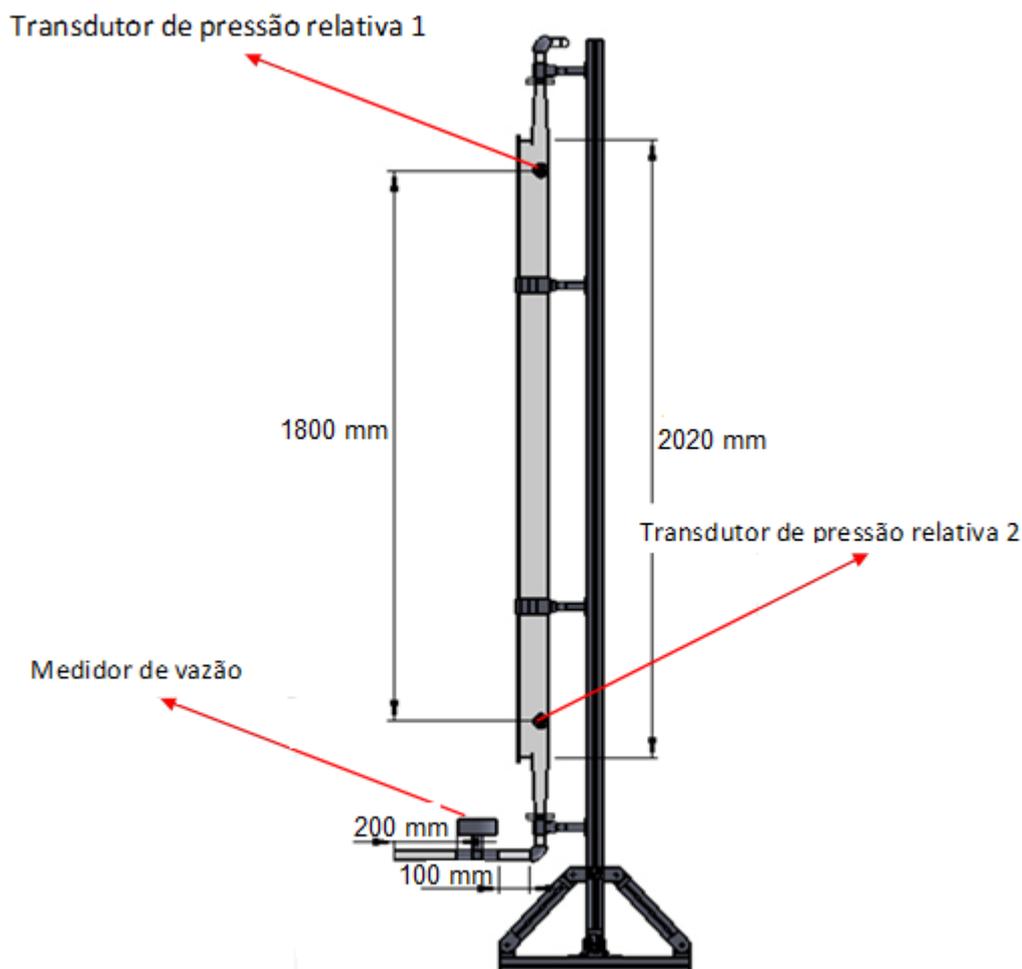


Figura 4.9. *Layout* da seção de testes da bancada experimental com determinação da posição dos instrumentos de medição instalados.

4.2.1 Transdutores de pressão relativa

Os medidores de pressão relativa foram adquiridos junto à empresa *Wika*. Estes transdutores possuem uma membrana metálica, responsável por isolar o transdutor do fluido sem afetar a pressão medida, devido ao possível alojamento das partículas no interior do transdutor, afetando a precisão e ocasionando danos ao equipamento. A Figura 4.10 (a) apresenta o transdutor de pressão e a Figura 4.10 (b) apresenta a membrana metálica em detalhe.

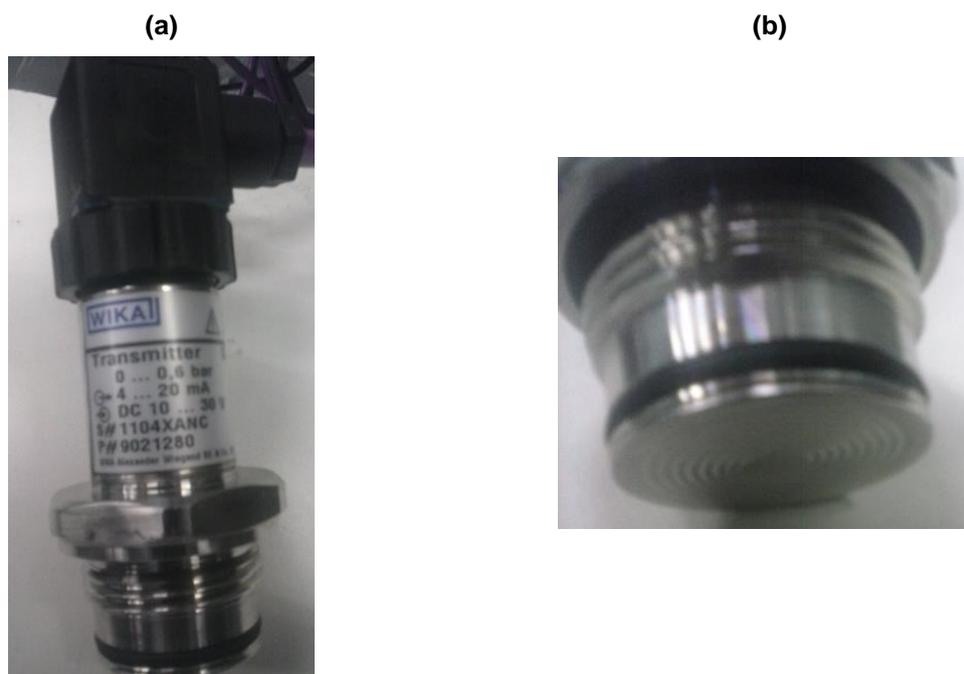


Figura 4.10. Transdutor de pressão relativa e detalhe da membrana metálica.

Foram adquiridos dois transdutores com uma pequena diferença na faixa de medição devido à diferenças de pressão nos pontos de instalação. A Tabela 4.3 apresenta as características de ambos os transdutores (WIKKA, 2012). O transdutor relativo 1, de menor faixa operacional, está instalado na saída da seção de testes e o transdutor relativo 2 está instalado no início da seção de testes. Os dois transdutores estão separados por um trecho reto de 1,8 metros de comprimento.

Tabela 4.3. Características dos transdutores de pressão relativa.

Dados	Relativo 1	Relativo 2
Marca	<i>Wika</i>	<i>Wika</i>
Modelo	S11-04	S11-06
Faixa de operação	0-0,4 bar	0-0,6 bar
Sinal de entrada	10-36 Vcc	10-36 Vcc
Sinal de saída	4-20 mA	4-20 mA

4.2.2 Transdutor de pressão diferencial

O transdutor de pressão diferencial foi adquirido da empresa *Rücken*. Inicialmente o medidor foi selecionado para medir a diferença de pressão entre a saída do canal e a saída da fratura. Porém, para os testes sem a presença de fratura, o transdutor está instalado entre os mesmos pontos dos transdutores relativos, de maneira a fornecer uma redundância e auxiliar os processos de

calibração e de determinação de incertezas experimentais. A Figura 4.11 (a) apresenta o transdutor diferencial e a Figura 4.11 (b) o detalhe dos pontos de tomada de pressão.



Figura 4.11. Transdutor de pressão diferencial e detalhe dos pontos de tomada de pressão.

Vale ressaltar que o medidor de pressão diferencial não possui membrana, sendo necessária a confecção de uma película para evitar a entrada de partículas no transdutor para os testes com escoamento particulado. De um lado do escoamento é feita a tomada do transdutor relativo e do outro lado é feita a tomada do transdutor diferencial. A Tabela 4.4 apresenta as características gerais do equipamento (RÜCKEN, 2014).

Tabela 4.4. Características do transdutor de pressão diferencial.

Fabricante	<i>Rücken</i>
Modelo	RTP 420 – DIF
Alimentação	24 Vcc
Φ nominal	10 mm
Sinal de saída	4 a 20 mA
Faixa de medição	0-100 mbar

A faixa de medição indicada para o transdutor, de acordo com o fabricante, é de zero até 100 milibars. Entretanto, a calibração laboratorial detectou divergência na informação de faixa operacional, sendo maior que a previamente indicada. O

processo de calibração e os resultados provenientes, para o transdutor de pressão diferencial, são apresentados na Seção 4.2.5.2.

4.2.3 Medidores de vazão

Como mencionado anteriormente, para os testes sem a presença de partículas está sendo utilizado um medidor de vazão do tipo turbina, com previsão de troca por um medidor do tipo coriolis, capaz de permitir escoamento particulado.

4.2.3.1 Medidor de vazão do tipo turbina

O medidor de vazão utilizado, instalado diretamente na linha de escoamento do circuito experimental, é provido de condicionadores ou laminadores de fluxo, tanto na entrada como na saída. O escoamento condicionado entra em contato, no interior do medidor, com uma turbina, de maneira que a passagem do fluido provoca uma rotação proporcional nas pás da turbina.

Uma das aletas é dotada de um pequeno imã na extremidade. A passagem deste imã próximo a um sistema *pick-up*, responsável por perceber a passagem deste imã e gerar estímulos na forma de pulsos elétricos, cujas frequências são relacionadas com a vazão do escoamento. O princípio de funcionamento do medidor é esquematizado na Figura 4.12.

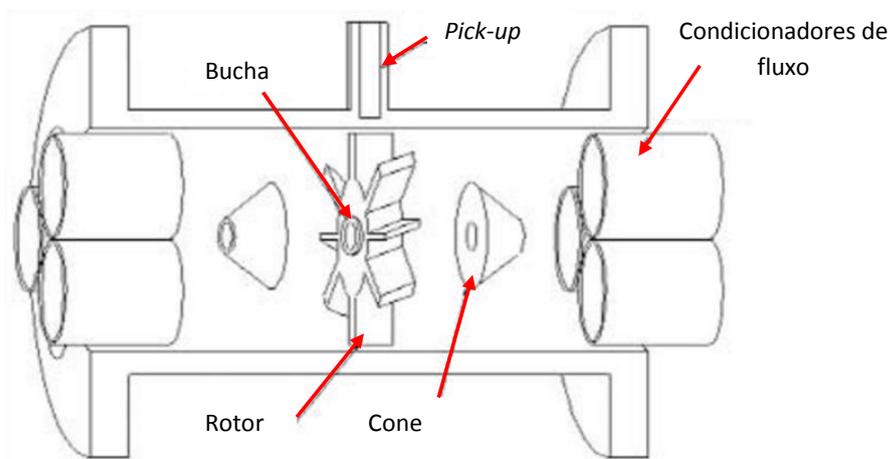


Figura 4.12. Esquema de funcionamento do medidor de vazão tipo turbina.

Fonte: Incontrol (2009).

Este tipo de equipamento é sensível à presença de particulados e outros contaminantes na água, sendo necessária a instalação de um filtro antes do medidor com o objetivo de reter as impurezas. Para tanto, foi adquirido um filtro de tela da empresa *Irritec*, com tela de nylon de 120 *mesh*, conexão roscada e diâmetro nominal de $\frac{3}{4}$ ", apresentado na Figura 4.13.



Figura 4.13. Filtro de tela adquirido e instalado.

A Tabela 4.5 apresenta as características do medidor de vazão instalado (INCONTROL, 2009). O fabricante recomenda uma distância de 10 diâmetros de trecho reto à montante do medidor e 5 diâmetros à jusante. Para uma tubulação de $\frac{3}{4}$ ", estas distâncias são de, respectivamente, 20 e 10 centímetros.

Tabela 4.5. Características do medidor de vazão do tipo turbina.

Fabricante	<i>Incontrol</i>
Modelo	VTL 019
Alimentação	24 Vcc
Φ nominal	$\frac{3}{4}$ "
Sinal de saída	4 a 20 mA
Faixa de medição	0,60 a 6,60 m ³ /h

4.2.3.2 Medidor de vazão coriolis

Para possibilitar experimentos envolvendo escoamento particulado foi adquirido um medidor de vazão mássica do tipo coriolis, que atualmente se encontra em fase de transporte. Por meio deste medidor se obtém de maneira direta a vazão

mássica e a massa específica da mistura bombeada e de maneira indireta a vazão volumétrica. A Figura 4.14 apresenta uma imagem representativa do medidor de vazão mássica coriolis.

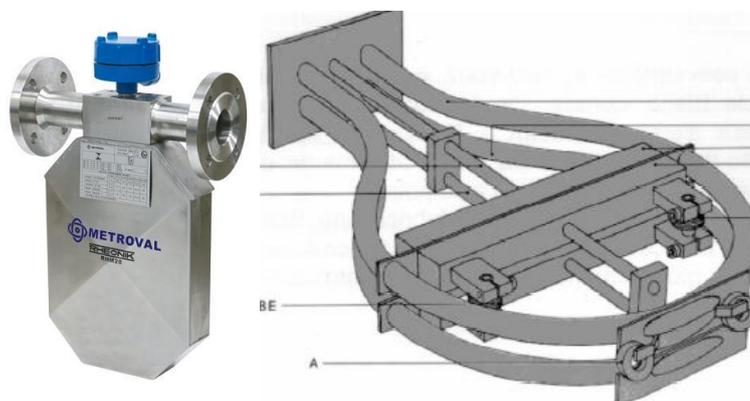


Figura 4.14. Medidor de vazão mássica do tipo coriolis.
Fonte: Metroval (2007).

O medidor é composto de dois tubos dobrados em formato de ômega (Ω) montados em paralelo dentro de um bloco de construção. O fluido é separado em partes iguais e escoa pelos tubos, provocando uma oscilação mecânica nestes tubos. Bobinas de indução são responsáveis por transformar a oscilação mecânica em uma oscilação elétrica, capaz de ser captada por uma placa de aquisição de dados. O medidor ainda conta com um *display* digital para indicação em tempo real da vazão e da densidade. A Tabela 4.6 apresenta as características do medidor adquirido (METROVAL, 2007).

Tabela 4.6. Características do medidor de vazão mássica adquirido.

Fabricante	<i>Metroval</i>
Modelo	RHM15
Alimentação	24 Vcc
Φ nominal	1"
Sinal de saída	4 a 20 mA
Faixa de medição	4 a 200 kg/min

Após a instalação e calibração do medidor de vazão do tipo coriolis, são necessárias pequenas adaptações no restante do sistema para os testes com a presença de partículas.

4.2.4 Sistemas de aquisição de dados

A aquisição dos sinais provenientes dos medidores é realizada por uma placa da *National Instruments*, instalada no suporte da seção de testes. Para proteger o sistema de intempéries, o mesmo foi alocado dentro de um quadro de comando, em conjunto com o sistema de alimentação elétrica, conforme mostrado na Figura 4.15.



Figura 4.15. Quadro de comando e placa de aquisição de dados.

Tanto o medidor de vazão quanto os transdutores de pressão são alimentados por uma fonte de 24 Volts de corrente contínua. A alimentação elétrica e os sinais correspondentes às medições são transportados por cabos do tipo *profibus* de uma via (cabos de cor roxa na Figura 4.15).

O sistema engloba as funções de condicionamento de sinal e conversão analógico-digital em apenas um dispositivo, característica que elimina o tempo e a chance de erros associados à conexão de múltiplos componentes agrupados. A utilização do sistema modular também reduz o número de equipamentos que podem contribuir com ruídos ou falhas.

O sistema é composto por um chassi e três módulos de aquisição de dados, conforme representado na Figura 4.16. Os módulos são responsáveis por adquirir o sinal proveniente dos equipamentos, enquanto o chassi tem como funções abrigar os módulos e transmitir os sinais a um computador, através de um cabo USB. O chassi utilizado é o modelo cDAQ – 9174, com capacidade para quatro módulos, cujas características são apresentadas na Tabela 4.7 (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012).



Figura 4.16. Representação do sistema modular de aquisição de dados.

Fonte: National Instruments (2012).

Tabela 4.7. Características dos módulos de aquisição de dados utilizados.

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

A Figura 4.17 mostra o chassi e os módulos para a aquisição de dados instalados no quadro de controle, além de destacar a presença de um espaço vago para mais um módulo, ainda não definido.

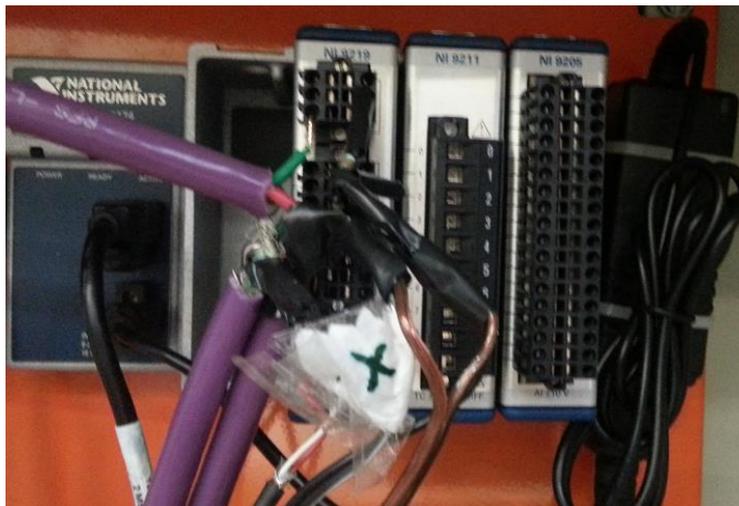


Figura 4.17. Chassi e módulos para a aquisição de dados.

Os dados obtidos são analisados pelos programas *LabVIEW* (LABVIEW, 2013) e *Microsoft Excel*. Utilizando uma interface virtual programada, o *LabVIEW* adquire os sinais de corrente dos equipamentos. A partir das curvas estáticas de calibração obtidas via ensaios é feita a conversão em valores de vazão e pressão.

São monitorados os parâmetros de entrada e saída de cada equipamento, a perda de carga na seção de testes e os limites operacionais de trabalho. A exportação de dados para as planilhas do *Excel* é configurável, sendo ajustáveis o tempo de coleta de dados e a frequência de gravação, i.e., a quantidade de amostras que são colhidas por unidade de tempo. A Figura 4.18 representa o diagrama de blocos programado no *LabVIEW* e a a Figura 4.19 a interface de leitura de dados e controle.

4.2.5 Caracterização estática dos instrumentos

O processo de calibração individual de cada equipamento que compõe o sistema de instrumentação do aparato experimental é imprescindível para se garantir a precisão e controle da qualidade metrológica. O objetivo principal deste processo é a avaliação de parâmetros como exatidão, precisão, linearidade, faixa de trabalho e limites de detecção, variações intra-laboratoriais e inter-laboratoriais. A avaliação criteriosa destes parâmetros alimenta os estudos de determinação das incertezas experimentais envolvidas e das equações que regem as relações entre sinal elétrico adquirido e propriedade física correspondente.

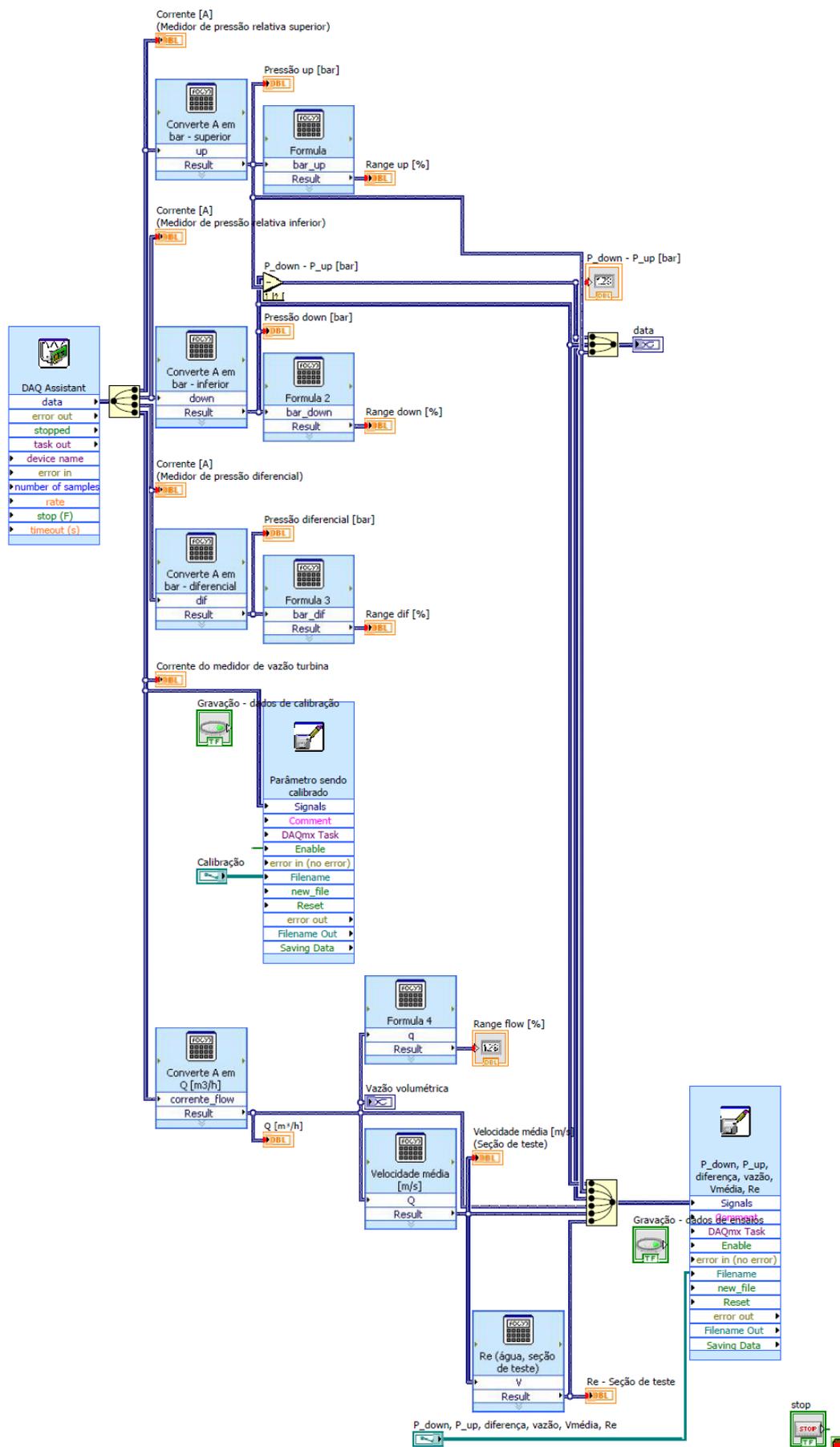


Figura 4.18. Diagrama de bloco programado no LabVIEW.

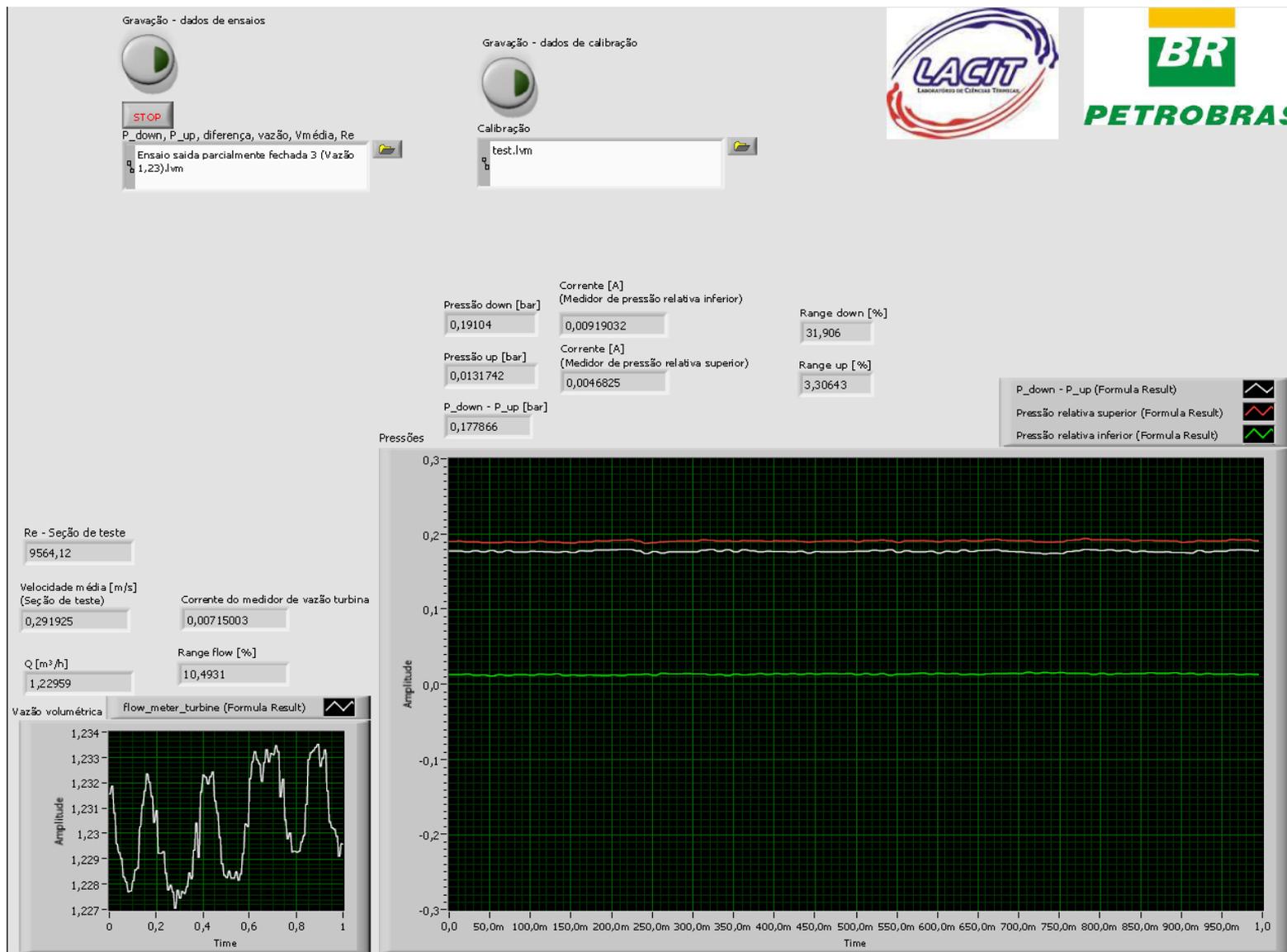


Figura 4.19. Interface de trabalho, leitura e controle de dados.

O princípio de calibração adotado é feito com base na caracterização estática dos instrumentos (DOEBELIN,1989), conforme metodologia descrita na Seção 2.4. A tomada de dados é realizada apenas após cessarem as oscilações do sinal de saída do medidor, durante um período de tempo definido como de longa duração, resultando na convergência estatística de valores mais confiáveis.

4.2.5.1 Calibração dos transdutores de pressão relativa

O procedimento de calibração tem como início a definição das diretrizes de ensaios e da metodologia a ser empregada. Neste sentido, a primeira providência consistiu em graduar a coluna vertical, que constitui todo o canal livre em acrílico onde ocorre o escoamento, incluindo a seção de testes e os pontos de expansão.

Para tanto, um jogo de esquadros foi utilizado a fim de marcar os pontos e propiciar a determinação de uma linha perfeitamente vertical. Uma fita de trena com graduação na grandeza de milímetros foi instalada junto ao canal de escoamento, com início centrado no primeiro ponto de tomada de pressão.

Testes iniciais foram realizados com o objetivo de atestar a credibilidade do sistema de aquisição dos sinais por meio de verificações dos dados obtidos via programação realizada no *LabVIEW*, assim como dos parâmetros dos equipamentos, que constam nos manuais de especificações técnicas fornecidos pelo fabricante.

Na interface do programa, existe uma ferramenta específica destinada à obtenção de dados para os testes de calibração. A partir da determinação de um tempo inicial começa a gravação de dados de corrente elétrica para uma planilha no *Excel*, tomados a uma frequência configurável no programa. O objetivo desta etapa é incluir um processo estatístico às medições, calculando a média dos valores obtidos, catalogando e rotulando com data, horário, duração e condições de operação.

As primeiras medidas foram tomadas para a condição de pressão atmosférica, durante cinco minutos e com frequência de gravação de dados de 200 amostras por segundo. Ambos os transdutores em questão são de pressão relativa e

as faixas de trabalho, em termos de sinal elétrico, iniciam-se em 4mA. A coleta de dados à pressão atmosférica precede os ensaios com coluna de água.

Os ensaios de caracterização estática via variação da coluna de água são realizados a partir do preenchimento do canal vertical com água e manutenção da coluna estacionária. Através do controle de válvulas instaladas no aparato experimental, a altura da coluna de fluido foi variada com intervalos de distância programados. Para cada medida de milímetros de água à que o transdutor de pressão é submetido, ocorre a coleta de dado de sinal de corrente elétrica tomada na média da gravação a cada 0,005 segundo durante cinco minutos.

A altura da coluna de água foi medida a partir da graduação propiciada pela fita de trena instalada junto ao canal de escoamento. A corrente elétrica tomada conforme o processo estatístico explanado e a conversão de unidade para pressão em bar realizada de acordo com a Eq. (4.1), em que P_{bar} é o valor de pressão em bar e mH_2O é a altura da coluna de água sobre o ponto de tomada de pressão em metros.

$$P_{bar} = 0,09806 \text{ mH}_2\text{O} \quad (4.1)$$

Os dados provenientes do processo de calibração são apresentados na Tabela 4.8 para o transdutor de pressão relativa 1 (modelo *Wika S11-04*), que expressa os resultados do ensaio de variação de coluna de água.

Tabela 4.8. Resultados obtidos para os ensaios de variação de coluna de água para o transdutor de pressão relativa 1.

Coluna de água [mm]	Corrente elétrica média [mA]	Pressão [bar]
1900	9,055	$1,863 \cdot 10^{-1}$
1700	8,550	$1,667 \cdot 10^{-1}$
1500	8,025	$1,471 \cdot 10^{-1}$
1300	7,512	$1,275 \cdot 10^{-1}$
1100	6,988	$1,079 \cdot 10^{-1}$
900	6,466	$8,825 \cdot 10^{-2}$
700	5,945	$6,864 \cdot 10^{-2}$
500	5,419	$4,903 \cdot 10^{-2}$
300	4,899	$2,942 \cdot 10^{-2}$
200	4,641	$1,961 \cdot 10^{-2}$
100	4,383	$9,806 \cdot 10^{-3}$
0	4,134	0

A partir do ensaio é elaborado um gráfico de dispersão relacionando os resultados da propriedade física pressão na ordenada e do sinal de corrente elétrica adquirido na abcissa, conforme representado pela Figura 4.20. O passo seguinte é o levantamento de uma curva de ajuste de tendência linear para estes pontos, pois este medidor de pressão possui relação linear entre a pressão medida e a corrente de saída. O método matemático-estatístico utilizado para o levantamento da curva foi a regressão linear (REIS,1994).

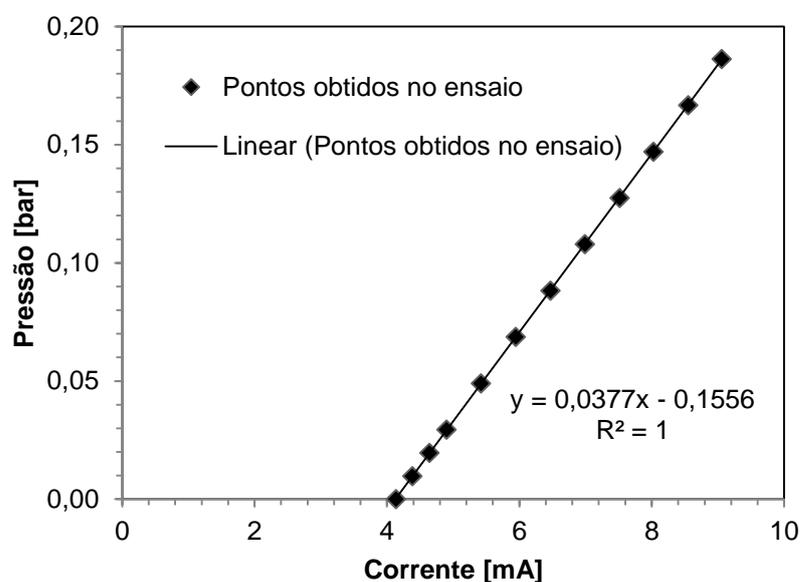


Figura 4.20. Curva de caracterização estática do transdutor de pressão relativa 1.

Destaca-se a determinação da Eq. (4.2) da reta de tendência para a dispersão dos resultados, pois é o objetivo deste procedimento, já que é responsável pela conversão de corrente elétrica em dado de pressão. O valor Y é a pressão na saída (medida em bar), enquanto X é a corrente elétrica captada na entrada (medida em miliampere).

$$Y = 0,0377 X - 0,1556 \quad (4.2)$$

Outro resultado importante a ser frisado é o coeficiente de determinação R^2 (DRAPER e SMITH, 1998) evidenciado para a curva de tendência oriunda do ensaio de calibração. Como indicador de ajuste do modelo estatístico de regressão linear, este parâmetro varia de 0 a 1 e indica grau de ajuste do modelo à amostra colhida.

Quanto maior o valor do coeficiente de determinação, mais confiável é o valor da variável dependente calculada.

A verificação de um valor máximo para o coeficiente de determinação dos resultados deste ensaio denota o sucesso do mesmo e repercute em credibilidade para a equação de conversão determinada.

Adicionalmente, é possível estabelecer a faixa de trabalho real do equipamento no contexto de utilização da bancada experimental. Substituindo na Eq. (4.2) o valor máximo de corrente de 20mA, observa-se uma faixa de trabalho real de medida de pressão relativa de 0 a 0,599 bar.

De forma análoga, o mesmo ensaio é realizado para o transdutor de pressão relativa 2, modelo *Wika* S11-06. A Tabela 4.9 apresenta os resultados dos ensaios de calibração para o transdutor de pressão relativa 2. Com relação ao transdutor de pressão relativa 1, o princípio de medida é o mesmo, bem como a metodologia dos experimentos de calibração, o que difere em relação ao medidor anteriormente calibrado é apenas a faixa de trabalho do transdutor.

Tabela 4.9. Resultados obtidos para os ensaios de variação de coluna de água para o transdutor de pressão relativa 2.

Coluna de água [mm]	Corrente elétrica média [mA]	Pressão [bar]
1775	11,064	$1,741 \cdot 10^{-1}$
1695	10,776	$1,662 \cdot 10^{-1}$
1498	10,007	$1,469 \cdot 10^{-1}$
1302	9,239	$1,277 \cdot 10^{-1}$
1100	8,456	$1,079 \cdot 10^{-1}$
900	7,669	$8,825 \cdot 10^{-2}$
700	6,889	$6,864 \cdot 10^{-2}$
501	6,107	$4,913 \cdot 10^{-2}$
300	5,329	$2,942 \cdot 10^{-2}$
199	4,932	$1,951 \cdot 10^{-2}$
99	4,538	$9,708 \cdot 10^{-3}$
0	4,172	0

A curva de caracterização estática do transdutor *Wika* S11-06 é apresentada na Figura 4.21. A partir dos pontos do ensaio, foi realizado o levantamento da curva de tendência linear, bem como a determinação da Eq. (4.3) da reta de tendência para a dispersão dos resultados, que representa a conversão dos dados de corrente em dados de pressão. O coeficiente de determinação, R^2 , atingiu novamente o valor

máximo de 1, corroborando que a relação entre o sinal de entrada e o de saída é perfeitamente linear.

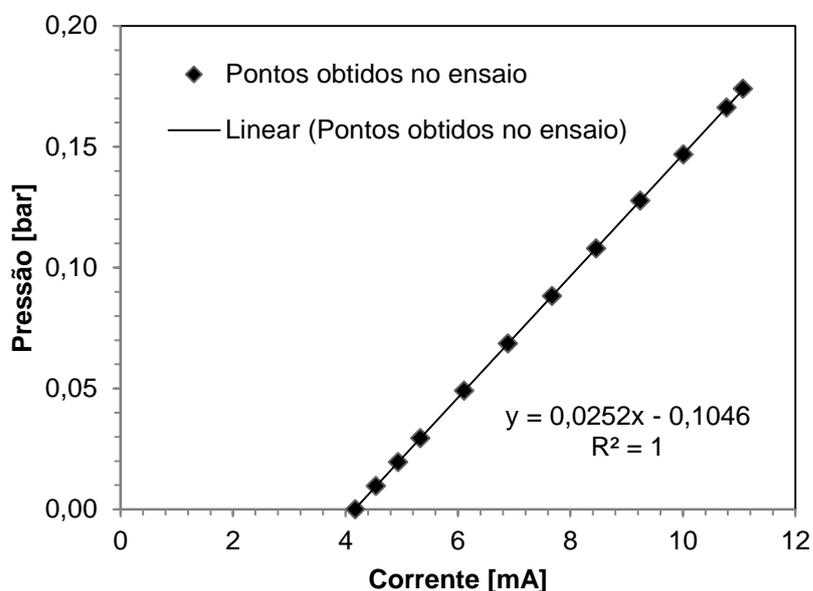


Figura 4.21. Curva de caracterização estática do transdutor de pressão relativa 2.

A faixa de trabalho para este transdutor, calculada a partir da utilização do sinal máximo de 20mA na Eq. (4.3), é de 0,398 bar.

$$Y = 0,0252 X - 0,1046 \quad (4.3)$$

4.2.5.2 Calibração do transdutor de pressão diferencial

Diferentemente do procedimento de levantamento das curvas de caracterização estáticas dos transdutores de pressão relativa, a calibração do transdutor diferencial não se deu na seção de testes do aparato experimental. O ensaio de calibração deste instrumento foi realizado após o preenchimento com água das mangueiras que saem de ambas as conexões do equipamento. O medidor é provido na conexão de um lado da instrução “H”, em que deve ser submetido à maior pressão, e do outro lado da instrução “L”, referência de onde deve ser medida a menor pressão.

O transdutor foi fixado em uma haste vertical graduada em milímetros. As mangueiras preenchidas por água e conectadas às extremidades do equipamento também foram fixadas na haste graduada, de forma que ambas possuíssem colunas idênticas de água acima do medidor de pressão.

Após cessarem as oscilações iniciou-se as gravações para sinal de corrente elétrica adquirida no LabVIEW, a priori com a condição de mesma coluna em ambas as mangueiras.

O procedimento seguinte foi a fixação da mangueira conectada ao ponto de alta pressão no ponto mais alto da haste graduada, enquanto a altura da mangueira conectada ao lado de menor pressão foi gradativamente reduzida. Os dados foram tomados respeitando o controle estatístico de gravação durante 5 minutos com frequência de gravação de 200 amostras por segundo e obtenção de valores a partir da média da série gravada. Diferentemente dos ensaios anteriores, a coluna de água agora é diferencial entre o topo das mangueiras, sempre posicionadas na vertical.

A Tabela 4.10 mostra os resultados do ensaio de variação da coluna diferencial de água realizado com vista à caracterização estática do transdutor de pressão diferencial. O ensaio de calibração propiciou a caracterização estática do transdutor de pressão diferencial a partir do gráfico construído com os pontos obtidos, apresentado na Figura 4.22.

Tabela 4.10. Resultados obtidos para os ensaios de variação de coluna de água para o transdutor de pressão diferencial.

Coluna diferencial de água [mm]	Corrente elétrica média [mA]	Pressão [bar]
980	6,890	$9,610 \cdot 10^{-2}$
900	6,653	$8,825 \cdot 10^{-2}$
800	6,357	$7,845 \cdot 10^{-2}$
700	6,064	$6,864 \cdot 10^{-2}$
500	5,456	$4,903 \cdot 10^{-2}$
400	5,156	$3,922 \cdot 10^{-2}$
300	4,842	$2,942 \cdot 10^{-2}$
200	4,537	$1,961 \cdot 10^{-2}$
100	4,237	$9,806 \cdot 10^{-3}$
0	3,937	0

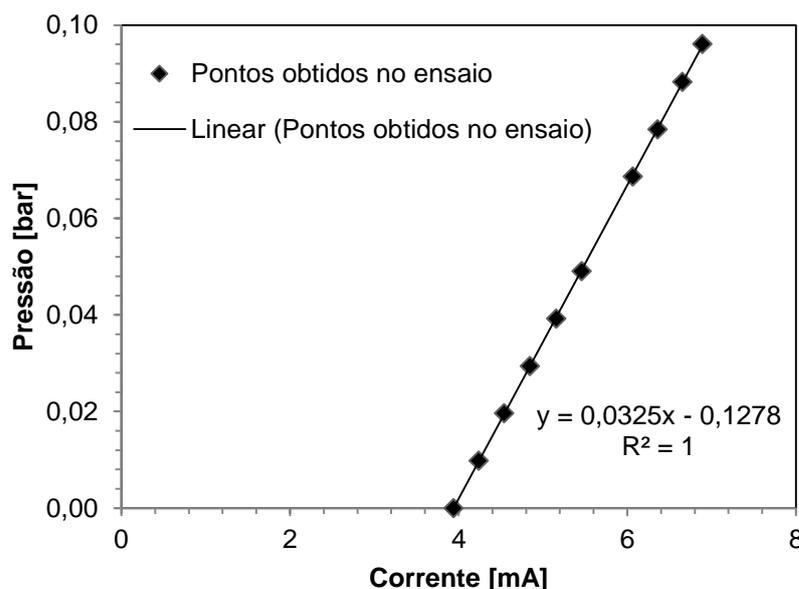


Figura 4.22. Curva de caracterização estática do transdutor de pressão diferencial.

Foi levantada a curva de ajuste de regressão linear para estes pontos (Figura 4.22), que resulta na Eq. (4.4). O coeficiente de determinação da regressão, R^2 , ficou igual a 1 e a faixa operacional pode ser determinada como entre 0 e 0,52 bar, uma vez que o sinal máximo medido é de 20mA.

$$Y = 0,0325 X - 0,1278 \quad (4.4)$$

Existe uma divergência entre este limite de operação e o que foi informado pelo fabricante, que seria de 0,10 bar. A fim de corroborar a credibilidade da curva de caracterização estática levantada, sobretudo frente à divergência no valor de faixa operacional, ensaios estáticos e com escoamento em regime permanente foram conduzidos no aparato experimental.

Foram utilizadas as medições por meio dos transdutores de pressão relativa instalados nos mesmos pontos das tomadas diferenciais para comprovação metrológica. Valores idênticos para pressão foram obtidos entre os medidores redundantes para todos os ensaios realizados, com diversas variações de vazão e pressão e com exatidão na similaridade na grandeza de centésimo de bar.

4.2.5.3 Calibração do medidor de vazão do tipo turbina

O processo de calibração do medidor de vazão demandou equipamentos auxiliares para sua realização. Uma balança com grandeza em gramas, um cronômetro com precisão em milésimo de segundos e um recipiente graduado em mililitros foram utilizados, apresentados na Figura 4.23.



Figura 4.23. Detalhe de equipamentos auxiliares ao ensaio de calibração do medidor de vazão.

Primeiramente foi calculada a massa específica da água no momento das medições utilizando o frasco volumétrico e a balança. O procedimento foi realizado por três vezes, obtendo sempre no mesmo valor, de 997 kg/m^3 , em conformidade com o valor da propriedade tabelado para 25°C , de $997,05 \text{ kg/m}^3$.

Os ensaios de calibração consistem em configurar o sistema de válvulas para uma determinada vazão em regime permanente, tomar um volume de água na saída do circuito, cronometrar o tempo de aquisição e pesar o volume recolhido (descontando a massa do recipiente). Para cada vazão foram recolhidas e cronometradas 10 amostras de água. As correntes resultantes dos ensaios foram adquiridas e gravadas pelo *LabVIEW*, por cinco minutos à 200 amostras por segundo.

Os tempos foram convertidos para hora e as massas para kg e por meio da Eq. (4.5) foram calculadas as vazões volumétricas para cada ensaio realizado.

$$Q = \dot{V} = \frac{\left(\frac{m}{\rho}\right)}{t} \quad (4.5)$$

sendo Q a vazão volumétrica em metro cúbico por hora, m a massa em quilograma, ρ a densidade em quilograma por metro cúbico e t o tempo em hora.

Dentre os 10 ensaios para cada uma das condições de vazão em regime permanente foi tomada a média das magnitudes para a construção da Tabela 4.11. Os valores de corrente elétrica, conforme anteriormente explicado, também atendem a um controle estatístico.

A Figura 4.24 apresenta a curva estática de caracterização oriunda da calibração do transdutor de vazão do tipo turbina.

Tabela 4.11. Resultados obtidos para os ensaios de caracterização estática do medidor de vazão do tipo turbina.

Média de vazão volumétrica [m³/h]	Corrente elétrica média [mA]
3,983	14,409
3,385	12,490
2,218	9,655
1,601	8,107
1,198	7,120
$4,693 \cdot 10^{-1}$	5,208
$4,718 \cdot 10^{-1}$	5,207

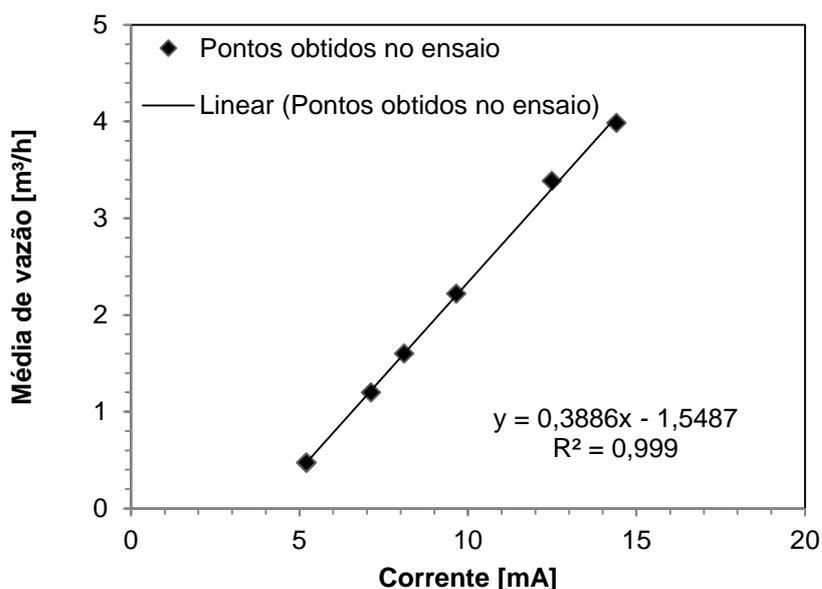


Figura 4.24. Curva de caracterização estática do medidor de vazão do tipo turbina.

Foi levantada a curva de tendência linear para a obtenção da Eq. (4.6), referente à conversão de corrente elétrica X , em vazão volumétrica Y . O coeficiente de determinação R^2 ficou em 0,999, sendo o ensaio coerente. O valor do coeficiente de determinação foi maior do que o previamente esperado, dadas as incertezas experimentais e erros inerentes aos ensaios, sobretudo no que diz respeito à cronometragem exata dos tempos de coleta de volume de água.

$$Y = 0,3886 X - 1,5487 \quad (4.6)$$

4.3 Testes preliminares para verificação do funcionamento da bancada

O último objetivo proposto a ser tratado é a realização de testes preliminares utilizando água como fluido de trabalho, com o intuito de verificar o funcionamento da bancada experimental e monitorar parâmetros operacionais. Foram realizados testes para determinação e variação do número de Reynolds na seção de teste a partir de ensaios com diferentes configurações de vazão definidas a partir do controle de válvulas. De forma análoga, foram realizadas a determinação e a variação de perdas de carga na seção de teste.

Partículas a serem ensaiadas foram especificadas, bem como o sistema de aquisição e tratamento de dados de imagem (e.g. câmera, iluminação e programa de análise). Finalmente, foram realizados ensaios de filmagem do escoamento particulado, captura de quadros e análise de velocidades aproximadas para o escoamento particulado, com base nas amostras colhidas.

4.3.1 Monitoramento do escoamento na seção de teste

Inicialmente, é apresentado o procedimento experimental desenvolvido para a operação da bancada na realização dos testes preliminares de funcionamento. O fluxograma geral do processo é apresentado na Figura 4.25, com base na numeração de identificação das válvulas determinada na Seção 3.3.2, conforme consta na Figura 3.11 (representação esquemática do circuito hidráulico do aparato experimental).

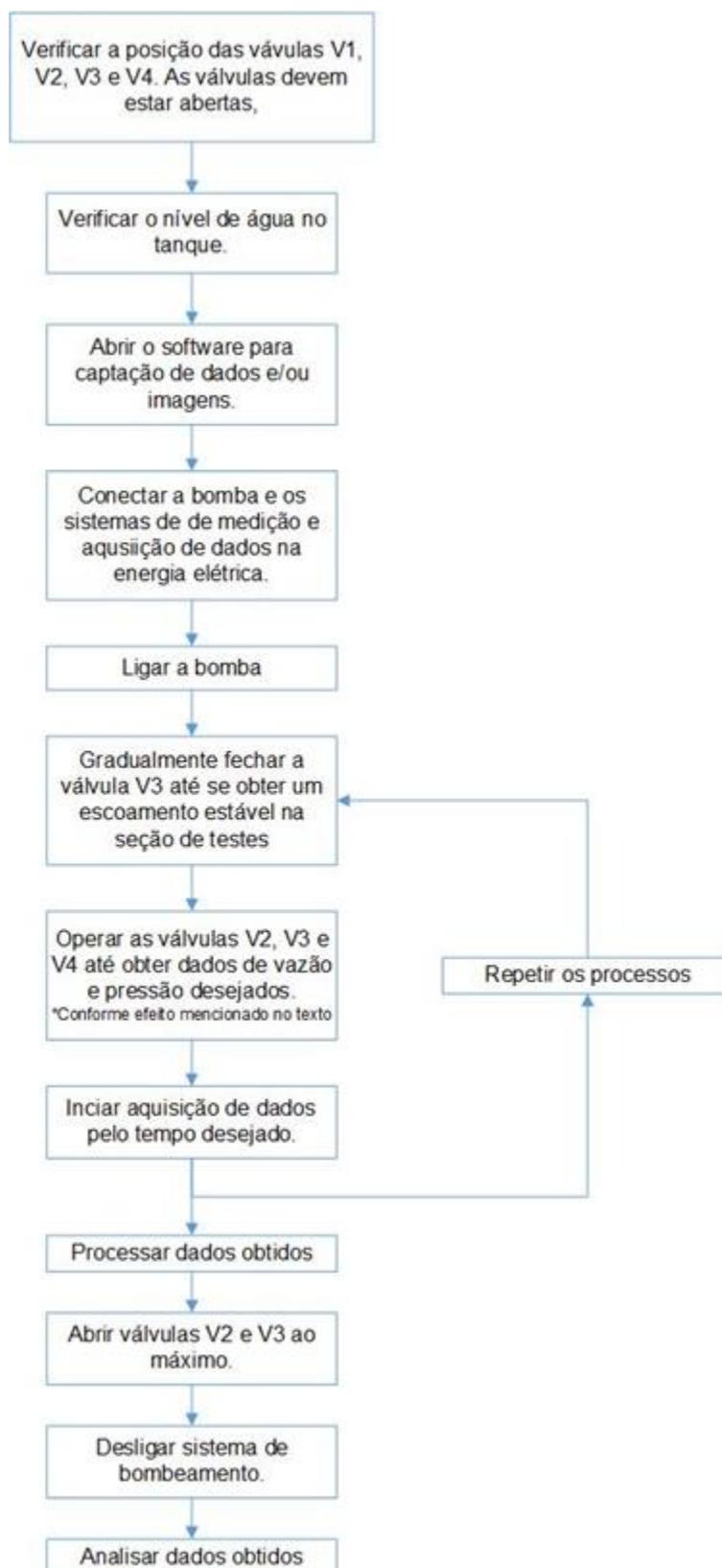


Figura 4.25. Fluxograma orientativo dos experimentos preliminares de verificação do funcionamento da bancada experimental.

A válvula V2 é responsável por permitir o acesso do escoamento à seção de testes. Quanto mais fechada estiver, menor a vazão escoando para a seção de testes, além de gerar um pequeno aumento na pressão do escoamento. A válvula V3 é a válvula do sistema de retroalimentação. Quando inteiramente fechada, todo o fluido bombeado escoar para a seção de testes.

A válvula V4 está localizada na tubulação de saída da seção de teste, e seu fechamento diminui a vazão escoando pela seção enquanto aumenta consideravelmente a pressão do escoamento.

A dinâmica de procedimentos dos testes de verificação da bancada, no que diz respeito ao controle e variação de vazão, consistiu em manter duas das válvulas citadas numa posição fixa, variando a abertura da outra.

O objetivo dos testes de verificação foi o de calcular o número de Reynolds e a perda de carga na seção de testes. Foram determinados dois padrões de configuração de válvulas para os testes de escoamento:

- O primeiro padrão de testes foi realizado com a válvula V4 totalmente aberta, resultando numa pressão negativa na parte superior da seção de testes.
- O segundo padrão de testes foi realizado com a válvula V4 fechada em 50% (metade), tornando a pressão positiva em toda a seção de testes. Todos os testes foram iniciados com a menor vazão possível, que foi gradativamente aumentada até a máxima vazão permitida.

A interface programada em *LabVIEW* adquire e interpreta os dados de pressão e vazão do escoamento e através dos conceitos básicos de mecânica dos fluidos, tratados na Seção 2.1, a velocidade média do escoamento é obtida pela Eq. (2.4) e o número de Reynolds do escoamento pela Eq. (2.1).

A massa específica da água foi calculada da mesma maneira que para a calibração dos instrumentos, aferindo no valor de 997,05 kg/m³. A viscosidade absoluta da água utilizada foi de 1,003 x 10⁻³ Pa.s e, visto que a seção de escoamento não é circular (a seção é prismática), o diâmetro hidráulico foi determinado através da Eq. (2.2). O diâmetro hidráulico calculado foi de 0,03296 m.

Com os dados de pressão obtidos, a perda de carga total no trecho de 1,8 metros entre a instalação dos dois transdutores de pressão relativa na seção de

testes é calculada através da Eq. (4.7) (desenvolvida a partir da Eq. (2.8) desprezando-se a variação da energia cinética).

$$h_{i-2} = \left| \frac{(p_1 - p_2)}{\rho} - g \cdot (z_2 - z_1) \right| \quad (4.7)$$

4.3.1.1 Testes com pressão negativa

Antes de mais nada, a nomenclatura “pressão negativa” se deve ao fato de que o efeito sifão proporcionado pelo aspecto construtivo da tubulação de retorno da bancada gerar um efeito de sucção na seção de teste, sendo verificados valores negativos de pressão para as condições operacionais de ensaio estabelecidas.

Foram feitos testes com 12 diferentes valores de vazão, iniciando pela menor e gradativamente aumentando até a maior. Para cada amostra de vazão, esperou-se a estabilização do escoamento para o início da tomada de dados, que foram tomados durante 3 minutos à uma taxa de 200 aquisições por segundo.

As válvula V2 e V4 foram mantidas completamente abertas enquanto a válvula V3 foi gradualmente fechada para propiciar o aumento de vazão. Os valores utilizados para os cálculos foram tomados na média. A Tabela 4.12 apresenta os resultados obtidos nos testes.

Tabela 4.12. Resultados obtidos nos testes

Vazão [m³/h]	Veloc. Média [m/s]	Número de Reynolds	ΔP [Pa]
0,8544	0,2029	6645,89	4795,22
1,1234	0,2667	8738,32	3800,20
1,4985	0,3558	11656,14	4309,38
1,5276	0,3627	11882,20	4371,83
1,7340	0,4117	13487,97	4699,66
1,8445	0,4379	14347,46	5001,03
2,2043	0,5233	17145,62	5796,24
2,5907	0,6151	20151,05	6803,48
2,9784	0,7071	23166,97	7976,40
3,4288	0,8141	26670,16	9580,30
3,8582	0,9160	30010,03	11262,11
3,9524	0,9384	30743,32	11645,54

Para todos os testes, o regime do escoamento é turbulento. Aspectos construtivos não permitem que a vazão do escoamento seja tão baixa a ponto do

escoamento ser laminar utilizando água como fluido de trabalho. A utilização de fluidos mais viscoso, como misturas de água e glicerina, possibilitariam a obtenção de regimes laminares de escoamento. Os valores de perda de carga são apresentados na Tabela 4.13 e os gráficos referentes são mostrados na Figura 4.26.

Com o aumento do número de Reynolds ocorre uma queda na perda de carga experimentada pelo escoamento. Esta perda de carga representa toda a perda de carga da seção de testes. Segundo Brill e Murkherjee (1999) a perda de carga devido ao atrito representa aproximadamente de 5 a 20% da variação de pressão total. A maior parcela da variação de pressão se deve à elevação.

Tabela 4.13. Perda de carga calculada pra escoamento com pressões negativas

Número de Reynolds	Perda de Carga [J/kg]
6645,89	1,2849E+01
8738,32	1,3847E+01
11656,14	1,3336E+01
11882,2	1,3273E+01
13487,97	1,2944E+01
14347,46	1,2642E+01
17145,62	1,1845E+01
20151,05	1,0834E+01
23166,97	9,6580E+00
26670,16	8,0494E+00
30010,03	6,3626E+00
30743,32	5,9780E+00

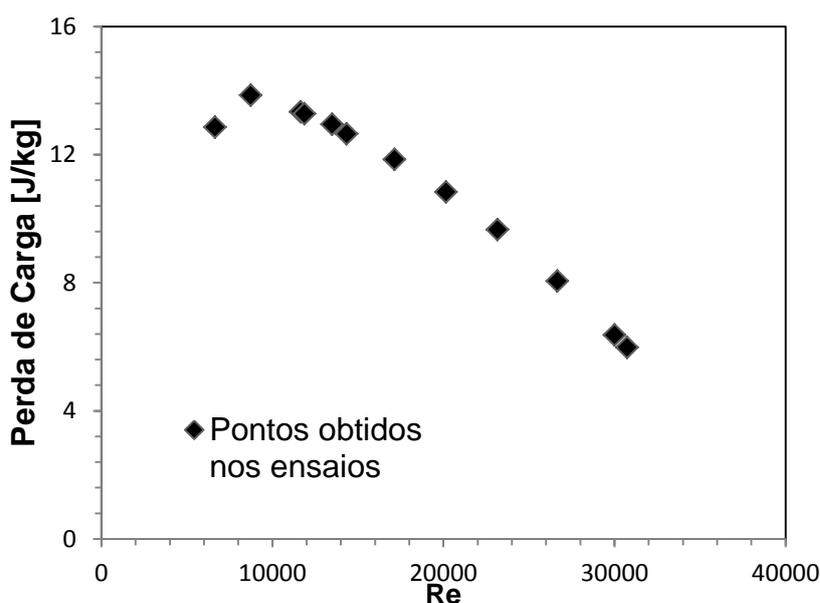


Figura 4.26. Perda de carga em função do número de Reynolds do escoamento.

4.3.1.2 Testes com pressão positiva

Foram realizados quatro testes com pressão positiva. Para propiciar a pressão positiva, a válvula V4 foi mantida 50% fechada, a válvula V2 completamente aberta e a válvula V3 foi sendo gradualmente fechada. Deste modo, toda a seção de testes foi pressurizada.

Foram obtidos apenas quatro pontos, de maneira a preservar a seção de testes, visto que houve sinais de sobrepressão e ocorrência de pequenos pontos de vazamentos. Um aumento maior na pressão poderia ocasionar fraturas e falhas de vedação de uma das faces da seção de teste.

A Tabela 4.14 apresenta os resultados obtidos com pressão positiva. Vale ressaltar que o primeiro ponto destoa do comportamento dos demais, uma vez que para a vazão de 0,8193 m³/h e configuração operacional do ensaio ainda havia vácuo na seção de teste. No monitoramento dos parâmetros para os demais pontos a pressão verificada era positiva.

Tabela 4.14. Resultados obtidos com pressão positiva

Vazão [m ³ /h]	Veloc. Média [m/s]	Número de Reynolds	ΔP [Pa]
0,8193	0,1945	6372,52	14007,39
0,9998	0,2374	7777,08	17439,44
1,2306	0,2922	9571,83	17709,48
1,4815	0,3517	11523,54	17747,15

Assim como para os testes com pressão negativa, todos os testes apresentam regimes de escoamento turbulento. Comparando com os resultados para pressão negativa, a diferença de pressão medida entre os transdutores é cerca de quatro vezes maior para escoamentos com pressão positiva. Os valores de perda de carga calculados são apresentados na Tabela 4.15.

Tabela 4.15. Perdas de carga obtidas para escoamentos com pressão positiva

Número de Reynolds	Perda de Carga [J/kg]
6372,52	3,6092
7777,08	0,1670
9571,83	0,1039
11523,54	0,1417

Para esse tipo de escoamento não é possível notar qualquer comportamento, haja vista a necessidade de interrupção do monitoramento. As perdas de carga são significativamente menores quando comparadas com as perdas de carga de escoamentos com pressões negativas na seção de teste. Cabe ressaltar que o caráter destes testes é preliminar e com único objetivo de submeter a bancada a diferentes tipos de escoamento para verificar as condições de operação, o sistema de aquisição de dados e a vedação do circuito hidráulico.

4.3.2 Filmagem do escoamento

A visualização e filmagem do escoamento é um importante meio de análise do escoamento particulado. O sistema de filmagem envolve uma lâmpada, um pano difusor e uma câmera conectada a um computador. A Figura 4.27 apresenta uma imagem do sistema de visualização do escoamento, enquanto a Tabela 4.16 apresenta as características da câmera utilizada.

A câmera é conectada ao computador por meio de um cabo USB, transmitindo a filmagem ao programa *Motion Studio*, no qual é possível editar a velocidade de captura, o tamanho da janela de captura, o tempo de filmagem e o formato de saída das imagens.

Tabela 4.16. Características da câmera utilizada.

Fabricante	Dantec Dynamics
Modelo	NanoSense MK-III
Resolução	1.3 Megapixel
Velocidade	Até 1040 frames/s
Capacidade de armazenamento	4 GB
Outras características	Monocromática

Com o intuito de observar o escoamento particulado, foram realizadas filmagens preliminares com dois tipos de partículas: abrasivo plástico e microesferas de vidro. Para a execução destes testes foi utilizado um circuito hidráulico alternativo sem a presença do medidor de vazão turbina, visto que este medidor não permite operar com a presença de partículas.



Figura 4.27. Sistema de filmagem e aquisição de quadros de imagem.

Para realizar a filmagem foi utilizado, em conjunto com a câmera de alta velocidade apresentada, um sistema de iluminação disposto a 20 centímetros da seção de testes. A câmera foi fixada em um tripé e colocada a 68 centímetros da lateral da seção de testes. O tempo ajustado para captura de imagens foi de meio segundo, i.e., cada comando de filmagem é realizado por meio segundo.

Para ambos os tipos de partículas, foram inseridos 100 gramas de particulado a 83 litros de água no tanque. Uma régua foi acoplada à parede da seção de teste

para permitir mensurar a velocidade aproximada de deslocamento do particulado. As características das partículas utilizadas são apresentadas na Tabela 4.17.

Tabela 4.17. Características das partículas utilizadas.

Dados	Abrasivo Plástico	Esferas de vidro
Material	Urea	Vidro
Diâmetro	0,8 < diâm.< 1,2 mm	0,18 < diâm.< 0,3 mm
Massa específica a 25°C	1,5-1,6 g/cm ³	2,5 g/cm ³
Quantidade	20 kg	20 kg
Coloração	Branca mesclada.	Branca

A Figura 4.28 (a) apresenta uma foto instantânea da filmagem do escoamento com microesferas de vidro. Nesta imagem é quase impossível perceber a presença do particulado. A Figura 4.28 (b) apresenta uma ampliação do mesmo escoamento, com a câmera a 48 centímetros da seção de teste, permitindo a visualização de algumas das partículas, porém sem qualidade o suficiente para permitir analisar apropriadamente o escoamento.

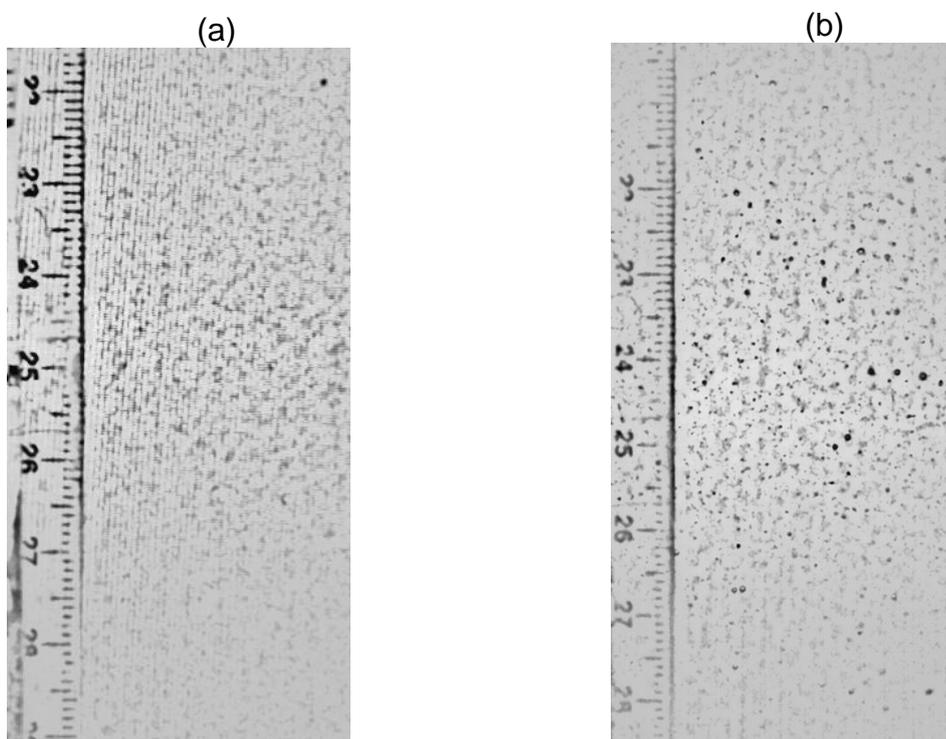


Figura 4.28. Fotografia do escoamento de microesferas de vidro.

A Figura 4.29 apresenta os seis primeiros quadros em sequência do escoamento de abrasivo plástico. A partir desses *frames* foi possível calcular a velocidade aproximada do particulado. No primeiro *frame*, foram escolhidas três partículas, uma em cada parede e uma no centro do escoamento.

A partir do deslocamento destas partículas e do intervalo de tempo entre cada *frame* (0,000962s) foram calculadas as velocidades das partículas entre cada quadro e a média dos seis quadros. O mesmo procedimento foi realizado para os últimos seis quadros do escoamento. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.18.

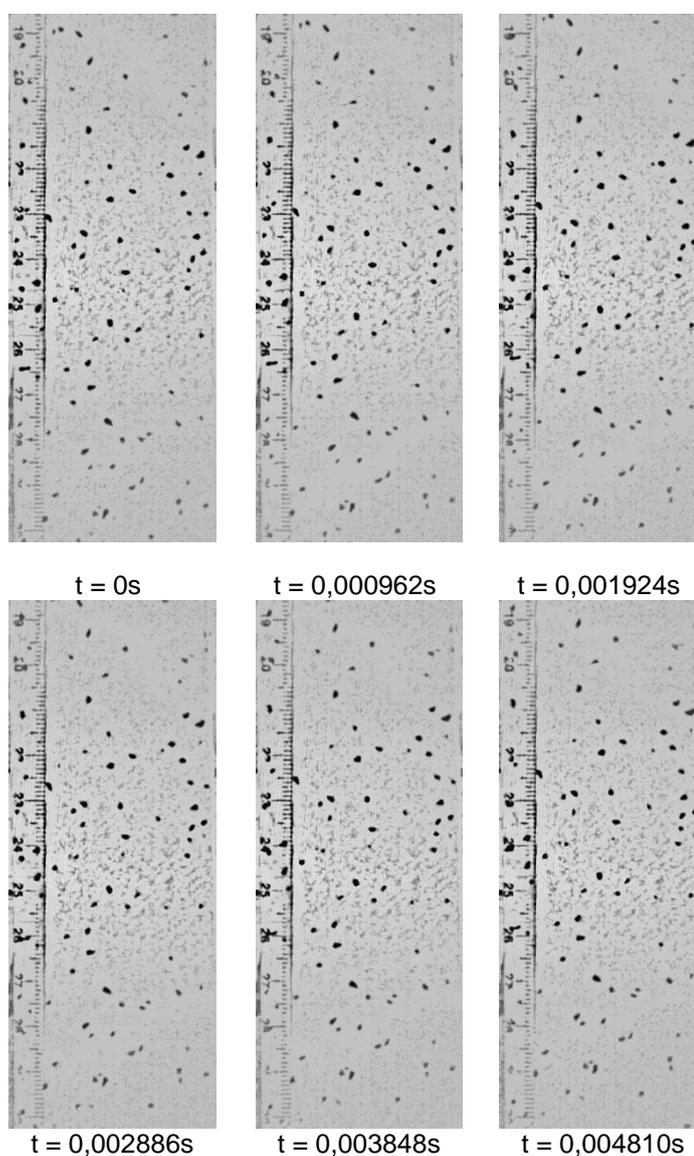


Figura 4.29. Escoamento abrasivo plástico - seis primeiros frames.

Tabela 4.18. Velocidade aproximada das partículas.

	6 primeiros quadros			6 quadros finais		
	Parede esquerda [m/s]	Centro [m/s]	Parede direita [m/s]	Parede esquerda [m/s]	Centro [m/s]	Parede direita [m/s]
V₁₂	12,47	20,79	13,51	15,59	14,55	10,40
V₂₃	13,51	19,75	14,55	14,55	13,51	11,43
V₃₄	11,43	21,83	12,47	14,55	13,51	10,40
V₄₅	14,55	17,67	13,51	13,51	14,55	9,36
V₅₆	15,59	15,59	12,47	13,51	15,59	9,36
\bar{V}	13,51	19,13	13,30	14,34	14,34	10,19

O cálculo das velocidades realizado possui uma alta imprecisão, pois é feito manualmente e um erro de um décimo de milímetro na medição provoca uma variação de quase um metro por segundo na velocidade. Assim, o desenvolvimento do projeto prevê a utilização de um programa adequado ao tratamento e análise de imagens para maior precisão na determinação das velocidades. A utilização da técnica de análise de imagens de aplicação do PIV (PALACIOS, 2011) à macro partículas para a determinação das velocidades e possível contagem de partículas também é cogitada.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou a proposta de pesquisa e o projeto de desenvolvimento de uma bancada experimental para o estudo de escoamentos particulados em canal fraturado, que foi construída e montada no Laboratório de Ciências Térmicas da UTFPR.

Foi realizada uma revisão bibliográfica das áreas de conhecimento envolvidas. Diretrizes de projeto foram estabelecidas a partir de procedimentos metodológicos estruturados, que foram seguidos e executados em todas as etapas de concepção. A seleção dos equipamentos e instrumentos necessários para a operação da bancada foi descrita e documentada.

Em termos práticos, os objetivos que foram propostos (e.g. projetar, construir, instrumentar e verificar o funcionamento da bancada) foram alcançados. A bancada foi construída, instrumentada e apresentada com detalhes. As características construtivas e de operação foram abordadas. Os medidores de pressão e o medidor de vazão foram calibrados.

Através dos ensaios de calibração, pôde-se determinar o comportamento e levantar as curvas de caracterização para os instrumentos de medição instalados. As curvas obtidas apresentaram coeficiente de determinação igual a um, confirmando o comportamento linear dos pontos obtidos nos ensaios.

Para o objetivo de verificar a construção da bancada por meio de testes de operação, não foram obtidos resultados conclusivos, mas o objetivo de testar o funcionamento da bancada e dos sensores foi corroborado. Foram realizados dois modelos de testes preliminares de verificação: a filmagem do escoamento particulado e testes de monitoramento do escoamento com água na seção de testes.

Foi possível monitorar vazão e pressão do escoamento, calcular a velocidade média e o número de Reynolds na seção de teste, perceber a influência de atrito e elevação na perda de carga e observar o efeito sifão com geração de vácuo na seção de testes.

Filmagens iniciais foram realizadas utilizando dois tipos de partículas com diferentes tamanhos. A instalação de uma graduação milimétrica durante as filmagens possibilitou o cálculo aproximado da velocidade das partículas. Ficou

evidente a necessidade de implementação de um sistema de análise de imagens apropriado para aumentar a precisão do cálculo das velocidades e, se possível, permitir a contagem de partículas que passam por uma seção ao longo de um período de tempo. Segundo indicado na literatura, a utilização da técnica de PIV mostra-se bastante viável à medida que pode ser aplicada a macro-partículas. Vale ressaltar que a técnica é estudada e aplicada em grupos de pesquisa dentro do LACIT.

A interface de leitura, monitoramento e controle de dados programada no LabVIEW funciona bem e permite a gravação de dados e o controle estatístico dos ensaios. Pode-se observar que o escoamento de água para as faixas operacionais de vazão permitidas pelo controle do sistema de válvulas é notadamente turbulento.

Nos testes de verificação da bancada, foram observados valores entre 6000 até 12000 para número de Reynolds do escoamento na seção de teste. A obtenção de regimes de escoamento laminares para a atual configuração da bancada é impossível utilizando água como fluido de trabalho, pois a mínima vazão fornecida pela bomba com capacidade de vencer a altura de elevação imposta pelo sistema e iniciar o escoamento já caracteriza um regime de escoamento turbulento.

A utilização de uma bomba acoplada com um inversor de frequência e a utilização de fluidos mais viscosos possibilitariam testes com escoamentos em regime laminar. O diferencial de pressão medido entre os dois transdutores de pressão relativa e a diferença de altura entre os dois permitiram o cálculo da perda de carga total entre esses dois pontos, que representa quase toda a extensão da seção de testes. Conforme esperado, a perda de carga diminui com o aumento do número de Reynolds. Estudos para a determinação da perda de carga causada somente pelo atrito e a determinação do fator de atrito relacionado a essa perda são demandados e previstos como próximas etapas.

Foi verificada a necessidade de um reforço estrutural no trecho da seção de testes, já que a pressurização do sistema mediante fechamento parcial de válvula no retorno gerou pontos de vazamento. A cola utilizada mostrou ser insuficiente do ponto de vista estrutural. Esta fragilidade limitou os testes com pressão positiva, devido ao receio de danificar o acrílico de maneira irreversível. A solução prevista é

a instalação de uma placa de acrílico parafusada contra a parede que apresentou vazamentos, da mesma maneira que está instalada na face oposta.

Dentre as dificuldades inerentes ao projeto, pode-se destacar os altos custos de alguns componentes, a burocracia e atrasos referentes ao processo licitatório e de aquisição de equipamentos, que trazem prejuízo significativo ao cronograma estruturado. Um ponto positivo de desenvolvimento deste projeto foi o intercâmbio de informações entre a universidade e empresas como a ESSS e a PETROBRAS.

Na etapa de montagem, alguns detalhes construtivos não previstos no projeto conceitual precisaram ser improvisados. No entanto, este fator não prejudicou as características principais da bancada e a sua funcionalidade.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em termos de aspectos operacionais da bancada construída, é recomendada uma série de procedimentos experimentais para averiguar o tempo de resposta dos sensores à variações bruscas de condições de operação (e.g. vazão e pressão), à garantia de vedação e à caracterização do escoamento na seção de testes.

Uma série de equipamentos estão em vias de aquisição e a instalação, sobretudo do medidor coriolis e do novo sistema de bombeamento, possibilitará o estudo do escoamento particulado.

Diversos fatores precisam ser melhor estudados e compreendidos, como é o caso do efeito sifão propiciado pelas características construtivas do circuito experimental e análise da influência que este efeito possui na instrumentação. Além disso, uma série de melhorias podem ser realizada na bancada, dentre as quais se destaca o reforço estrutural da seção de testes no sentido de suportar maiores pressões.

Em termos de ensaios para escoamento de fluido, é sugerido caracterizar o escoamento monitorando mudanças a partir da alteração de um dado parâmetro de entrada e filmar com grande número de quadros e alta resolução os processos e interações provenientes da experimentação nas seções de teste.

O próximo passo na modelagem do problema físico formulado é a inserção de uma fratura de geometria bem definida e o tratamento de todas as implicações da

fratura nas características do escoamento (e.g. instrumentação da fratura). O futuro de desenvolvimento do projeto da frente experimental do escoamento sólido-fluido, que segue em andamento, é o estudo do escoamento particulado em canal parcialmente poroso e fraturado.

Deseja-se comparar resultados de ensaios com resultados oriundos de simulações numéricas, investigar a vedação de poros e fraturas, caracterizar o particulado em termos de densidades, concentrações e materiais e analisar o comportamento de diferentes partículas na solução de perdas de circulação.

Sobre partículas, seria interessante calcular concentração, eficiências de coleta de partículas, frações volumétricas em relação à mistura, condições de gradientes de pressão para preenchimento de fraturas, heterogeneidade de suspensão e definições de vazão, perda de carga e velocidades ao longo da tubulação do aparato e da seção de teste.

REFERÊNCIAS

- ABNT e INMETRO. **Guia para a Expressão da Incerteza de Medição**. Rio de Janeiro: Safira Comunicação. 2003.
- ADAMS, N.. **Well Control Problems and Solutions**. First ed., PennWell Books., U.S.A., 1980.
- AGUIRRE OLIVEIRA JR, J. A.; RIBEIRO, D.C.; FONTES, C.E.; LEIBSOHN, A.M.; MAGALHÃES, J.V.M.. **Análise da deposição de areia em um rat-hole durante o gravel packing de um poço horizontal**. In: III Encontro Nacional de Hidráulica de Poços, Campos do Jordão, São Paulo, 2009.
- ALLEN, T. **Particle Size Measurement**, Chapman & Hall, Londres, 3ª edição, 454 p. (1981).
- ANSI. **Norma ANSI/ISA-S5.1**. 1984, R-1992
- ASME, Shale Shaker Committee. **Drilling Fluids Processing Handbook**. USA: Elsevier Inc., 2005.
- BACK, N; OGLIARI, A.; DIAS, A; SILVA, J.C.. **Projeto Integrado de Produtos: Planejamento, Concepção e Modelagem**. São Paulo: Manole, 2008.
- BAKER, R.C.. **Flow Measurement Handbook**. Digital ed., Cambridge University Press, New York, U.S.A., 2005.
- BARBOSA, M.I.R.. **Desenvolvimento de aditivos poliméricos para formulação de compósitos com bentonitas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e Metalúrgica). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2006.
- BEGGS, H. D. and BRILL, J. P., **Study of Two-phase Flow in Inclined Pipes**. Journal of Petroleum Technology, maio de 1973, pp. 607-617.
- BELÉM, F.A.T.. **Operador de Sonda de Perfuração**. CEFET-RN, Mossoró, 2008.
- BERKER, R., **Intégration des Équations du Mouvement d'un Fluid Visqueux Incompressible**, Handbuch der Physik (Flügge, S., Ed.), vol. VIII/2, Springer-Verlag, Berlin, 384 p. (1963).

- BLAND, J.M.; ALTMAN, D.G. **Statistics notes: measurement error**. BM, volume 313(7059). 1996.
- BOMAX. **BOMAX DO BRASIL BOMBAS QUÍMICAS LTDA.: Bombas, tanques, agitadores e filtros industriais**. Taboão da Serra, 2001. (Catálogo Comercial).
- BRILL, J. P., MURKHERJEE. H. **Multiphase Flow in Wells**. Dissertação de mestrado, University of Tulsa, Society of Petroleum Engineers, 1999.
- CALIBRAEND. Blog. Disponível em: <http://calibraend.blogspot.com.br/2013/02/voce-conhece-diferenca-entre-precisao-e.html>. 2013
- CHRISTENSEN, R. **Plane Answers to Complex Questions: The Theory of Linear Models**. 3ª edição. New York: Springer. 2002.
- CIPM. **Working Group e Recomendações**. 1981.
- COOK, J.; GROWCOCK, F.; GUO, Q.; HODDER, M.; OORT, E.V.. **Stabilizing the Wellbore to Prevent Lost Circulation**. Oilfield Review Winter 2011/2012: 23, no. 4, 2012.
- DARLEY, H. C.; GRAY, G. R.. **Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids**. Fifth Edition, 634p, Gulf Publishing Company, Houston-USA, 1988.
- DE LAI, F.C.. **Simulação Numérica da Convecção Natural em Cavidade Preenchida com Meio Poroso Heterogêneo**. Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Industrial Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 158 p., 2009.
- DE LAI, F.C. **Simulação Numérica do Escoamento Particulado para o Preenchimento de Canal Fraturado**. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 203 p., 2013.
- DIETRICH, P.; HELMIG, R.; SAUTER, M.; HOTZL, H.. **Flow and Transport in Fractured Porous Media**. First ed., Springer, The Netherlands, 2005.
- DINIZ, V. E.. **Escoamento Bifásico (sólido-líquido) em Conduitos Inclinados Sob Pressão**. Dissertação de Mestrado, Campinas-SP, 1998.
- DOEBELIN, E.O.. **Measurement Systems Application and Design**. Mcgraw-Hill College, 4ª ed., New York, 1989.

- DRAPER, N.R.; SMITH, H.. **Applied Regression Analysis**. Wiley-Interscience, 1998.
- DURAND, R.; CONDOLIOS, E.. **Étude expérimentale du refoulement des matériaux em conduites, em particulier des produits de dragade et des schlamms**. Journées de Hydraulique, Grenoble, 1952.
- ESTATCAMP. **Análise dos Sistemas de Medição MSA**. Manual de Referência. 4 ed. Consultoria em Estatística e Qualidade. São Paulo, 2010.
- ESTERMANN, I. **Methods of Experimental Physics**. volume 1: Classical Methods, New York and London: Academic Press. 1959.
- FERREIRA, A. B. H. **Dicionário Aurélio Básico da Língua Portuguesa**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1988
- FRANÇA, F. **Instrumentação e Medidas: grandezas mecânicas**. Notas de aula. UNICAMP 2007.
- FREUDENRICH, C.. **Como funciona a perfuração de petróleo**. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/25486024/Como-funciona-a-perfuracao-de-petroleo>>. Acesso em fevereiro 12, 2013.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T; PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**, 6ª Ed. Rio de Janeiro, RJ: Editora LTC S.A., 2006
- GRAF, T.; THERRIEN, R.. **Variable-density groundwater flow and solute transport in porous media containing nonuniform discrete fractures**. Advances in Water Resources 28, p. 1351-1367, 2005.
- GIDASPOW, D.. **Multiphase Flow and Fluidization**. Academic Press, 1994.
- HALLIBURTON. **BAROID Fluid Services**. Estados Unidos, 2008. (Catálogo Comercial).
- HALLIBURTON. **Case History: Lost Circulation Materials**. Estados Unidos, 2010. (Prospecto anexo a Catálogo Comercial).
- HALLIBURTON. **Lost Circulation Material Overview**. Estados Unidos, 2014. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=dCVQ5IKdTKs>

- IBP, Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis. **A contribuição do setor brasileiro de petróleo, gás e biocombustíveis para o desenvolvimento sustentável do país.** Conferência Rio + 20, 2012.
- INCONTROL. **Manual de operação e instalação: Medidor de Vazão Tipo Turbina para Líquido.** Manual Técnico, São Paulo, 2009.
- ISO GUM. **Avaliação de dados de Medição - Guia para a expressão de incerteza de medição.** 1ª edição brasileira. 2008.
- IVAN, C.; BRUTON, J.. **Avoiding lost circulation.** 2005 Disponível em: <http://www.epmag.com/EP-Magazine/archive/Avoiding-lost-circulation_2046>. Acessado em fevereiro 12, 2013.
- JCGM. **International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms.** Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). 2012
- LABVIEW. **National Instruments: LabVIEW – Help.** 2013.
- MASSARANI, G.. **Fluidodinâmica em Sistemas Particulados.** 2ed., E-papers, Rio de Janeiro, 2002.
- MATEX. **Matex Control.** 2014. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=eWY4FBCKZ0c>
- METROVAL, Controles de Fluidos LTDA. **Medidores Mássicos Coriolis.** Catálogo Comercial, Nova Odessa, 2007.
- NAMAS. **NIS 3003 – Incerteza e Confiança na Medição.** 1995
- NATIONAL INSTRUMENTS. **NI CompactDAQ USB Data Acquisition Systems.** Data Sheet, 2012.
- OFFSHORE MAGAZINE. **Environmental Drilling & Completion Fluids Directory.** Edição de setembro, p. 51-73, 2010. Disponível em: <http://www.offshore-mag.com>. Acesso em: 16 de fevereiro de 2011.
- PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K-H.. **Projeto na Engenharia: Fundamentos do Desenvolvimento Eficaz de Produtos.** Métodos e Aplicações. São Paulo: Edgard Blucher, 2005.
- PALACIOS, F.M.S.. **Estudo Experimental do Escoamento de Fluido Newtoniano em Contração Abrupta Axissimétrica com a Técnica de Velocimetria por**

- Imagem de Partículas.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 174 p., 2011.
- PEKER, S.M.; HELVACI, S.S.. **Solid-Liquid Two Phase Flow.** Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2008.
- RASHID, M. H. **Power Electronics – Circuits, devices and applications.** 2ª ed. Prentice Hall, New Jersey: 1993.
- REIS, E.. **Estatística Descritiva.** Edições Sílabo, 2ª ed., Lisboa, 1994.
- RÜCKEN. **Instrumentação e automação industrial: Transmissor de pressão diferencial modelo RTP-420-DIF.** Manual Técnico, São Paulo, 2014.
- RUEDA, F.. **FlexPlug® OBM Material Successfully Stops Lost Circulation in Several Latin American Wells.** Estudo de caso. Halliburton Energy Services, Inc, 2008.
- SOUZA, J.Z.; OLIVEIRA JR., J.A.A.; FONTES, C.E.; WALDMANN, A.; MARTINS, A.L.; LOMBA, R.. **Modelagem e Simulação da Deposição de Partículas em Fendas de Reservatórios Fraturados.** In: Iv Encontro Nacional de Hidráulica de Perfuração e Completação de Poços de Petróleo e Gás, Foz do Iguaçu, Paraná, 2011.
- SOUZA, J.Z.; AGUIRRE, J.A.; FONTES, C.E. **Modelagem e Simulação de Escamentos Líquido-sólido em Aplicações para Poços e Reservatórios de Petróleo.** Relatório de Acompanhamento, Rio de Janeiro, 2010.
- SUNDYNE. **SUNDYNE CORPORATION: ANSIMAG – Built for Reliability.** Estados Unidos, 2010. (Catálogo Comercial).
- TELLES, P.C.S.. **Tubulações Industriais – Cálculo.** Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro-RJ, 2006.
- TELLES, P.C.S.. **Tubulações Industriais – Materiais, Projeto, Montagem.** Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro-RJ, 2005.
- THOMAS, J.E.. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo.** 2. Ed., Rio de Janeiro, Interciência: PETROBRAS, 2004.
- VENABLES, W.N.; RIPLEY, B.D. **Modern Applied Statistics with S.** 4ª edição, Springer, 2002.

- VIEIRA, J.; SILVA, R.; GOMES, L. **Técnicas de medição e instrumentação: Medição e o erro de medição**. Relatório Acadêmico. Centro de Competência das Ciências Exatas e das Engenharias. Universidade da Madeira. 2011
- WALKER, H. M. **Degrees of Freedom**. Journal of Educational Psychology 31 (4): 253–269. 1940.
- WENDLAND, E.; HIMMELSBACH, T.. **Transport simulation with stochastic aperture for a single fracture – comparison with a laboratory experiment**. Advances in Water Resources 25, p. 19-32, 2002.
- WHITE, F. **Mecânica de Fluidos**, 6ª edição, 2008, McGraw-Hill.
- WIKA. **Flush pressure transmitter data sheet: Model S-11 for viscous and solids-containing media**. Catálogo Comercial, Klingenberg, Alemanha, 2012.

APÊNDICE A – NOÇÕES BÁSICAS DE MECÂNICA DOS FLUIDOS

Fluido é definido como uma matéria que se deforma continuamente sob a aplicação de uma tensão de cisalhamento, não importa o quão pequena ela possa ser. De acordo com este conceito, podem ser considerados fluidos os gases, os vapores e os líquidos (FOX *et al.*, 2006).

O conceito de massa específica (ρ) de uma mistura homogênea é a razão entre sua massa (m) e o volume (V) ocupado por esta massa, Eq. (A.1). Desta forma, pode-se dizer que a massa específica mede o grau de concentração de uma massa em determinado volume. No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade de massa específica é o kg/m³.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{A.1})$$

Densidade relativa é definida como a razão entre a massa específica de uma determinada substância e a massa específica de uma substância de referência. Assim, a densidade relativa é uma grandeza adimensional. Em geral, a referência para sólidos e líquidos é a massa específica da água (na condição de temperatura e pressão de 4° C e 101325 Pa) e para os gases é a massa específica do ar (a 21,1° C e 101325 Pa).

A tensão de cisalhamento (τ) é uma relação entre a aplicação de uma força de cisalhamento e a área cisalhante, que para o plano cartesiano xy é dada pela Eq (A.2).

$$\tau_{xy} = \mu \frac{dV}{dy} \quad (\text{A.2})$$

sendo μ a viscosidade dinâmica do fluido.

A viscosidade dinâmica de um fluido (μ), também chamada de viscosidade absoluta, é uma constante que representa sua resistência à deformação. Assim,

quanto maior a viscosidade, maior será a necessidade de energia para escoar o fluido.

Os fluidos classificados como newtonianos são aqueles em que o comportamento entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade na direção normal é linear, i.e., a tensão é diretamente proporcional à taxa de deformação. Os fluidos não newtonianos têm comportamento não linear entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade, não apresentando viscosidade definida.

O conceito de viscosidade cinemática (ν) de um fluido é a relação entre a viscosidade absoluta e a massa específica, Eq. (A.3). No SI a unidade de viscosidade absoluta é Pa·s (N·s/m²) e a de viscosidade cinemática é m²/s.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{A.3})$$

A definição de perda de carga se dá a partir do conceito da conservação de energia. Entre seções distintas 1 e 2, a perda de carga total por unidade de massa (h_{lr}) é definida pela Eq. (A.4) como a conversão irreversível de energia mecânica em energia térmica não desejada e em perda de energia por transferência de calor. A unidade da perda de carga é J/kg, que é equivalente à m²/s².

$$h_{lr} = \left(\frac{p_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{\bar{V}_1^2}{2} + gz_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{\bar{V}_2^2}{2} + gz_2 \right) \quad (\text{A.4})$$

Para situações de escoamento completamente desenvolvido em tubo horizontal, a queda de pressão pode ser relacionada à perda de carga por atrito (h) por meio do fator de atrito de Darcy (f), conforme a Eq. (A.5). Para o escoamento laminar o fator de atrito independe da rugosidade, é função apenas de Re e pode ser definido analiticamente, Eq. (A.6).

$$h_l = f \frac{L}{D_H} \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (\text{A.5})$$

$$f_{laminar} = \frac{64}{\text{Re}} \quad (\text{A.6})$$

Para o escoamento turbulento, o fator de atrito é determinado experimentalmente e pode ser obtido através do diagrama de *Moody* (FOX *et al.*, 2006) ou por meio de correlações empíricas.

Segundo White (2008), dentre as correlações empíricas a Eq. (A.7) de Karmann-Prandtl e a Eq. (A.8) de Blasius são recomendadas para tubos lisos. Para tubos de rugosidade média, a Eq. (A.9) de Colebrook-White é recomendada. Já para tubos rugosos, recomenda-se a Eq. (A.10) de Karmann-Prandtl.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (\text{A.7})$$

$$f = \frac{0,316}{\text{Re}^{0,25}}; \text{Re} \leq 10^5 \quad (\text{A.8})$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{e/D}{3,7} + \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (\text{A.9})$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{e/D}{3,7} \right) \quad (\text{A.10})$$

A avaliação de perdas de carga menores (h_m) em curvas, mudanças súbitas de área, entradas e saídas, válvulas e outros acessórios pode em geral ser modelada a partir da Eq. (A.5) segundo a Eq. (A.11), com a determinação de um coeficiente experimental de perda (K) a ser determinado para cada situação. Uma abordagem alternativa é a partir da determinação experimental para cada acessório de um comprimento equivalente de tubo reto (L_e), com utilização na Eq. (A.12).

$$h_m = K \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (\text{A.11})$$

$$h_m = f \frac{L_e}{D_H} \frac{\bar{V}^2}{2} \quad (\text{A.12})$$

Para tubulações com inclinação, seja θ o ângulo de inclinação de uma tubulação, a perda de carga na direção do escoamento pode ser calculada pela correlação de Beggs e Brill (1973), dada pela Eq. (A.13).

$$\frac{dp}{dx} = -f \frac{\rho}{D_H} \frac{\bar{V}^2}{2} - \rho g \sin(\theta) - \rho \bar{V} \frac{dV}{dx} \quad (\text{A.13})$$

APÊNDICE B – EXPRESSÃO DE INCERTEZAS EXPERIMENTAIS

Segundo Bland e Altman (1996), variância amostral (s^2) e desvio padrão amostral (s) são medidas da dispersão estatística, i.e., mostram o quanto uma amostra de dados varia em relação à média. Um indicador baixo para desvio padrão significa que os dados tendem a estar próximos da média, enquanto um desvio padrão alto indica que os dados se espalham por uma ampla gama de valores.

O desvio padrão é um número não negativo e possui a mesma unidade do mensurando. A forma tradicional de cálculo (para a variável X) da variância e do desvio padrão de amostras é dada pelas Eq.(B.1) e Eq. (B.2). Vale ressaltar que, embora as fórmulas tenham sido apresentadas para X , são aplicáveis a qualquer variável.

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (\text{B.1})$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (\text{B.2})$$

Walker (1940) desenvolve o conceito matemático de graus de liberdade ($G.L.$) para a estatística amostral como sendo o número de pontos menos o número de parâmetros ajustados e Christensen (2002) apresenta estes conceitos incorporados à regressão linear. Utilizando o conceito de graus de liberdade como modificação nas fórmulas tradicionais de variância e desvio padrão, pode-se obter a variância dos coeficientes da regressão linear da curva de caracterização estática, Eq. (B.3), Eq. (B.4) e Eq. (B.5).

$$s_{\hat{\beta}}^2 = \frac{s^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{X}_i^2) - n(\bar{X})^2} \quad (\text{B.3})$$

$$s_{\hat{\alpha}}^2 = s_{\hat{\beta}}^2 \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{X}_i^2) \right] \quad (\text{B.4})$$

$$s^2 = \frac{1}{G.L.} \sum_{i=1}^n \left[\hat{Y}_i - (\hat{\alpha} + \hat{\beta} \hat{X}_i) \right]^2; G.L. = n - 2 \quad (\text{B.5})$$

A incerteza de medição é um valor associado ao resultado da medição que descreve uma faixa na qual é esperado conter o valor verdadeiro da medida, com um determinado nível de confiança. A incerteza é um parâmetro que retrata a qualidade de uma medida de forma quantitativa (ABNT e INMETRO, 2003).

Segundo (Estatcamp, 2010) existem muitas fontes possíveis para incerteza em uma medição, dentre as quais lista-se as mais comuns:

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

A norma ISO GUM (2008) propõe a divisão dos componentes de incerteza em dois tipos, denominados "A" e "B". Estas categorias se referem ao método de avaliação da incerteza. O propósito da classificação Tipo A e Tipo B é de indicar as duas maneiras diferentes de avaliar os componentes da incerteza. A classificação não se propõe a indicar que haja qualquer diferença na natureza dos componentes.

- Incerteza do Tipo A: obtida a partir de um conjunto de amostra utilizando métodos estimadores amostrais.
- Incerteza do Tipo B: obtida por qualquer outro meio (e.g. especificação do fabricante, informação de certificados de calibração, aproximação conservadora baseada em experiência prévia com instrumento similar ou por meio de modelo matemático formal do processo de medição).

Ambos os tipos de avaliação são baseados em distribuições de probabilidade e os componentes de incerteza resultantes de cada tipo são quantificados por variâncias ou desvios padrão.

As incertezas de medição estão associadas aos erros sistemáticos e aleatórios. Para se lidar com erros sistemáticos pode-se revisar o aparato experimental e a teoria e, uma vez que este tipo de erro afeta todos os dados de uma mesma maneira, uma mesma correção para toda a amostra é suficiente. Por outro lado, para se lidar com erros aleatórios pode-se apenas controlar o ambiente (e.g. pressão, umidade, temperatura, horário e fontes de energia) e utilizar técnicas de controle estatístico (ESTERMANN, 1959).

CIPM (1981) traz os conceitos de incerteza padrão (u) e incerteza expandida (U). A incerteza padrão diz respeito à definição estatística de função densidade de probabilidade de uma distribuição de frequência e é o desvio padrão estimado. A incerteza expandida é a multiplicação da incerteza padrão por um fator de abrangência, cuja forma de obtenção será explicada na sequência do texto.

A finalidade do conceito de incerteza expandida é fornecer um intervalo em torno do resultado de uma medição com o qual se espera abranger uma grande fração da distribuição de valores que poderiam razoavelmente ser atribuídos à grandeza.

Na calibração estática dos instrumentos, o tratamento das incertezas experimentais atreladas aos erros sistemáticos se dá na realização dos ensaios, quando deve-se:

- Reconhecer as grandezas de entrada interferentes e modificantes.
- Decidir quais não podem ser ignoradas na aplicação específica do instrumento a ser calibrado.
- Preparar o procedimento de medição e obtenção dos pares ($X; Y$) de forma a garantir que estas grandezas se mantenham constantes ao longo de todo o tempo de coleta de dados.

Em resumo, deve-se garantir que os valores de entrada e saída se mantenham em condição de equilíbrio e que as grandezas de influência estejam submetidas a rigoroso controle estatístico, segundo as Eq. (B.6) e Eq. (B.7).

$$\frac{d \sum x_{\text{interferentes}}}{dt} \approx 0 \quad (\text{B.6})$$

$$\frac{d \sum x_{\text{modificantes}}}{dt} \approx 0 \quad (\text{B.7})$$

Já o tratamento das incertezas experimentais atreladas aos erros aleatórios se dá a partir dos pontos obtidos como resultado dos ensaios. Uma vez que na calibração estática dos instrumentos são colhidas amostras de dados a partir dos ensaios, a incerteza padrão é classificada como Tipo A.

Assim, o tratamento se dá a partir da regressão linear e da expressão para a variância dos erros do ajuste da reta de calibração. Evidenciando o erro aleatório na Eq. (2.19) da regressão linear, resulta a Eq. (B.8). Evidenciando o desvio padrão a partir da Eq. (B.5) da variância dos resíduos, resulta a Eq. (B.9).

$$\hat{\epsilon}_i = \hat{Y}_i - (\hat{\alpha} + \hat{\beta} \hat{X}_i) \quad (\text{B.8})$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{G.L.} \sum_{i=1}^n [\hat{\epsilon}_i]^2} = \sqrt{\frac{1}{G.L.} \sum_{i=1}^n [\hat{Y}_i - (\hat{\alpha} + \hat{\beta} \hat{X}_i)]^2}; G.L. = n - 2 \quad (\text{B.9})$$

Utilizando o conceito de desvio padrão para os resíduos e para os coeficientes $\hat{\alpha}$ e $\hat{\beta}$ é possível estimar a incerteza padrão associada à indicação do instrumento (u_Y), Eq. (B.10), e a incerteza padrão para a estimativa do mensurando (u_X), Eq. (B.11), conforme desenvolvido em Christensen (2002).

$$u_Y = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (\text{B.10})$$

$$u_X = \sqrt{\left[\left[\frac{1}{\hat{\beta}} u_Y \right]^2 + \left[\frac{-1}{\hat{\beta}} s_{\hat{\alpha}} \right]^2 + \left[\frac{\hat{\alpha} - \hat{Y}}{\hat{\beta}^2} s_{\hat{\beta}} \right]^2 \right)} \quad (\text{B.11})$$

A incerteza expandida de medição (U_Y) é dada pela incerteza padrão multiplicada por um fator de abrangência (k), conforme a Eq. (B.12). O fator de abrangência é selecionado com base no nível de confiança requerido para o intervalo de medição.

$$U_Y = k u_Y \quad (\text{B.12})$$

A Namas (NIS 3003 , 1995) recomenda que o fator k seja igual a 2 para calcular a incerteza expandida. Este valor corresponde a aproximadamente 95% de confiança. Entretanto, segundo ISO GUM (2008) se o número de repetições na coleta das amostras do ensaio for pequeno, existe uma possibilidade de que a distribuição de probabilidade normal não seja adequada. Neste caso, o fator $k=2$ garante um nível de confiança menor que 95% e seu valor deve ser obtido, para o grau de confiança desejada, utilizando a distribuição t -Student. Grande parte dos livros estatísticos possuem tabelas da distribuição t -Student para diversos graus de liberdade (VENABLES e RIPLEY, 2002).

A Eq. (B.13) mostra como deve ser expresso o resultado de uma medição, com a indicação da estimativa do valor provável mais ou menos a incerteza expandida de medição.

$$Y = \hat{Y} \pm U_Y \quad (\text{B.13})$$

APÊNDICE C – CONCEPÇÕES PRELIMINARES

Na fase de ideação do aparato experimental proposto, ocorreram variadas mudanças de concepção, no sentido de aumentar o alcance de estudo, simplificar montagens e melhor adequar a geometria da seção de teste à situação problema específica.

Inicialmente, por exemplo, foram concebidos projetos em que havia dispositivos para inserção de particulado, reservatório com pressurização, dimensionamentos e posicionamentos complicados, necessidade da utilização de um Venturi, tubulações voltadas apenas para inserção de partículas, precauções acerca da umidade desta tubulação devido à possibilidade de adsorção das partículas na parede. Alguns componentes que estavam previstos para serem projetados possuem similares comerciais.

O amadurecimento das tomadas de decisão relativas aos requisitos de projeto levaram a várias concepções preliminares para o circuito do aparato experimental. A Figura C.1 retrata a última definição de circuito concebido antes do que veio a ser o formato final. A Figura C.2 e a Figura C.3 representam o projeto deste circuito modelado em 3D e a Figura C.4 traz detalhes desta modelagem.

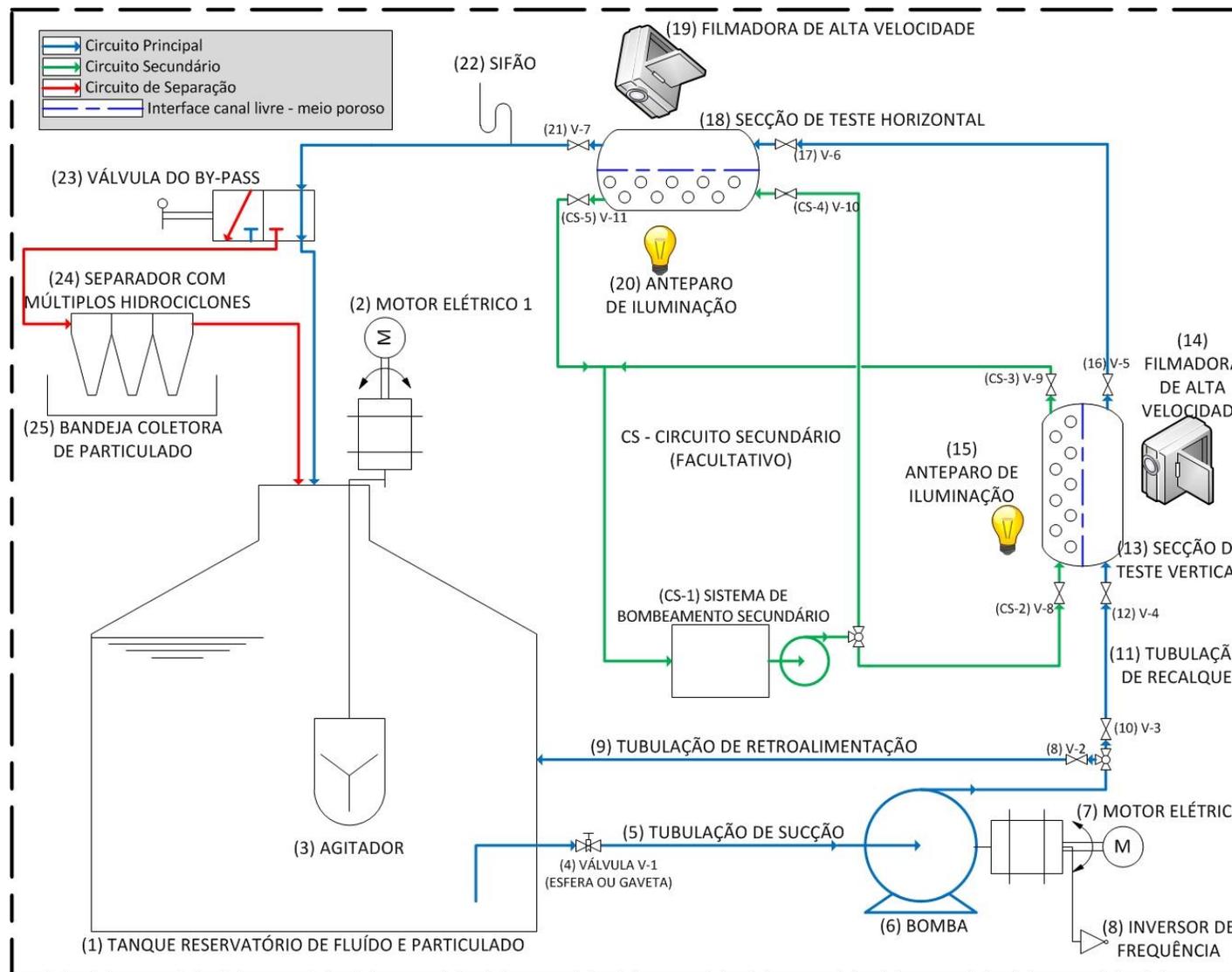


Figura C.1. Representação do circuito e dos componentes de concepção preliminar do projeto do aparato experimental. Desenho feito por meio do programa Microsoft VISIO 2013.

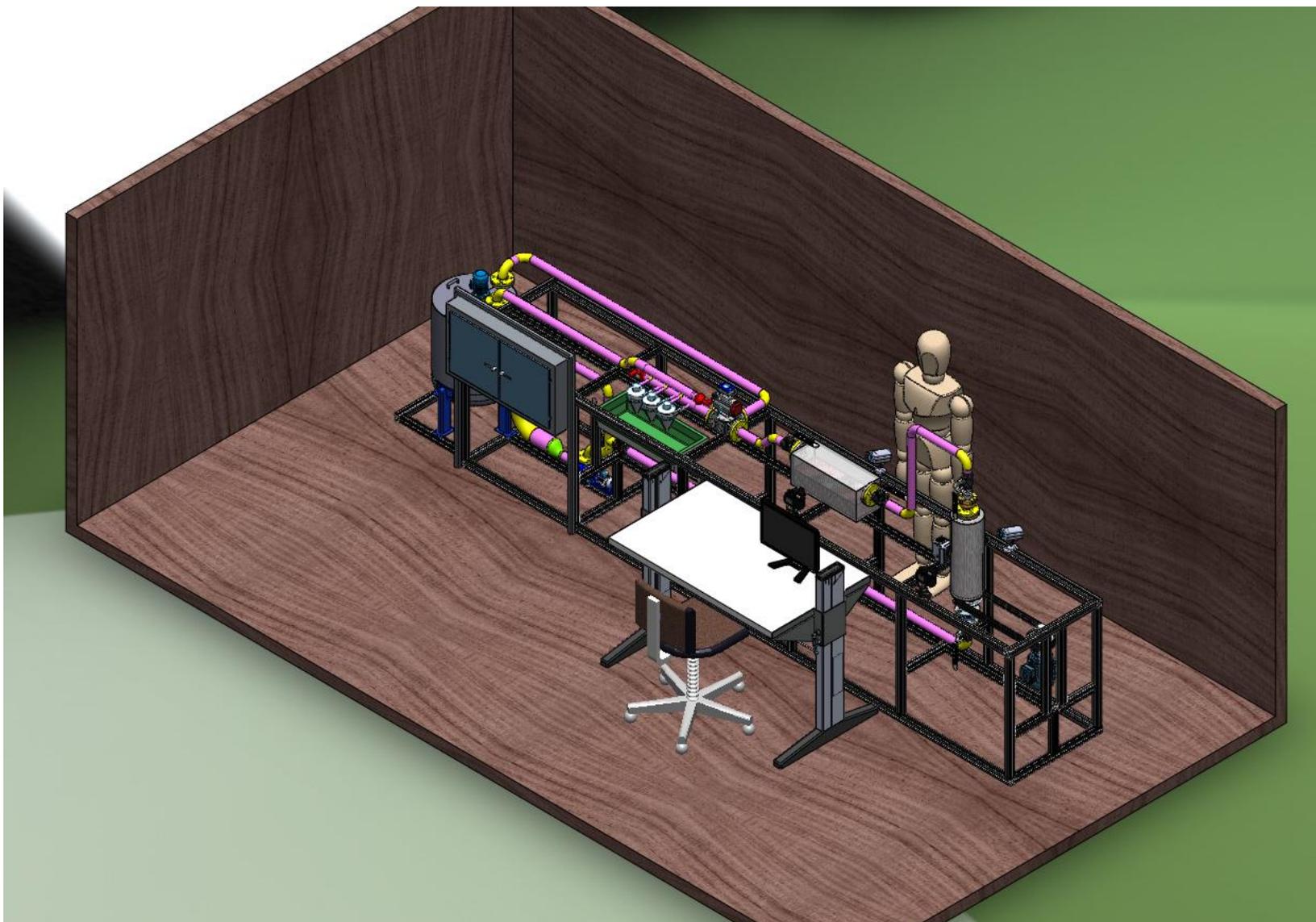


Figura C.2. Vista isométrica da modelagem tridimensional de concepção preliminar do aparato experimental.

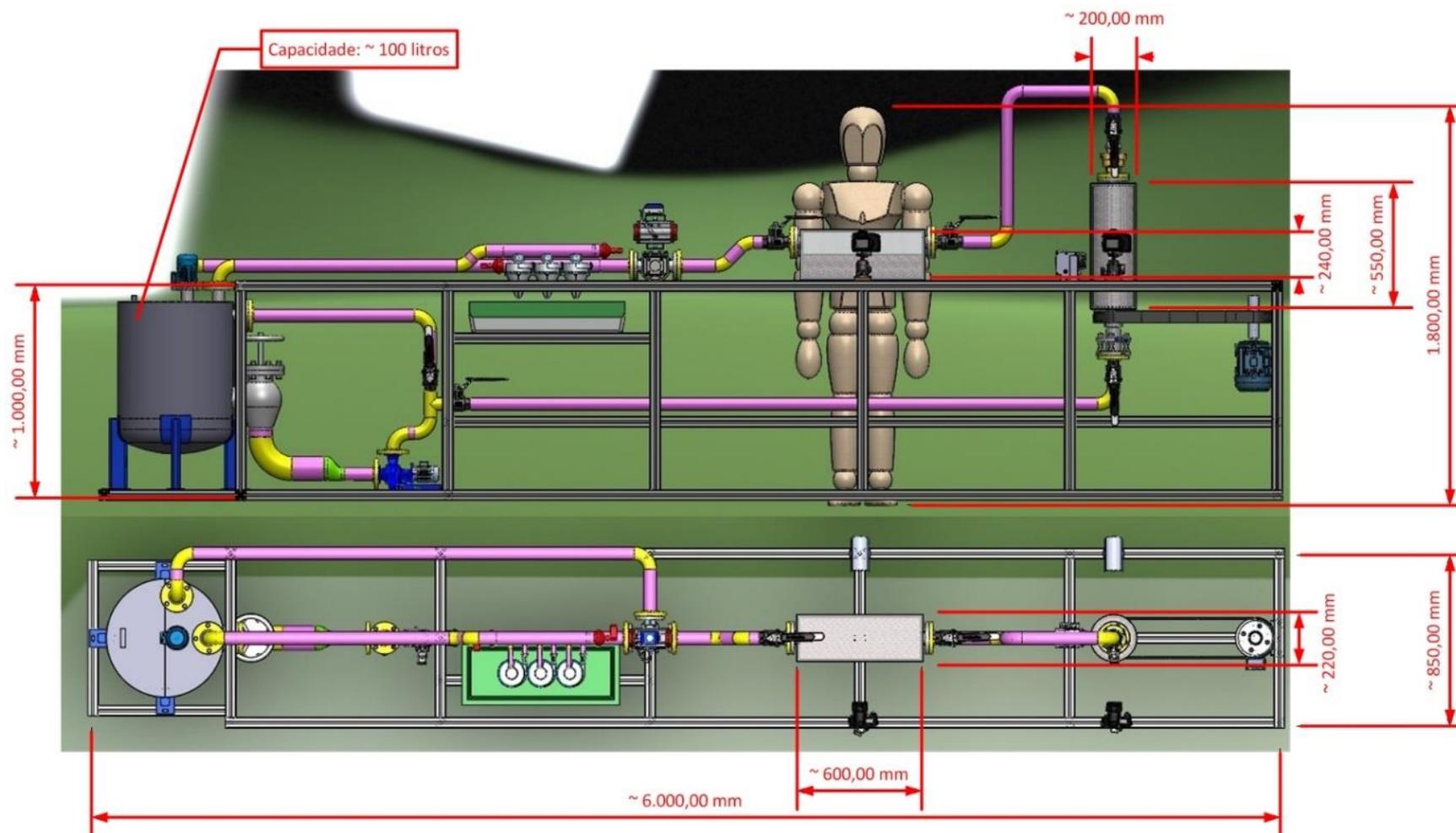


Figura C.3. Modelagem tridimensional de concepção preliminar do aparato experimental.

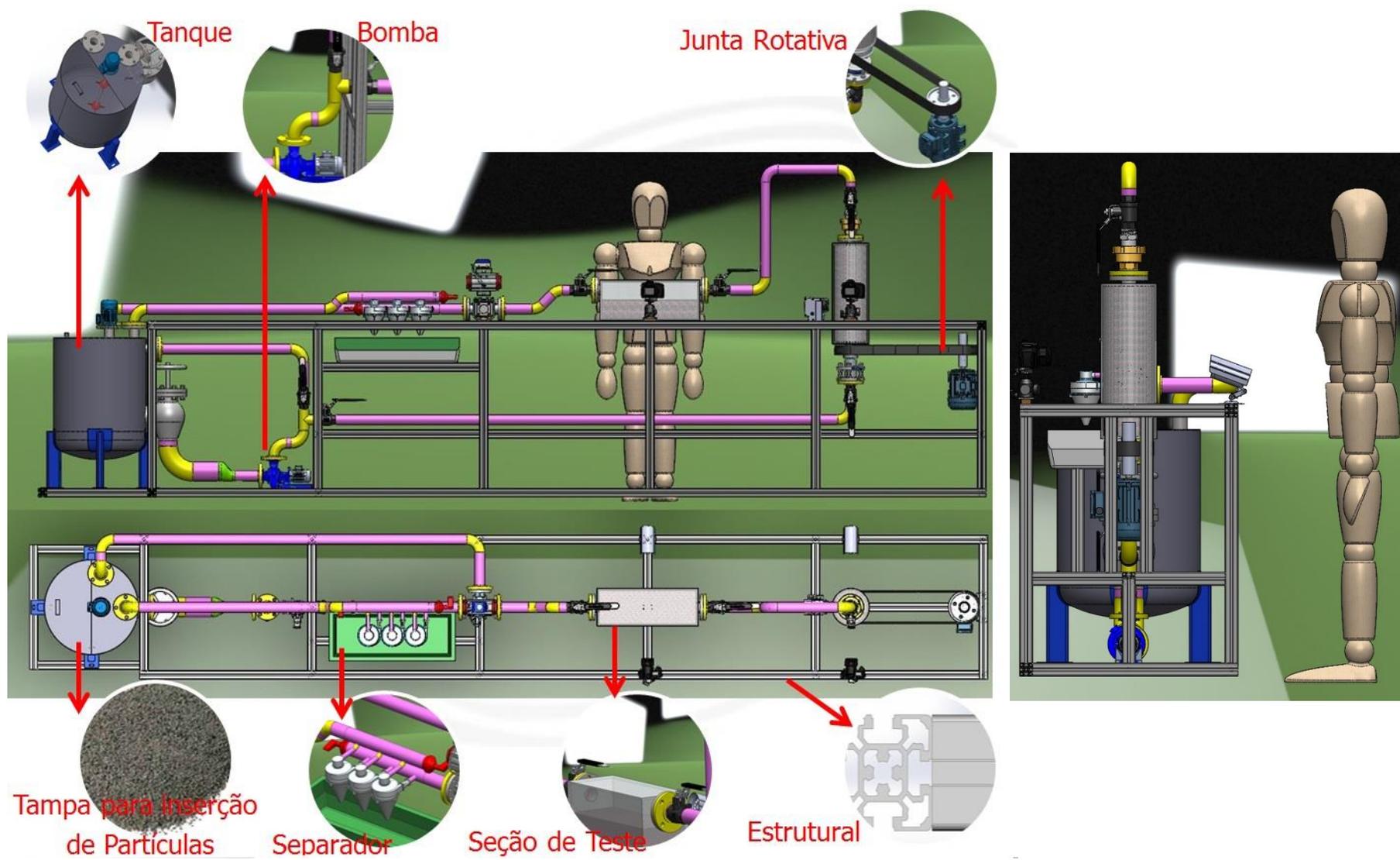


Figura C.4. Detalhes da modelagem tridimensional de concepção preliminar do aparato experimental.