



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO TUCURUÍ  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**DESENVOLVIMENTO DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS REFERENTE  
A MECÂNICA DOS FLUIDOS ATRAVÉS DE BANCADAS DIDÁTICAS**

**MURILO MOREIRA SILVA**

**Tucuruí – PA  
2022**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO TUCURUÍ  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**DESENVOLVIMENTO DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS REFERENTE  
A MECÂNICA DOS FLUIDOS ATRAVÉS DE BANCADAS DIDÁTICAS**

**MURILO MOREIRA SILVA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica do Campus de Tucuruí, como parte dos requisitos para obtenção do título Bacharel em Engenheiro Mecânico.

**Orientador:**

**Profº Msc. ° Maciel da Costa Furtado**

**Tucuruí – PA  
2022**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO TUCURUÍ  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**DESENVOLVIMENTO DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS REFERENTE  
A MECÂNICA DOS FLUIDOS ATRAVÉS DE BANCADAS DIDÁTICAS**

**MURILO MOREIRA SILVA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica do Campus de Tucuruí, como parte dos requisitos para obtenção do título Bacharel em Engenheiro Mecânico.

**BANCA EXAMINADORA**

*(Assinado digitalmente em 11/07/2022 11:11)*

**MACIEL DA COSTA FURTADO**

*PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR*

*CTUCU (11.16)*

*Matricula: ###033#8*

***Orientador***

*(Assinado digitalmente em 11/07/2022 11:15)*

**FRANCISCO JARMESON SILVA**

**BANDEIRA**

*PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR*

*CTUCU (11.16)*

*Matricula: ###702#9*

***Membro Interno***

*(Assinado digitalmente em 11/07/2022 11:35)*

**RONALDO RAPOSO DE MOURA**

*PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR*

*CTUCU (11.16)*

*Matricula: ###455#5*

***Membro Interno***

**Conceito: Bom  
Tucuruí, 07 julho de 2022**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecer a minha família, professores e amigos. Que cada um do seu jeito contribui e deixou uma marca em mim. Sendo relevante agradecer principalmente aos meus pais e amigos mais próximos que me incentivaram e me ajudaram diversas vezes nos momentos difíceis, me fortalecendo e dando força para continuar minha caminhada. De maneira especial, agradecer também ao professor Maciel que contribuiu de maneira significativa com minha formação acadêmica, ao longo do curso e aceitou a missão de me conduzir à conclusão desse trabalho acadêmico. Agradecer (in memoriam) ao meu bom amigo João Everaldo, o inesquecível Coquinho, que não está mais entre nós, mas sei que onde quer que esteja está torcendo por nós da mesma maneira que torcíamos por ele.

## **DESENVOLVIMENTO DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS REFERENTE A MECÂNICA DOS FLUIDOS ATRAVÉS DE BANCADAS DIDÁTICAS**

### **RESUMO**

No presente trabalho será abordado a teoria, o funcionamento, a descrição e a utilidade de quatro bancadas de ensino, presentes nos Laboratórios de Mecânica dos Fluidos e Turbomáquinas da Universidade Federal do Pará (UFPA), Campus Universitário de Tucuruí (CAMTUC) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM). Essas bancadas têm teor prático para o desenvolvimento dos estudos de algumas teorias da mecânica dos fluidos, de maneira a analisar o comportamento dos mesmos perante testes em viscosidade, hidrostática, escoamento de Poiseuille, escoamento de Bernoulli e o experimento de Reynolds. Desta maneira, todo o trabalho realizado apresenta caráter teórico e prático para análise de cada experimento. Tendo como foco, ressaltar a importância que a experimentação real tem para o aprendizado na engenharia, mais ainda quando se faz referência a mecânica dos fluidos, já que esta é uma disciplina que engloba diversas situações diferentes, que dependem de uma variedade de parâmetros, tais como, diâmetro de tubo, viscosidade, regime de escoamento, geometria, rugosidade e etc, que podem influenciar o comportamento do fluido em aplicações prática de engenharia, como por exemplo, em tubulações industriais, superfícies submersas e dentre outros. Uma das principais relevâncias ao estudar as presentes bancadas, é mostrar de forma prática como a alteração nas variáveis das bancadas podem influenciar nos fenômenos observáveis para um experimento muito semelhante. Além de que o trabalho busca expressar, alguns motivos que fazem com que seja necessário ter o conhecimento sobre a geometria de alguns elementos essenciais na mecânica dos fluidos, de forma a conhecer melhor as fórmulas e análises referentes as tubulações, manômetros, bombas e reservatórios, com cálculos de volume, análises trigonométricas e medições de diâmetros referentes a eles. Por fim, ressaltando algumas áreas de aplicação da mecânica dos fluidos na engenharia e situações proporcionadas por ela.

**Palavras-chave:** Mecânica dos fluidos, Bancadas experimentais, Reynolds, Bernoulli, Poiseuille, Hidrostática.

## **DEVELOPMENT OF EXPERIMENTAL TESTS REGARDING FLUID MECHANICS THROUGH TEACHING BENCHES**

### **ABSTRACT**

The present work approaches the theory, functioning, description and utility of four didactic benches, from Fluid Mechanics and Turbomachinery Labs of the Federal University of Pará (UFPA) at Tucuruí University Campus (CAMTUC), Faculty of Engineering Mechanics (FEM). These benches have practical use for the development of studies about some basic theories on fluid mechanics, to analyze the behavior of a given fluid doing tests about: viscosity, hydrostatics, Poiseuille flow, Bernoulli flow and Reynolds experiment. In this way, all the work carried out has a theoretical and practical character to analyze each experiment. Focusing on highlighting the importance that real experimentation has for engineering learning. Even more so when referring to fluid mechanics, since this is a discipline that encompasses a very wide range of different situations, which depend on a variety of parameters, such as pipe diameter, viscosity, flow regime, geometry, roughness, etc. Parameters which can influence the fluid behavior in practical engineering applications, such as industrial pipes, submerged surfaces and others. One of the relevant points when studying the present benches is to show in a practical way how the change in bench variables can influence on the phenomena observed even if it is a very similar experiment. The present work also seeks to express some reasons that makes important to study the geometry of some essential elements in fluid mechanics, in order to better understand the formulas and analyzes related to pipes, pressure gauges, pumps and reservoirs, with volume calculations, trigonometric analysis and diameter measurements related to them. Finally, we also endorse some areas of application of fluid mechanics in engineering and situations provided by it.

**Keywords:** Fluid mechanics, Experimental benches, Reynolds, Bernoulli, Poiseuille, Hydrostatics

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Experimento de Reynolds.....	19
Figura 2. Linhas de velocidades dos escoamentos.....	20
Figura 3. Bancada de Reynolds.....	27
Figura 4. Tubos de borracha com 1,6 e 2,2 cm da bancada de Reynolds.....	28
Figura 5. Medidor de vazão de Reynolds.....	28
Figura 6. Volume do reservatório de medição de vazão.....	29
Figura 7. Reservatórios de adição de fluido e corante da bancada de Reynolds.....	30
Figura 8. Tubos de 1,6 cm e 2,2 cm da bancada de Reynolds.....	31
Figura 9. Ensaio 1 (Reynolds).....	31
Figura 10. Ensaio 2 (Reynolds).....	32
Figura 11. Ensaio 3 (Reynolds).....	32
Figura 12. Bancada de Poiseulle.....	33
Figura 13. Tubos de transporte para Poiseuille (1) 3 mm, (2) 5 mm e (3) 7 mm.....	34
Figura 14. Reservatório de medição de vazão de Poiseuille.....	34
Figura 15. Válvulas de abertura para Poiseuille.....	35
Figura 16. Haste móvel de Poiseuille.....	36
Figura 17. Tabela escalonada de Poiseuille.....	36
Figura 18. Bancada de hidrostática.....	38
Figura 19. Manômetro em U.....	39
Figura 20. Manômetro inclinado.....	40
Figura 21. Manômetro inclinado aberto.....	41
Figura 22. Dimensões de um manômetro inclinado.....	41
Figura 23. Bancada de Bernoulli.....	43
Figura 24. Tubo de Venturi.....	43
Figura 25. Tubos Piezômetros.....	44
Figura 26. Reservatório intermediário de Bernoulli.....	44
Figura 27. Medidor de vazão.....	45
Figura 28. Gráfico de comparação entre os escoamentos dos dois tubos.....	48
Figura. 29 Gráfico de comparação entre perda de carga x vazão de Poiseuille.....	50
Figura 30. Manômetro em U com medição de 52 mm.....	52
Figura 31. Manômetro inclinado (2) .....	52
Figura 32. Gráfico pressão x altura da coluna de liquido.....	55
Figura 33. Gráfico velocidade x altura da coluna de liquido.....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resultados obtidos dos testes da altura da coluna de liquido do tubo de 1,6 cm.....	46
Tabela 2. Resultados obtidos dos testes da altura da coluna de liquido do tubo de 2,2 cm.....	47
Tabela 3. Resultados obtidos de volume médio e vazão média para o ensaio 1.....	47
Tabela 4. Resultados obtidos de volume médio e vazão média para o ensaio 2.....	48
Tabela 5. Resultados obtidos de volume médio e vazão média para o ensaio 3.....	48
Tabela 6. Resultados obtidos de perda de carga, tempo e vazão. Para ambos os ensaios do primeiro teste de Poiseuille.....	50
Tabela 7. Resultados finais do primeiro teste - Ensaio 1 de Poiseuille.....	51
Tabela 8. Resultados finais do primeiro teste - Ensaio 2 de Poiseuille.....	51
Tabela 9. Segundo teste de Poiseuille para o tubo de 5 mm.....	52
Tabela 10. Segundo teste de Poiseuille para o tubo de 7 mm.....	53
Tabela 11. dados obtidos do teste realizado na bancada de Bernoulli.....	54

## LISTA DE SIMBOLOS

Re – Numero de Reynold

$\rho$  – Massa especifica da água

$\mu$  - Viscosidade dinâmica da água

v – Velocidade do escoamento

V – Volume obtido do escoamento

Q – Vazão

g – Gravidade

A – Area

r- Raio

D – Diâmetro maior

d – Diâmetro menor

$\pi$  – Constante matemática Pi

$\gamma$  – Peso especifico da água

$h_y$  – Coeficiente de perda de carga

f- Fator de atrito

$\Delta P$ - Variação de pressão em dois pontos

P – Pressão

h – Altura da coluna de liquido

m – Metros

s – Segundos

Pa – Pascal

KPa – Quilo-Pascal

Kg – Quilograma

L – Comprimento do encanamento que ocorreu o escoamento de Poiseuille

$\Delta T$ - Variação de tempo

Z – Altura padronizada da equação de Bernoulli

\* ou .- Multiplicação

/ - Divisão

DESV. PAD. – Desvio padrão

INT. CONF. – Intervalo de confiança

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação (1) Numero de Reynolds.....	21
Equação (2) Equação de Poiseuille.....	22
Equação (3) Equação da vazão de Poiseuille.....	23
Equação (4) Equação da perda de carga.....	23
Equação (5) Equação do fator de atrito.....	23
Equação (6) Teorema de Stevin.....	24
Equação (7) Equação de Bernoulli.....	24
Equação (8) Equação do volume do cilindro.....	25
Equação (9) Equação para o cálculo de vazão.....	25
Equação (10) Equação para a velocidade pela lei da continuidade.....	26
Equação (11) Equação para determinar a velocidade do fluido em cada ponto do tubo de Venturi.....	26
Equação (12) Equação para determinar a pressão estatica na bancada de Bernoulli.....	26
Equação (13) Equação de solução do manômetro em U.....	39
Equação (14) Teorema de Pitágoras aplicado no manômetro inclinado para se determinar h2.....	41
Equação (15) Equação de semelhança para determinar h1.....	42
Equação (16) Equação de solução para o manômetro inclinado.....	42
Equação (17) Equação de sensibilidade.....	42

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
1.1 OBJETIVOS.....	13
<b>1.1.1 Objetivo geral.....</b>	<b>14</b>
<b>1.1.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>14</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEORICA.....</b>	<b>15</b>
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEORICA.....</b>	<b>19</b>
3.1 EXPERIMENTO DE REYNOLDS.....	19
3.2 LEI DE POISUEILLE.....	21
3.3 EQUAÇÃO ESTÁTICA PARA FLUIDOS.....	23
3.4 EQUAÇÃO DE BERNOULLI.....	24
3.5 EQUAÇÕES DE APOIO PARA ANÁLISE DE VOLUME, VAZÃO, VELOCIDADE E PRESSÃO.....	25
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>27</b>
4.1 BANCADA DE REYNOLDS.....	27
<b>4.1.1 Ensaio de Reynolds.....</b>	<b>30</b>
4.2 BANCADA DE POISEULLE.....	32
<b>4.2.1 Ensaio de Poiseuille.....</b>	<b>34</b>
4.3 BANCADA DE HIDROSTÁTICA.....	37
<b>4.3.1 Ensaio da bancada de hidrostática.....</b>	<b>38</b>
4.4 BANCADA DE BERNOULLI.....	42
<b>4.4.1 Ensaio de Bernoulli.....</b>	<b>45</b>
<b>5 RESULTADOS.....</b>	<b>46</b>
5.1 BANCADA DE REYNOLDS.....	46
5.2 BANCADA DE POISUEILLE.....	49
<b>5.2.1 Primeiro teste.....</b>	<b>49</b>
<b>5.2.2 Segundo teste.....</b>	<b>51</b>
5.3 BANCADA DE HIDROSTATICA.....	52
5.4 BANCADA DE BERNOULLI.....	54
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>57</b>
<b>REFÊRENCIAS.....</b>	<b>58</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Se define Mecânica dos Fluidos, segundo Hibeller (2016) como uma ciência que estuda o comportamento dos fluidos que estão em repouso ou em movimento, ciência esta, baseada: nas leis de movimento de Newton, na condição de conservação de massa, na primeira e segunda lei da termodinâmica e nas leis relacionadas as propriedades físicas de um fluido. É válido ressaltar, que a mecânica dos fluidos está dividida em três: o primeiro conhecido como hidrostática, que atua sobre fluidos em repouso; o segundo chamado de cinemática dos fluidos, que estuda a geometria de movimento dos fluidos; e em terceiro a dinâmica dos fluidos que considera forças e acelerações em cima dos mesmos.

Segundo Hibeller (2016), a mecânica dos fluidos é muito importante para o mundo ao qual fazemos parte, e para o qual desejamos evoluir, pois ela é uma das principais gamas de conhecimentos para engenharia. A mecânica dos fluidos pode ser empregada nas mais diversas áreas da ciência tecnológica, como na área da aeronáutica, do aeroespacial, da estruturação civil e do desenvolvimento mecânico. Ainda segundo o autor, ela é também usada, para o desenvolvimento da aviação e de propulsores, para o designer de canais de drenagem, redes de distribuição de água, sistemas de esgoto e barragens, além de também ser útil para os projetos de bombas, compressores, turbinas, sistemas de controle de processo, dispositivos de aquecimento solar e muitos outros equipamentos que trabalham com água, ar ou outros fluidos qualquer.

Sabendo da importância da mecânica dos fluidos e de inúmeras situações que ela pode ser empregada, a sua apresentação para os discentes dos cursos de engenharia, é imprescindível e essencial para a formação dos mesmos. Então, a existência de várias disciplinas teóricas que possibilitem o melhor entendimento dos tópicos supracitados, são muito importantes. Mas segundo White (2018), “A essência do estudo do escoamento dos fluidos é um compromisso criterioso entre a teoria e a experimentação.” Nesse sentido, o autor destaca que além da teoria, ou seja, de saber como cada processo acontece, também é importante a prática, ver o processo acontecendo. Assim, a relevância do presente estudo, no que tange a utilização das bancadas através de algumas experimentações realizadas, como base para a realização desse trabalho científico, bem como a apresentação de sua chegada a universidade e o principal objetivo de sua solicitação.

Até 2019 a UFPA CAMTUC não disponibilizava em seu acervo, de um laboratório especializado em mecânica dos fluidos, podendo comprometer a formação parcial de seus

acadêmicos, já que os mesmos não podiam ver na prática como um fluido exerce seu escoamento e como alterações pontuais podem fazer alterações do prosseguir de seu caminho. Foi então que em 2020, a Universidade Federal do Pará, Campus de Tucuruí propôs o projeto LABMECFLU, projeto que objetivava gerar um desenvolvimento acerca da mecânica dos fluidos no campus, sendo possível obtenção e aquisição de um canal de água dimensionado e de 4 bancadas de ensino de fluidos para o Laboratórios de Mecânica. Bancadas estas advindas de uma colaboração entre a Faculdade de Engenharia Mecânica-FEM com a associação TECNOLAGO, que juntas obtiveram adoção dessas bancadas pela Mundo Digital Interativo (MDI). Essas bancadas tem como objetivo principal, a cooperação técnica para desenvolvimento de aulas práticas experimentais, na área de mecânica dos fluidos dentro do laboratório com os acadêmicos, com o intuito de aprimorar seu conhecimento a respeito do assunto.

Para tanto, tornou-se necessário o desenvolvimento de um estudo com acervo, de como manusear as bancadas de ensino, uma vez que estas chegaram sem seus respectivos manuais de instrução. Para isso, precisou-se de vários conhecimentos teóricos a respeito da mecânica dos fluidos, e de como funcionam variáveis importantes para física, tais como: o tempo, a velocidade, a vazão, a viscosidade, a densidade e algumas outras propriedades específicas dos fluidos descritas em obras de engenharia, tais como: Fox et al (2014), Hibbler (2016), F. White (2018) e Brunnet (2008). Obras estas que serão usadas como referências teóricas para análise do presente documento.

No que diz respeito as bancadas que constam na presente pesquisa, trataremos de quatro, cujas as mesmas são: Bancada de Hidrostática, Escoamento de Poiseuille; Experimento de Bernoulli; e Experimento de Reynolds. Todas utilizando como fluido a água com corante, em ambiente com temperatura e pressão natural.

## 1.1 OBJETIVOS

O presente tópico busca apresentar o motivo cujo o qual foi feito esse trabalho, de maneira a explicar de forma conclusiva os objetivos por trás dos estudos nas 4 bancadas didáticas referentes a mecânica dos fluidos.

### **1.1.1 Objetivo geral**

Utilizar das bancadas didáticas para a aplicação dos estudos teóricos realizados durante as disciplinas da mecânica de fluidos, ofertadas no curso de engenharia mecânica do campus de Tucuruí, promovendo um plano de ensino sobre a utilização das bancadas.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Aplicação prática da medição de componentes, e ensaios físicos;
- Estudo prático da estática dos fluidos;
- Estudo prático dos tipos de regime de escoamentos encontrados em mecânica de fluidos;
- Estudo prático da dinâmica dos escoamentos fluidos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presença de bancadas práticas em qualquer assunto é de extrema importância para se aprender mais sobre algo, pois o conhecimento está sempre em evolução, e para a sociedade poder acompanhar essa evolução, inúmeros trabalhos são tecidos todos os anos para a elaboração de bancadas práticas para auxiliar os estudantes e as pessoas em qualquer que seja a área de aplicação.

Um dos exemplos de estudos para a evolução do aprendizado aliado ao desenvolvimento de bancadas de experimentação, é apresentado por Guimarães (2019), onde o autor teceu um trabalho que objetivava criar um roteiro para a experimentação prática no laboratório de fenômenos de transporte, mais especificamente tratando de ensaios do experimento de Reynolds, e de análises de perda de carga distribuída e localizada no circuito de uma bancada hidráulica.

Guimarães (2019), dava início a sua síntese explicando que o sistema hidráulico, é um dos circuitos mais importantes quando se trata de escala industrial, e que um estudante em contato direto com fluidos em escoamentos de grandes variações de pressão, aprendem uma vasta gama de conhecimento na sua área profissional, devido ao fato de se presenciar inúmeras situações diferentes, se adquirindo experiências diversas e tendo maior naturalidade em lidar com alterações inesperadas. O autor destaca ainda sob uma bancada que disponibiliza testes reais com diferentes materiais e pressões sob um fluido, proporcionando o estudo do seu comportamento diante de diversos acessórios e conexões, que geram perdas de carga agregadas ao seu movimento, criando inúmeras situações diferentes para se adquirir experiência. Desta forma serviria como acréscimo ao que os alunos aprendem na disciplina de Fenômenos de Transporte I do curso de engenharia de alimentos, trazendo assim a ideia de relevância as bancadas praticas. Pois além de auxiliar a compreender os temas passados em sala, também possibilita experienciar a vivencia sob situações que podem ser úteis em um determinado ponto da carreira profissional.

As bancadas didáticas são muito úteis para o âmbito acadêmico da mecânica dos fluidos, principalmente quando se diz respeito a engenharia, trazendo conhecimentos muito importantes para o desenvolvimento de concepções básicas da área, como ressaltado no trabalho de Nogara (2018), onde o autor formulou um trabalho do projeto de uma bancada didática experimental para determinar o número de Reynolds, Nogara (2018) pondera que conhecer essa variável é de extrema importância para todas as engenharias, tendo em vista que o escoamento de fluidos, como o ar e a água, estão presentes em muitos projetos corriqueiros de engenheiros, e que a

condição de determinar se um escoamento é turbulento ou laminar, permite que o engenheiro utilize a literatura correta para a melhor solução de cada caso. Um escoamento laminar contempla um comportamento muito diferente de um turbulento, isso possibilita que em um projeto onde há interação com escoamento de fluido, tenha os valores calculados mais próximos do valor real da aplicação, reduzindo assim a necessidade de superdimensionar os componentes do projeto, o que resulta em um projeto mais econômico e capaz de atender satisfatoriamente ao que se propõe.

Segundo Nogara (2018), os alunos podem ser divididos em dois grupos, os alunos ativos e alunos reflexivos, onde os alunos ativos são aqueles que aprendem de forma ativa, onde retêm mais informação ao praticar, discutir, ensinar ou testar de alguma forma o conteúdo estudado; em outras palavras, realizam uma ação com o conhecimento adquirido. Muito embora também, existem alunos reflexivos, que são aqueles que aprendem de forma reflexiva, que absorvem e entendem a informação introspectivamente. Segundo Nogara (2018) as aulas no curso de engenharia tendem a ser reflexivas, onde somente a teoria é enfatizada, mas em contra partida o autor em questão afirma que a maioria dos alunos da área de engenharia tendem a aprender melhor de forma ativa, precisando assim de uma forma prática para aplicar o conteúdo estudado, e assimilar de uma maneira mais eficiente o conteúdo visto, trazendo a tona a presença de bancadas e laboratórios didáticos, para se aprender ativamente sobre os conteúdos estudados em sala de aula.

Em se tratando de método de estudo, outra referência bibliográfica, sobre bancadas teóricas, corresponde a bancada do trabalho de Geske (2022). O autor abordou uma metodologia por trás da implementação e construção de uma bancada experimental desenvolvida para experimentos práticos na disciplina de Sistemas de Controle do curso de Engenharia de Controle e Automação. Destacando que a bancada consistiria em um sistema de controle de nível de dois tanques, sendo um deles de dinâmica não linear, a fim de demonstrar o efeito de atraso de transporte no controle de sistemas. A bancada desenvolvida iria apresentar um software funcional voltada para área de didática, uma vez que, Geske (2022) afirma e reforça a importância da experiência para o aprendizado do acadêmico. Nas indústrias a maioria dos serviços são manuais e práticos, e que mesmo a teoria sendo abordada em sala de aula, ainda existiria uma necessidade de vivenciar a experiência para se obter uma ideia real de como funcionaria realmente o projeto de controle de sistema. Assim, reiterava-se como uma bancada didática autônoma influenciaria positivamente na absorção do conteúdo.

Como visto, a experiência é importante para a maioria dos assuntos ligados a engenharia, e com a mecânica dos fluidos não é diferente. Conforme apresentado no trabalho de Emirick

(2019), onde o mesmo busca detalhar o projeto e a construção de uma bancada prática para o estudo da mecânica dos fluidos, mais especificamente na área de hidráulica e de hidrodinâmica em unidades de fluxo contínuo. O texto trata da importância que a aplicação das bancadas didáticas têm para a evolução mecânica, descrevendo como a hidrodinâmica de reatores é importante para área dentro da mecânica dos fluidos na qual utiliza técnicas analíticas, experimentais e numéricas para avaliação dos fenômenos hidráulicos e hidrodinâmicos de unidades de contato de fluxo contínuo, posteriormente, destaca que essas unidades estão presentes em diversos processos industriais, como em estações de tratamento de água e efluentes, na indústria petroquímica por meio dos separadores água-óleo, bacias de sedimentação e processos de desinfecção. Então, faz-se necessário destacar a importância das bancadas de experimentação, pois de acordo Emirick (2019), os projetos citados acima são do ramo industrial, e algumas vezes mostram um desempenho abaixo do esperado, apresentando uma eficiência abaixo do que se desejava, tanto por motivo de inviabilidade estrutural, quanto por motivos de altos custo relacionados a pesquisa de campo. Trazendo assim relevância para métodos de estudos sobre a esquematização de seu trabalho por uma maneira mais viável.

Em se tratando de viabilidade para uma empresa, na maioria dos casos o que conta é o custo benefício. Para Emirick (2019), uma maneira melhor de analisar o comportamento hidráulico dos projetos citados, é por meio do estudo dos projetos em modelos reduzidos empregados em bancadas experimentais. As bancadas experimentais irão simular os projetos, onde o fluido é mantido em escoamento e, com a inserção da substância traçadora, pode-se verificar como é o comportamento hidráulico e a eficiência do processo. Então, de maneira geral a bancada de experimentação é apresentada como um projeto industrial de pequeno porte, pois com a experimentação tem-se uma ideia mais límpida de como o projeto se dá, podendo-se assim ter uma visão mais objetiva a respeito da sua projeção em grande escala.

Outra pesquisa que colabora com o tema em questão, a respeito da importância das bancadas experimentais na disciplina de mecânica dos fluidos, é o documento aferido por Gonçalves (2021), onde o mesmo fez um estudo sob uma bancada de mecânica dos fluidos localizada no laboratório de ciências térmicas, com o objetivo de validar os resultados teóricos dados por análise, sendo iguais aos valores reais obtidos por experimento. A bancada de fluidos, trabalhada por Gonçalves (2021), apresenta equipamento de dedução da equação de Bernoulli sob um tubo de Venturi, medidores de pressão, válvulas volumétricas, tubos piezômetros, bombas hidráulicas, medidores de vazão volumétrica e muitos outros equipamentos para uma análise completa a respeito das mecânicas dos fluidos.

O autor fez a utilização das equações e métodos fornecidos, chegando a conclusão que os resultados desse experimento, foram satisfatórios em comparação com os do fabricante, sendo assim a bancada de mecânica dos fluídos do laboratório de ciências térmicas da Universidade Federal do Ceará está apta para o uso dos alunos e professores. Com base nos resultados obtidos, foi possível concluir que os resultados têm tendência a seguir os resultados do fabricante, chegando ao impasse que embora os testes experimentais não tem um grau tão alto de precisão quanto aos cálculos teóricos, devido a falhas humanas ou de projeto. Assim, os resultados obtidos tenderam aos resultados de projeto, provando a afirmativa feita por Gonçalves (2021), que as bancadas de mecânica dos fluídos tem como o principal objetivo aplicações de metodologias teóricas na prática. Na maioria das universidades, é vista muita teoria, porém nem sempre ela é o suficiente para que os alunos tenham um entendimento completo do assunto. Com isso, é necessário ter outras formas de ensino para que os alunos tenham um maior aproveitamento daquilo que ele está aprendendo.

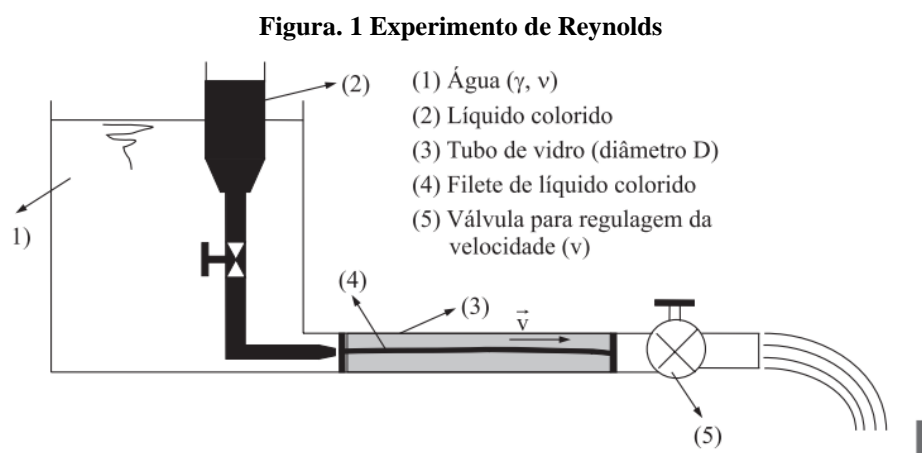
### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente tópico tem como função definir os estudos teóricos para a elaboração das quatro bancadas apresentadas nesse trabalho. Através de análises de alguns trabalhos teóricos cujos os quais apresentam a respeito dos criadores das teorias por trás de cada bancada, assim como suas motivações, equação e conclusões obtidas.

#### 3.1.1 Experimento de Reynolds

O experimento de Reynolds é a base de sustentação da bancada de Reynolds, que tem funcionamento a partir do parâmetro adimensional chamado Número de Reynolds, que segundo White (2018) é o principal parâmetro que correlaciona o comportamento viscoso de todos os fluidos newtonianos. Segundo Horácio e Braviano (2014), o número de Reynolds tem esse nome em homenagem Osborne Reynolds, físico e engenheiro mecânico, que realizou um experimento em 1883 que tinha o objetivo de observar o escoamento dos líquidos, enquanto fazia anotações e comparações a respeito de como sua velocidade variava na medida que se alterava a vazão, o diâmetro ou o próprio fluido nos seus experimentos.

O experimento de Reynolds segundo Brunetti (2008) podia ser exemplificado como mostrado na figura. 1, que consiste em um reservatório de água ligado a um tubo transparente, acoplado numa válvula manual, que permitia a variação da velocidade de descarga do fluido. No eixo do tubo havia outra injeção paralela acoplada a outro reservatório cheio, apenas de corante, onde o mesmo era injetado no escoamento durante o percurso do fluido principal. Esta ação era feita com o intuito do corante facilitar a observação do comportamento do escoamento, sendo desta forma mais visível suas linhas de velocidade.



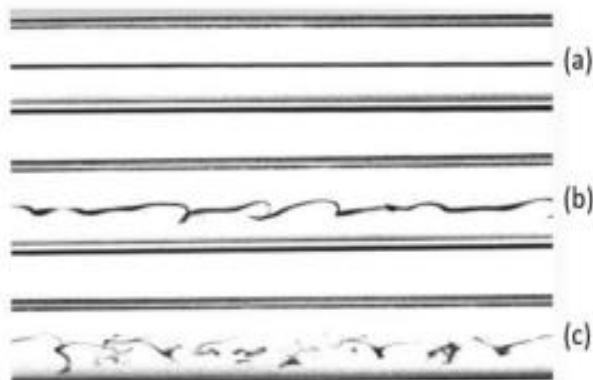
Fonte: Brunetti (2008)

No início do experimento, quando o fluido começou a escorrer, notou-se que ao abrir paulatinamente a válvula, em pequenas velocidades de descarga, formou-se lâminas retas e contínuas de fluido colorido na lateral do tubo transparente. Ao passo que, se abertura da válvula fosse maior, as lâminas apresentavam ondulações e finalmente desapareciam a uma pequena distância do ponto de injeção, se tornando uma mistura turbulenta sendo imperceptível suas linhas de velocidade.

Como visto na figura. 1 o fluido que foi utilizado no experimento foi a água, e o objetivo de Reynolds era de observar o comportamento que a mesma tinha durante seu escoamento. E com base nos seus ensaios, ele determinou dois tipos de comportamentos para os fluidos, o primeiro sendo o laminar, onde o mesmo, segundo Brunetti (2008) é aquele em que as partículas se deslocam em lâminas individualizadas, sem trocas de massa entre elas, ocorrendo em baixa velocidade e com baixa vazão sem transferência de massa no sentido transversal. E o segundo seria o denominado turbulento, sendo aquele em que as partículas apresentam um movimento aleatório macroscópico, isto é, as linhas de velocidade se colidem de forma transversal ao movimento geral do conjunto do fluido, que acontece em alta velocidade e com alta vazão. Além desses dois tipos de escoamento, um fluido pode exercer um terceiro regime, sendo esse dividido por características de ambos os escoamentos, comumente chamado de regime de transição.

A figura 2 mostra as linhas de velocidade figuradas pelo corante em um escoamento interno, em que a) A linha de velocidade para o escoamento laminar; b) A linha de velocidade para o escoamento em transição; c) A linha de velocidade para o escoamento turbulento.

**Figura. 2 linhas de velocidades dos escoamentos**



*Fonte: Brunetti (2008)*

Segundo White (2018), um engenheiro da área de fluidos, diante de um trabalho com um determinado escoamento, deve primeiramente estimar o intervalo do número de Reynolds do escoamento em estudo, pois este parâmetro vai indicar qual a melhor forma de trabalhar com ele, sendo que o Número de Reynolds muito baixo indica movimento laminar viscoso muito lento, no qual os efeitos da inércia são desprezíveis. Já Número de Reynolds moderados implica escoamento de transição com variação suave. Enquanto que Número de Reynolds alto, indica escoamento turbulento, que pode variar lentamente no tempo, mas impõe fortes flutuações randômicas de alta frequência. O parâmetro de Reynolds não pode ser definido como alto, baixo ou moderado, e sim calculado pela equação de Reynolds. Eq (1).

$$Re = \frac{\rho * V * D}{\mu} \quad (1)$$

Onde,  $Re$  é o número de Reynolds com um valor adimensional,  $\rho$  é a massa específica,  $V$  é a velocidade média do fluido,  $D$  é o Diâmetro do tubo que está ocorrendo o escoamento,  $\mu$  é a velocidade dinâmica.

Sendo que a partir da Eq. (1) podemos determinar se o número de Reynolds é alto, baixo ou moderado, e assim determinar se o escoamento é laminar ou turbulento.

Segundo Brunetti (2008), encontrar o valor do número de Reynolds não é o suficiente para se concluir o tipo de escoamento que vai ser obtido, pois outro ponto importante a se averiguar, é se o escoamento é interno ou externo, pois isso vai afetar as características das linhas de velocidade. Portanto, se o escoamento for externo, aquele escoamento que normalmente ocorre ao redor de objetos, como no caso do escoamento do ar em carros e aviões, teremos como escoamento laminar todo número de Reynolds, menor que  $5 \cdot 10^5$ , enquanto que o maior será turbulento. Já para escoamentos internos Brunetti (2008), afirma que se o número de Reynolds resultar num valor inferior a 2.000 o escoamento é laminar, se ficar entre 2.000 a 2.400 o escoamento está em regime de transição, mas se o cálculo da eq. (1) der um valor maior que 2.400, então o escoamento será turbulento.

### 3.1.2 Lei de Poiseuille

A Lei de Poiseuille, foi usada como base para o desenvolvimento da bancada de Poiseuille, que tem como principais funções mostrar como a variação do diâmetro dos tubos de

escoamento e a variação da diferença da altura de abastecimento da água alteram a pressão, a velocidade, a vazão e o número de Reynolds do escoamento.

Segundo Coelho (2012), a lei de Poiseuille é uma regulamentação da mecânica dos fluidos que foi elaborada pelo médico fisiologista francês Jean-Louis-Marie Poiseuille e pelo engenheiro hidráulico alemão Gotthilf Hagen. Se tornando uma determinação muito importante para a análise de fluidos em escoamentos fechados.

Ainda segundo Coelho (2012), o contexto histórico sobre a criação da equação de Poiseuille vem do estudo deste médico francês através da hemodinâmica, onde o mesmo estudava frequentemente o caminho do bombeamento de sangue pelas artérias e vasos sanguíneos dentro do corpo humano, e notava como a variação de cada artéria trazia uma diferença de pressão interna. Mas como as veias no corpo humano são muito pequenas e de difícil acesso, ele não conseguia tirar resultados e testes conclusivos sobre o que causava essa variação de pressão. Foi então, que após muita análise, Poiseuille conseguiu associar esse movimento do sangue pelo corpo, como uma projeção do escoamento da água em tubos cilíndricos, onde associou as leis de escoamento de fluidos em regime laminar, conseguindo assim determinar a sua lei.

Para Coelho (2012), a metodologia de regulamentação de Poiseuille seria vigente apenas em fluidos viscosos e incompressíveis que realizam seu escoamento em tubos cilíndricos fechados, onde segundo o mesmo, essas condições poderiam descrever uma expressão matemática baseada na relação entre a dinâmica dos fluidos com a viscosidade. Esta relação teria o intuito de mostrar que a velocidade dinâmica multiplicada pelo comprimento do tubo e pela vazão do escoamento, é igual a uma variação de pressão em dois pontos distintos dentro de um cilindro.

Independentemente as descobertas de Poiseuille, o engenheiro hidráulico Hagen (1839) em seus estudos acerca de tubulações fechadas com fluidos viscosos incompressíveis, conseguiu encontrar a mesma equação descrita por Poiseuille em seu livro, comprovando e retificando a análise do médico francês. Com essas informações, validou-se a Eq. (2) para a mecânica dos fluidos, que ficou conhecida como equação de Hagen-Poiseuille, que se tornou uma lei da Física que descreve uma pressão calculável, de um fluido viscoso em um escoamento laminar dentro de um tubo com sistema fechado.

$$\Delta P = \frac{128 * \mu * L * Q}{\pi * d^4} \quad \text{ou} \quad \Delta P = \frac{8 * \mu * L * Q}{\pi * r^4} \quad (2)$$

Onde  $\Delta P$  é a diferença de pressão entre os dois pontos selecionados do tubo, dado em Pascal (Pa),  $L$  o comprimento do tubo dado em metros (m),  $\mu$  é a viscosidade dinâmica para o fluido em questão dado por Pascal vezes segundos (Pa.s),  $Q$  é a vazão volumétrica do escoamento dado em metro cubico por segundo ( $m^3/s$ ),  $r$  é o raio do tubo pelo qual o fluido escorre dado em metros (m) e  $d$  é o diâmetro do tubo dado em metros (m).

Contudo a Eq. (2) pode ser transcrita de forma que a pressão seja transformada em perda de carga, e a vazão seja o que se deseja obter, já que nos ensaios da bancada de Poiseuille, será essa a necessidade, então segundo Fox et al (2014), a Eq. (2) pode ser escrita na forma da Eq. (3),

$$Q = \frac{D^4 * \pi * \gamma * h_\gamma}{128 * \mu * L} \quad (3)$$

Em que  $Q$  é vazão,  $\pi$  é a constante pi,  $\gamma$  é o peso específico do fluido,  $h_\gamma$  é a perda de carga,  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido, e  $L$  é o comprimento onde se deu a perda de carga. Sendo que a perda de carga  $h_\gamma$  segundo Fox et al (2014), pode ser determinado pela Eq. (4). Em que  $h_\gamma$  é a perda de carga,  $f$  é o fator de atrito,  $L$  é o comprimento onde se deu a perda de carga,  $v$  é a velocidade média do fluido,  $D$  é o diâmetro do tubo, e  $g$  é gravidade local.

$$h_\gamma = f \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

O fator de atrito citado na Eq. (4) pode ser determinado pela Eq. (5), onde segundo Fox et al (2014), vai ser igual a divisão de 64 pelo número de Reynolds.

$$f = \frac{Re}{64} \quad (5)$$

### 3.1.3 Equação estática para fluidos

Como visto na introdução, um dos três tópicos mais importantes quando se fala de mecânica dos fluidos é a hidrostática, assunto cujo o qual será referente a terceira bancada experimental apresentada nesse documento: a bancada de hidrostática.

A bancada experimental tem como principal teoria de funcionalidade o teorema de Stevin, que segundo Pucci (2011), recebeu esse nome pois foi elaborado pelo físico e engenheiro belga Simon Stevin, onde o mesmo afirmava que dois pontos distintos no mesmo fluido e na mesma profundidade vão ter pressões iguais.

O teorema apresentado por Fox et al (2014), descreve que a diferença entre as pressões de dois pontos de um fluido em equilíbrio (estático) é igual ao produto entre a densidade do fluido, a aceleração da gravidade e a diferença entre as profundidades dos pontos, criando a Eq. (6), conhecida como equação de Stevin.

$$p - p_0 = \Delta P = \rho * g * h \quad (6)$$

Onde,  $p - p_0$  é a variação de pressão onde  $p_0$  é pressão inicial e  $p$  a pressão final dadas em Pascal (Pa),  $\rho$  é a massa específica do fluido dado  $\text{kg/m}^3$  e  $h$  é a variação de altura entre as superfícies das colunas de líquidos (m).

### 3.1.4 Equação de Bernoulli

Segundo White (2018), por volta de 1738 o matemático suíço Daniel Bernoulli publicou em seu livro *Hydrodynamica*, um princípio sobre a conservação de energia descrevendo que: “Se a velocidade de uma partícula de um fluido aumenta enquanto ela se escoar ao longo de uma linha de corrente, a pressão do fluido deve diminuir e vice-versa”. Esse princípio posteriormente chamado de princípio de Bernoulli, em sua homenagem se originou a Eq. (7), conhecido como equação de Bernoulli.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \quad (7)$$

A equação de Bernoulli segundo Fox et al (2014), é uma equação fundamental da mecânica dos fluidos que detalha e compara as propriedades do fluido em vários pontos do escoamento, buscando relacionar as três energias presentes em um movimento dinâmico, onde:  $P/\gamma$  seria a energia de pressão, em que  $P$  seria a pressão dada em Pascal (Pa) e  $\gamma$  seria o peso específico do fluido dado em newton por metro cúbico ( $\text{N/m}^3$ );  $V^2/2g$  seria a energia cinética, em que a  $V$  seria a velocidade do fluido dado em metros por segundo (m/s) e  $g$  seria a gravidade

local dado por metros por segundo ao quadrado ( $m/s^2$ ); E  $Z$  seria a energia potencial dado em metros (m).

Então, como exposto por Brunett (2008) tal princípio ou equação, trata-se da aplicação do princípio de conservação de energia para fluidos ideais, sendo uma extensão das leis da termodinâmica, possibilitando uma relação entre velocidade do fluido estudado com a pressão do mesmo. Porém essa equação não é tão utilizada, devido necessitar de certos critérios para sua perfeita exatidão. Segundo autor supracitado, para que a equação represente com exatidão os fenômenos naturais, as hipóteses simplificadoras que precisam ser submetidas são:

a) regime permanente;

b) sem máquina no trecho de escoamento em estudo. Entenda-se por máquina, qualquer dispositivo mecânico que forneça ou retire energia do fluido, na forma de trabalho;

c) sem perdas por atrito no escoamento do fluido ou fluido ideal;

d) propriedades uniformes nas seções;

e) fluido incompressível;

f) sem trocas de calor.

### 3.1.5 Equações de apoio para análise de volume, vazão, velocidade e pressão

Para a solução dos ensaios propostos, serão necessárias algumas equações básicas da física e da matemática, tais como a equação do volume de cilindros, apresentada na Eq. (8), e que vai ser utilizada na determinação do volume dos medidores de vazão das bancadas que serão apresentados a seguir. Em que  $V$  é o volume a ser determinado em metros cúbicos ( $m^3$ ),  $r$  é o raio do cilindro dado em metros e  $h$  a altura que o líquido subiu no interior do cilindro dado em metros (m).

$$V = \pi * r^2 * h \quad (8)$$

A equação da vazão volumétrica também será utilizada nesse trabalho, que segundo White (2018) pode ser representada pela Eq. (9), onde será possível determinar a vazão de todos os escoamentos realizados nas bancadas. Em que  $Q$  é a vazão em metros cúbicos por segundo ( $m^3/s$ ),  $V$  é o volume em metros cúbicos ( $m^3$ ) e o  $\Delta T$  a variação do tempo em segundos (s)

$$Q = \frac{V}{\Delta T} \quad (9)$$

Outra equação de sumo importância para os ensaios, é a equação da velocidade, cuja qual será determinada dependendo das variáveis fornecidas pelas bancadas. Na bancada de Reynolds e de Poiseuille, a velocidade média do fluido segundo White (2018), será determinada pela Eq. (10), que descreve uma fórmula de continuidade para determinação de velocidade. Onde a  $v$  é a velocidade média do fluido em metros por segundo (m/s),  $Q$  é a vazão em metros cúbico por segundo (m<sup>3</sup>/s) e  $A$  a área da seção transversal do tubo em metros quadrados (m<sup>2</sup>).

$$V = \frac{Q}{A} \quad (10)$$

Na bancada de Bernoulli também se faz necessário da determinação de velocidade, contudo não uma velocidade média do fluido, mais sim uma velocidade em cada ponto que se deseja analisar do escoamento, e para isso segundo Fox et al (2014), se simplifica a equação de Bernoulli para uma única linha corrente, sem energia potencial e com velocidades uniformes, montando assim a Eq. (11) para a solução da velocidade em cada ponto da bancada de Bernoulli. Onde  $v$  é a velocidade em cada ponto do escoamento dada em metros por segundo (m/s),  $P_{total}$  a pressão total do fluido em Pascal (Pa),  $P$  a pressão estática da seção escolhida para análise experimental dado em Pascal (Pa),  $\rho$  a massa específica do fluido

$$v = \sqrt{\frac{P_{total} - P}{\rho}} \quad (11)$$

Por fim a última equação de apoio para os ensaios realizados nas bancadas de experimentação, é a equação da pressão estática, que pode ser encontrada segundo Fox et al (2014) pela Eq. (12), onde  $P$  é a própria pressão estática em Pascal (Pa),  $\rho$  a massa específica do líquido dado em quilograma por metro cúbico (kg/m<sup>3</sup>),  $g$  a gravidade local em metros por segundo ao quadrado (m/s<sup>2</sup>) e  $h$  a altura alcançada em cada seção do tubo de análise dado em metros (m).

$$P = \rho * g * h \quad (12)$$

## 4 METODOLOGIA

Esse documento foi realizado baseado em testes de quatro bancadas físicas que remetem a mecânica dos fluidos, e para melhor esclarecimento, as informações obtidas foram divididas em tópicos, cujo cada tópico será dedicado a uma breve explicação do conceito físico por trás da utilização da bancada, e como é feito suas medições e coleta de resultados. Todos as bancadas usaram como fluidos de trabalho a água, que tem propriedades de massa específica igual  $997 \text{ kg/m}^3$ , peso específico igual a  $9810 \text{ N/m}^2$  e Velocidade dinâmica igual  $1,002 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m.s}$ . A gravidade usada para todos os cálculos, foi de  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

### 4.1 BANCADA DE REYNOLDS

O estudo da bancada de Reynolds é dado a partir do experimento de Reynolds, buscando demonstrar através da experimentação, como as alterações nos diâmetros dos tubos podem alterar o escoamento da água entre laminar e turbulento, além dessas alterações, também variações de vazão e velocidade para cada ensaio.

A bancada de Reynolds representada pela figura. 3 apresenta uma guia de aço com trava ajustável de 0 a 60 cm (1); Um recipiente em acrílico para tinta (2), Recipiente de acrílico para o fluido (3); Uma barra de metalon fixa (4); Uma bomba de circulação Askoll 110 V (5); Conjunto de tubos de borracha para realização dos testes com 1,6 e 2,2 centímetros (cm) de diâmetro (6); Um reservatório de acrílico de 2 litros (7); Uma mangueira para a entrada d'água (8); Uma tubulação para a saída do excesso de água (9); Rodízio fixo com freio e sem freio (10)

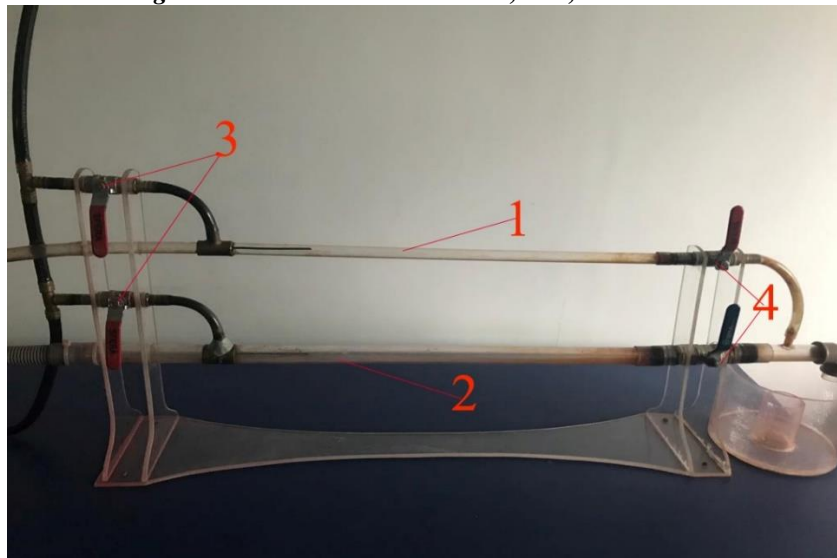
*Figura. 3 Bancada de Reynolds*



Fonte: autoria própria (2022)

Os tubos utilizados nos testes (6) são de extrema importância para a analogia do trabalho da experimentação da bancada de Reynolds, por isso na figura. 4, temos uma imagem ampliada dos mesmos onde nota-se a variação de diâmetros dos mesmos. Onde (1) é o tubo de menor diâmetro, apresentando dimensão de 1,6 centímetros (cm). (2) é o tubo de maior diâmetro, apresentando dimensão de 2,2 centímetros (cm). Além disso na figura. 4, ainda é possível ver as válvulas de liberação de corante (3) e as válvulas de liberação de escoamento do fluido (4).

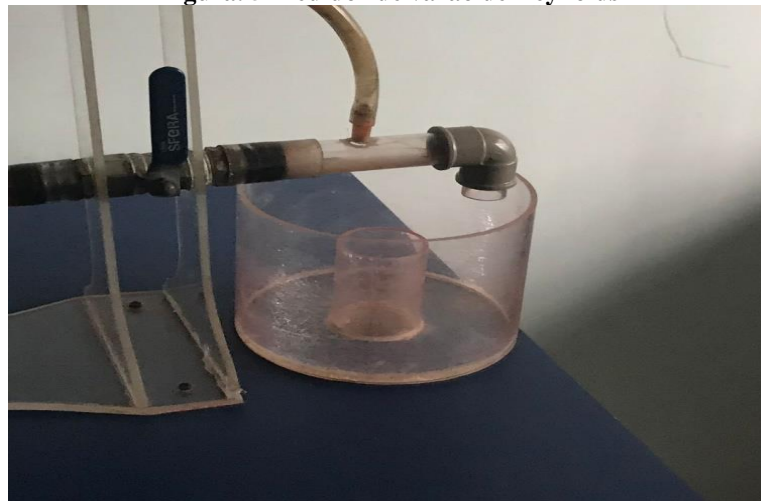
**Figura. 4** tubos de borracha com 1,6 e 2,2 centímetros



Fonte: Autoria própria (2022)

Outro componente de extrema importância para a utilização da bancada de Reynolds, é o medido de vazão, mostrado na figura. 5. O medidor de vazão como seu nome sugere tem a função de encontrar o volume para a determinação da vazão. De maneira que, durante o ensaio o fluido vai escorrer pela bancada até encontrar seu destino no medidor.

**Figura. 5** Medidor de vazão de Reynolds

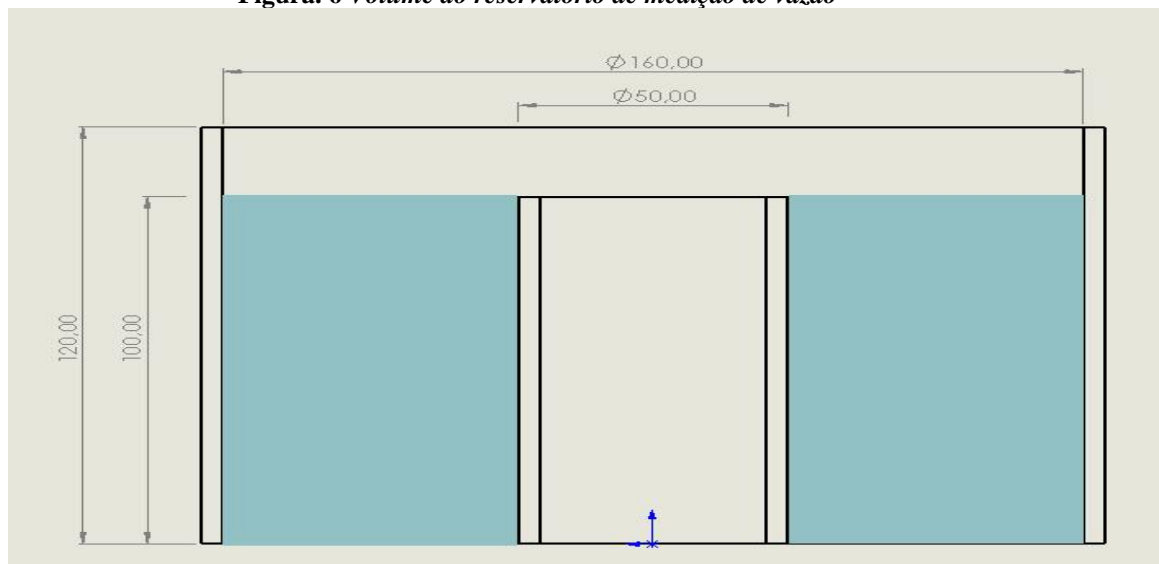


Fonte: Autoria própria (2022)

Para a determinação do volume de líquido escoado, vai se precisar primeiro determinar um tempo para deixa o fluido escorrer pela bancada, para poder preencher o medidor de vazão criando uma altura  $h$  em metros (m). Nos experimentos foi utilizado um tempo de 20 segundos, em seguida utilizamos as medidas dadas pelo reservatório de medição de vazão, mostrado pela figura. 4 para determinar o raio  $r$ , com as medidas de  $h$ , e  $r$  utilizar a Eq. (8) que vai determinar o volume do líquido escoado em metros cúbicos ( $m^3$ ).

A figura. 6 como descrita acima mostra as dimensões do medidor de vazão. De maneira que a altura do cilindro maior é 120 mm, o diâmetro do cilindro maior é 160 mm, o diâmetro menor é 50 mm e Altura do cilindro menor é 100 mm,

**Figura. 6** Volume do reservatório de medição de vazão



*Fonte: Autoria própria (2022)*

Na medida em que encontramos o volume de líquido escoado pelo tempo de 20 segundos, concluímos a real função do medidor de vazão, pois com o volume  $V$  em metros cúbicos ( $m^3$ ) e o tempo em segundos (s), pode se utilizar a equação de continuidade Eq. (9) para determinar a vazão do fluido escoado em metros cubico por segundo ( $m^3/s$ ).

Uma vez vislumbrada a vazão, se aplica a Eq. (10) para determinar a velocidade do escoamento, onde a velocidade em metros por segundo (m/s) vai ser igual a vazão em metros cubico por segundo ( $m^3/s$ ), dividido pela área da seção transversal do tubo em metro quadrados ( $m^2$ ).

### 4.1.1 Ensaio de Reynolds

O ensaio realizado na bancada é feito a partir de três testes práticos de escoamento, com o objetivo de analisar o comportamento do fluido durante seu escoamento, e a partir disso utilizar a equação do número de Reynolds para determinar se o escoamento é laminar ou turbulento.

O passo a passo do ensaio realizado na bancada de Reynolds, se deu da seguinte forma: primeiramente se encheu o reservatório de acrílico de 2 litros abaixo da bancada, e a bomba foi ligada, o equipamento de meio hp exerce sua função bombeando a água para o recipiente de acrílico, localizado na parte mais alta da bancada, em meio a isso é adicionada uma mistura diluída de tinta vermelha a outro reservatório, também na parte superior da bancada, correspondendo ao papel de corante do experimento.

A figura. 7 ilustra melhor essa etapa do ensaio, sendo que o reservatório (1) foi preenchido com a água que a bomba encheu, e o reservatório (2) foi enchido externamente com corante.

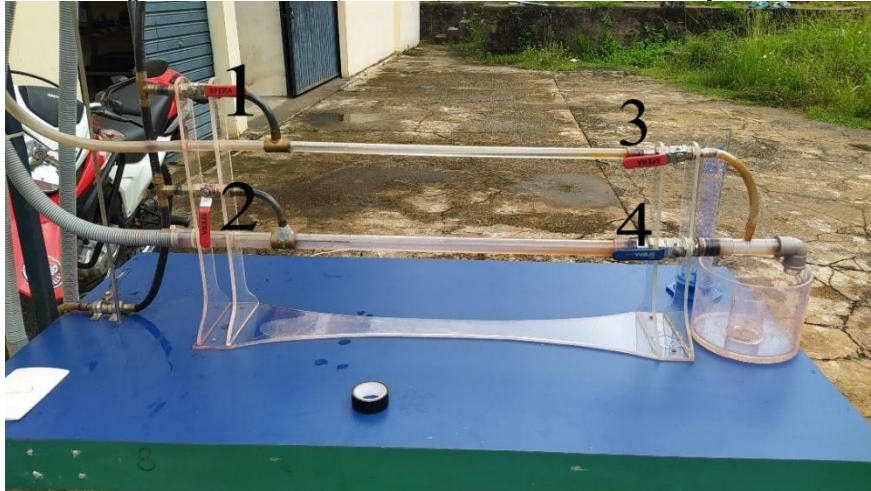
**Figura. 7 Reservatórios de adição de fluido e corante da bancada de Reynolds**



*Fonte: Autoria própria (2022)*

Na medida que os recipientes de acrílico foram preenchidos, a etapa seguinte foi a abertura das válvulas, para que com elas abertas o real escoamento de análise pudesse iniciar. A figura. 8 mostra as 4 válvulas principais que a bancada dispõe, sendo (1) a válvula de controle do corante para o tubo de 1,6 cm. (2) a válvula de controle do corante para o tubo de 2,2 cm. (3) a válvula de controle do escoamento do fluido principal para o tubo de 1,6 cm. E (4) a válvula de controle do escoamento do fluido principal para o tubo de 2,2 cm.

**Figura. 8 Tubos de 1,6 cm e 2,2 cm da bancada de Reynolds**



*Fonte: Aatoria própria (2022)*

Com as válvulas (3) e (4) abertas, dar-se prosseguimento a última etapa do ensaio, onde são feitos três testes, em que cada teste, as válvulas (3) e (4) são abertas em posições diferentes.

O primeiro ensaio, se deu com as válvulas pouco abertas, o segundo com as válvulas meio abertas e o terceiro com as válvulas totalmente abertas. A partir dos ensaios supracitados, foi possível obter a altura  $h$  em metros que o escoamento teve no reservatório de medição de vazão no decorrer de 20 segundos.

As figuras. 7, 8 e 9 ilustram cada ensaio com a abertura das válvulas de controle dos corantes, para que possamos ter uma melhor visualização da velocidade do escoamento.

A figura. 9 representa o ensaio 1, com as válvulas principais de escoamento pouco abertas. figura. 10 representando o ensaio 2, com as válvulas abertas até a metade, e a figura. 11 sendo o ensaio 3, com as válvulas totalmente abertas.

**Figura. 9 Ensaio 1 (REYNOLDS)**



*Fonte: Aatoria própria (2022)*

**Figura. 10 Ensaio 2 (REYNOLDS)**



Fonte: Aatoria própria (2022)

**Figura. 11 Ensaio 3 (REYNOLDS)**



Fonte: Aatoria própria (2022)

De posse da altura  $h$ , podemos encontrar o volume e a velocidade, portando faltando apenas o cálculo do número de Reynolds para determinar se o escoamento é laminar ou turbulento. E diante de todas as variáveis já apresentadas, utilizamos e calculamos apenas a Eq. (1).

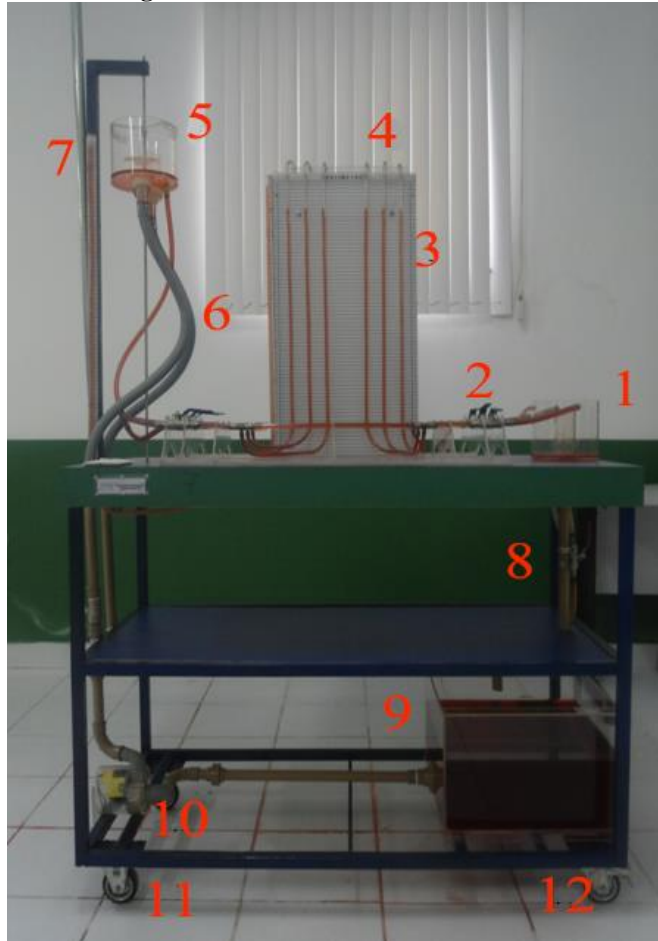
#### 4.2 BANCADA DE POISEUILLE

A bancada em questão, tem como objetivo demonstrar como a variação da altura da coluna de líquido e do diâmetro de tubos, fazem variações no escoamento dos fluidos, utilizando os cálculos da equação de Poiseuille para tentar quantificar essas alterações.

A presente bancada como ilustrada na figura. 12 apresenta (1) reservatório de medição de vazão; (2) Arranjo de tubos de silicone e válvulas de 7/5/3 mm; (3) Um painel graduado em

centímetro para análise das colunas de líquido; (4) Tomadas de pressão; (5) Reservatório móvel; (6) Tubos sanfonados; (7) Haste graduada 0-60 cm; (8) Válvula dreno; (9) Um reservatório de acrílico de 2 litros; (10) Bomba de circulação Askoll 110 V; (11) Rodízios sem freio; (12) Rodízios com freio.

**Figura. 12 Bancada de Poiseulle**

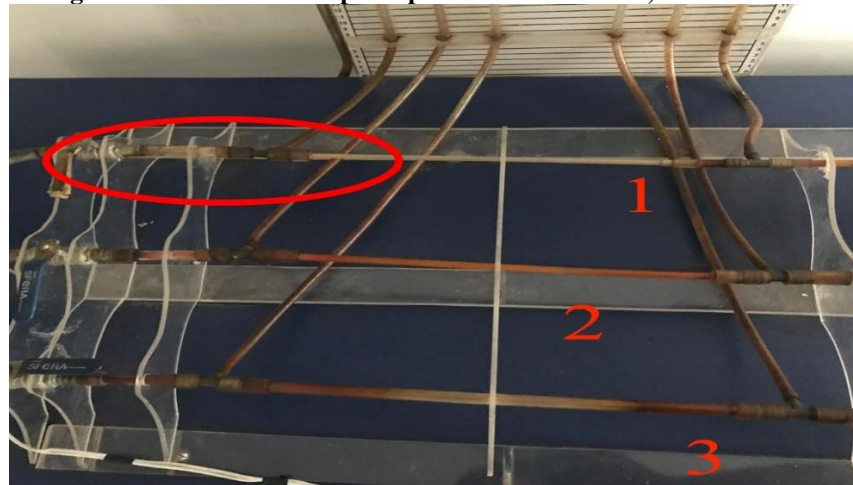


Fonte: *Catálogo SolveLab (2019)*

Como já destacamos na bancada de Reynolds, um dos pontos mais importantes da bancada de Poiseuille são os tubos de diâmetros variados (2), que na figura. 13 podem ser vistos melhor.

Nesse sentido, mostrando o cano (1) como sendo o tubo de menor diâmetro, apenas com 3 milímetros (mm), o cano (2) mostrando ser o tubo de médio diâmetro, com 5 milímetros (mm), e o cano (3) sendo o tubo de maior diâmetro, com 7 milímetros (mm). O tubo de menor diâmetro apresentou falhas de vedação, na área circulada em vermelho na figura. 13, e no intuito de evitar erros na validação da bancada, e por falta de métodos e tempo para encontrar um tubo com diâmetro semelhante, o mesmo foi isento de teste.

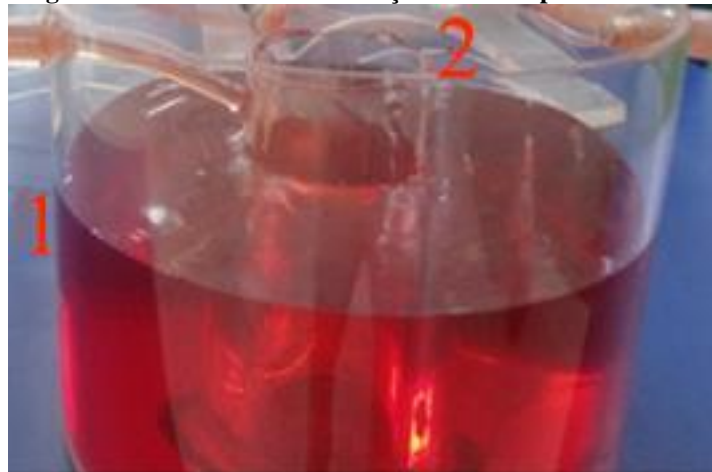
**Figura. 13 Tubos de transporte para Poiseuille 3 mm, 5 mm e 7 mm**



Fonte: Autoria própria (2022)

É válido ressaltar que, o reservatório de medição de vazão utilizado para medir a vazão do experimento, apresenta a configuração como mostrado na figura. 14, com uma estrutura de dois cilindros, um externo (1) para o armazenamento do volume da água com medidas de volume iguais a  $0,0008658 \text{ m}^3$ , e um interno (2) para manter o volume de água constante, e facilitar a aferição de tempo.

**Figura. 14 Reservatório de medição de vazão para Poiseuille**



Fonte: Autoria própria (2022)

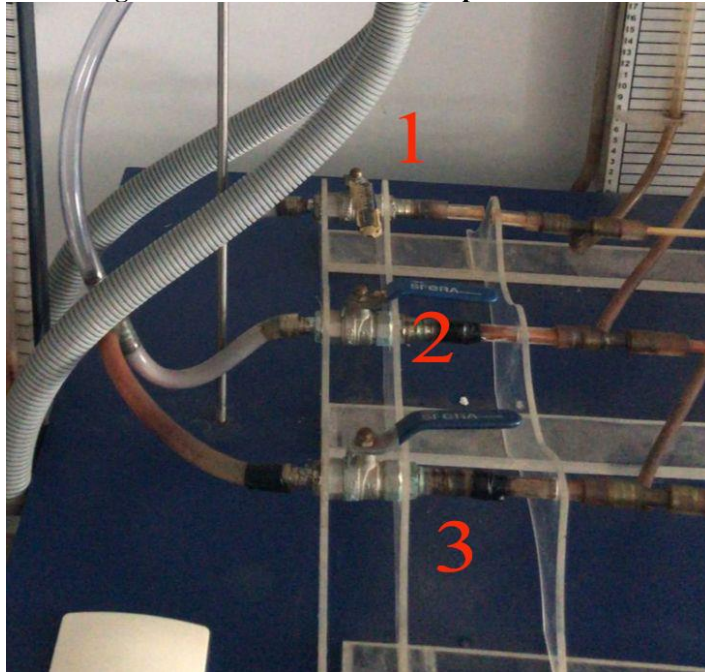
#### 4.2.1 Ensaio de Poiseuille

A realização dos testes da bancada de Poiseuille foram realizadas de duas formas, a primeira em que se variou as alturas da coluna de líquido da barra de inox móvel utilizando o cano de 7 mm para o escoamento, e a segunda em que se fixou a altura em 50 cm, variando apenas os escoamentos no cano médio de 5 mm e no cano maior de 7 mm.

O processo ocorreu na prática de maneira em que primeiro se encheu o reservatório de acrílico com 2 litros de água, logo após a bomba de meio hp empurrou a água para o reservatório de entrada, onde ficou contido até que as válvulas de entrada fossem abertas, válvulas essas mostradas na figura. 15.

Como descrito na apresentação do ensaio as válvulas eram abertas dependendo do ensaio realizado. Para o primeiro ensaio em que se variava as alturas, apenas a válvula do tubo de 7mm (3) foi aberta. Já para o segundo ensaio em que variava os diâmetros, todas as três válvulas deveriam ser abertas, mas como o tubo de 3mm estava comprometido, a válvula (1) não tinha função, sendo assim para o segundo ensaio foram abertas as válvulas (3) para o tubo de 7mm e (2) para o tubo de 5 mm.

**Figura. 15 Válvulas de abertura para Poiseuille**



Fonte: Autoria própria (2022)

Uma outra seção variável que será apresentada é a haste móvel representada na figura, como já visto durante a apresentação da bancada, é uma das responsáveis por regular a perda de carga que será medida pela elevação das colunas líquidas, e seu posicionamento vai depender também do ensaio que será realizado.

Para o primeiro ensaio selecionamos as alturas de variação: 60, 55, 50, 45 e 40 cm. Enquanto que para o segundo ensaio, a haste ficou a uma altura fixa de 50 cm.

**Figura. 16 Haste móvel de Poiseuille**



Fonte: Autoria própria (2022)

Com as alturas e válvulas corretas de cada experimento selecionado, damos sequência ao ensaio, registrando em todos os testes: o tempo que levou o escoamento a atingir o volume de  $0,0008658 \text{ m}^3$  e a perda de carga que os mesmos desempenhavam em dois pontos do percurso. Os pontos da aferição da perda de carga são localizados nas conexões em T mostrados ao canto direito da figura. 15.

A figura. 17 por sua vez, mostra onde se faz a leitura dos valores de perda de carga em cm, visualizando a tabela escalonada onde os tubos estão acoplados.

**Figura. 17 Tabela escalonada de Poiseuille**



Fonte: Autoria própria (2022)

Realizadas as medidas de todas as perdas de carga, e cronometrado o tempo que os escoamentos levaram pra encher o reservatório de medição de volume, concluiu-se a primeira parte dos experimentos realizados na bancada de Poiseuille.

Para a segunda etapa, utiliza-se os tempos que cada teste levou para executar a ação de encher completamente o reservatório de medição de vazão mostrado na figura. 12, para então utilizar na Eq. (10), e assim determinar a velocidade que cada teste exerceu. Usamos tanto para o primeiro ensaio, que variou as alturas, quanto para o segundo que variou os diâmetros, podendo assim encontrar o número de Reynolds.

Caso o parâmetro de Reynolds encontrado indique que o escoamento é turbulento, o ensaio encerra, pois a equação de Poiseuille só é aplicada a tubos fechados com escoamento laminar. Mas se o número de Reynolds indicar que o escoamento é laminar, então o ensaio continua, e se aplica a Eq. (5) no teste. Eq. (5), que tem como objetivo encontrar o fator de atrito, onde se dividi o parâmetro adimensional número de Reynolds por 64, para segundo Fox et al (2014) se ter o fator que a viscosidade do fluido incita no escoamento.

Dando prosseguimento, a próxima etapa é encontrar a perda de carga, usando a Eq. (4), pois diante dos experimentos, vai se ter a velocidade do fluido em metros por segundo (m/s), o diâmetro do tubo em metros, o comprimento que ocorreu a perda de carga também em metros, e a constante gravitacional em metros por segundo ao quadrado ( $m/s^2$ ), sendo possível encontrar a perda de carga para o escoamento de cada experimento.

Chegamos, então, a última etapa do método do cálculo, em que se quer encontrar a vazão de Poiseuille, através da Eq. (3).

### 4.3 BANCADA DE HIDROSTÁTICA

A presente bancada tem se como objetivo demonstrar um experimento físico, em que um fluido estático dentro de um sistema fechado sofre aplicação de pressão em uma de suas extremidades, causando um deslocamento de líquido, e a partir disso fazer análises sobre esse deslocamento com o objetivo de calcular a pressão exercida ao fluido, utilizando os princípios de Stevin e Arquimedes para realizar tal solução (Cálculo de manômetro manuais).

A figura. 18 apresenta os equipamentos da bancada de Hidrostática, contendo. (1) Manômetro modelo MM-400 (manômetro de tubo em U); (2) Bomba de ar manual com manômetro implantado; (3) Manômetro modelo MCI-50 (manômetro de tubo inclinado), (4) Barômetro de mercúrio.

**Figura. 18 Bancada de Hidrostática**



Fonte: Autoria própria (2022)

#### 4.3.1 Ensaio da bancada de Hidrostática

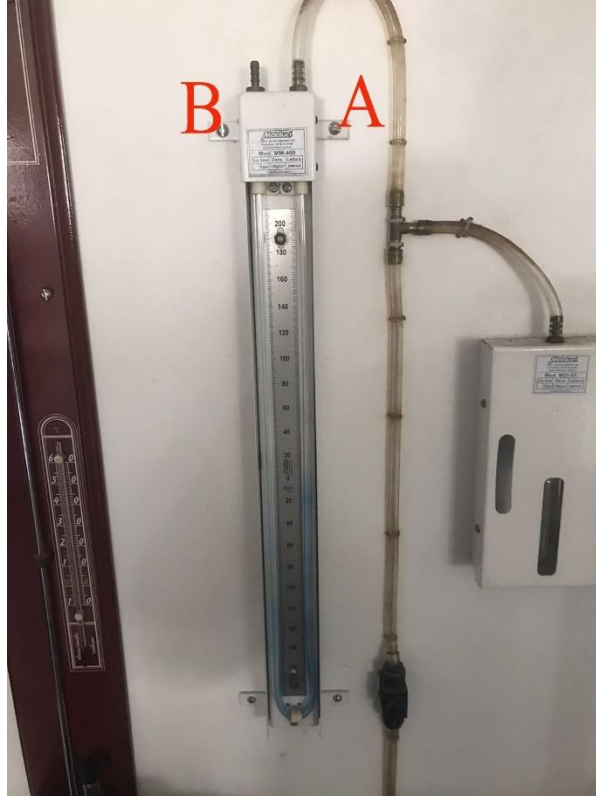
Para o ensaio realizado nesta bancada, utilizaremos dois manômetros de medição manual de pressão, um com o tubo em forma U, e outro com o tubo inclinado, ambos acoplados a uma tubulação que está ligada a uma bomba de ar manual, que tem como objetivo fazer alterações no circuito, de forma que os manômetros de tubo vão indicar a variação de pressão exercida pela bomba através das variações na coluna de líquido.

Para obtermos um melhor entendimento sobre as análises de variação de pressão em cada manômetro, seus desenvolvimentos serão feitos de maneira separada, mas ambos utilizarão a Eq. (6) desenvolvida a partir do teorema de Stevin.

Segundo Fox et al (2014), a utilização da Eq. (6) é muito proveitosa para estudos de manômetro, pois indica que a diferença de pressão entre dois pontos em um fluido estático pode ser determinada pela medida da diferença de elevação entre os dois pontos. Portanto em um sistema que se tem apenas um fluido, como no caso dos manômetros, a variação de  $h$  será o que indicar uma variação de pressão, já que as outras variáveis se manterão constantes.

Portanto, analisando primeiramente o manômetro em U em destaque na figura. 19, onde visualizamos uma régua em milímetros no centro, facilitando assim, a leitura da variação de altura que será observada entre as colunas de líquido.

**Figura. 19 Manômetro em U**



Fonte: Autoria própria (2022)

Para o manômetro em U, a equação utilizada será, a Eq. (6), que vai atuar sobre a variação de altura da coluna de líquido, formada após a aplicação da pressão pela bomba de ar, gerando um desnivelamento nas duas superfícies, cujas as quais serão adotadas como pontos de análise chamados de A e B. Onde A vai estar sofrendo a pressão do ar bombeado, entrando no manômetro, e B a pressão atmosférica, como pode ser melhor ilustrado na figura. 19.

Com o resultado dessa análise, pode-se realizar alterações na Eq. (6) para poder justificá-la na Eq. (13), sendo colocada todas as variáveis de Stevin em função dos valores específicos encontrados no manômetro em U.

$$P_A = \rho_{h_2O}gh \quad (13)$$

Segundo Fox (2014), o manômetro de tubo em U, é o mais simples, porém o mais completo equipamento de medição de pressão, tendo em vista que o mesmo é utilizado como referência para a eficiência de outros dispositivos. Contudo, o autor também descreve, que o

manômetro não tem a máxima exatidão quando comparados com outros manômetros mais sensíveis.

Para o manômetro inclinado, a analogia é muito semelhante ao que se fez para o manômetro em U, com a diferença que esse equipamento, como mostrado na figura. 20, não tem sua variação de altura muito visível, não apresentando a régua milimetrada de fácil visão que há no centro do manômetro em U.

**Figura. 20 Manômetro inclinado**



Fonte: Autoria própria (2022)

Para o experimento referente a análise do manômetro de tubo inclinado, também é utilizada como equação dominante a Eq. (6), porém com um caráter bem mais geométrico. A análise será diante de um ponto na superfície do reservatório encontrado a esquerda da figura.18, e em outro ponto localizado na superfície do líquido que vai estar no tubo inclinado. Como pode ser melhor visualizado na figura. 21

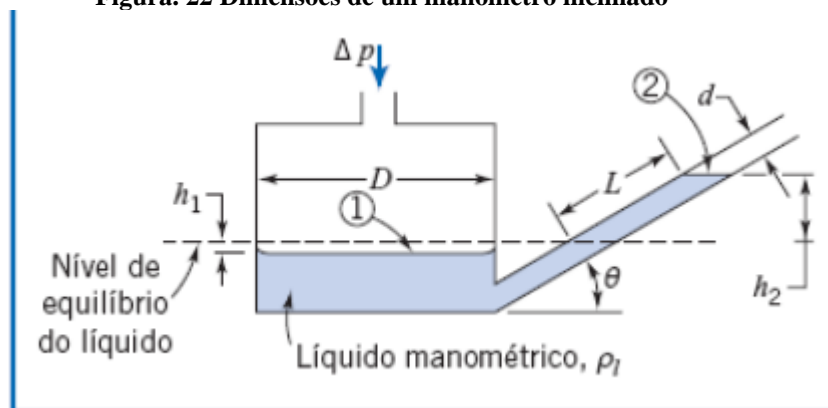
**Figura. 21 Manômetro inclinado aberto**



Fonte: Autoria própria (2022)

A altura  $h$ , é uma somatória de outras duas alturas presentes no manômetro inclinado, apresentados na figura. 22, como  $h_1$  e  $h_2$ .

**Figura. 22 Dimensões de um manômetro inclinado**



Fonte: Foxx (2014)

Para encontrar  $h_2$  se usa a análise do triângulo retângulo proposto por Pitágoras, em que o cateto oposto dividido pelo seno do ângulo é igual a hipotenusa, podendo encontrar o  $h_2$  através da Eq. (14):

$$h_2 = L * \sin \theta \quad (14)$$

Enquanto que para o  $h_1$ , entende-se que o volume permanece constante, e que todo o volume que sai do reservatório vai para o tubo inclinado, obtendo na Eq. (15) uma condição de semelhança, dando a seguinte dedução para  $h_1$ :

$$h_1 = L \left( \frac{d}{D} \right)^2 \quad (15)$$

Substituindo as Eq. (14) e (15) na equação (6), e já adaptando a nomenclatura adota de ponto A e B, temos a seguinte Eq. (16) para a variação de pressão no tubo inclinado:

$$P_A - P_B = \rho_{h_2O} g L \left[ \sin \theta + \left( \frac{d}{D} \right)^2 \right] \quad (14)$$

- Sensibilidade

Como citado acima, quando percorrido sobre a precisão do manômetro em U, esses equipamentos têm diferentes sensibilidades de precisão na medição da pressão, e cada qual tem sua análise única, que é comparada com manômetro padrão em U. Essa analogia, de mais ou menos sensível, segundo Fox (2014), pode ser calculada analiticamente pela Eq. (17).

$$s = \frac{1}{\left[ \sin \theta + \left( \frac{d}{D} \right)^2 \right]} \quad (17)$$

#### 4.4 BANCADA DE BERNOULLI

A quarta e última bancada tem o propósito de testar o experimento de Bernoulli, através da sua aplicabilidade em um tubo de Venturi, que de maneira introdutória aferia que em determinados pontos de um escoamento no tubo, as propriedades físicas de velocidade e pressão variaram dependendo do ponto. Então, na presente bancada faremos os testes deixando o fluido correr em tubo de Venturi, e a partir de então, lançar mão em alguns dados para usar na equação de Bernoulli, para então fazer definições a respeito do princípio da conservação de energia.

A bancada de Bernoulli como mostrado na figura. 23; Tem (1) Um painel de acrílico para medição em escala de centímetros; (2) Estrutura de tubos de borracha para notação de Piezômetros; (3) Bomba Centrífuga com tensão 110V; (4) Tubo de Venturi; (5) Válvulas de vazão do tipo esfera; (6) Tubulação para a saída do excesso de água; (7) Rodízio fixo / giratório 3" Médio - Voder com freio e sem freio; (8) Reservatório de acrílico 2 litros; (9) Reservatório intermediário para medir a vazão.

**Figura. 23 Bancada de Bernoulli**

Fonte: Autoria própria (2022)

De forma geral, o equipamento mais importante para a bancada de Bernoulli, é o Tubo de Venturi, que é um instrumento criado pelo físico italiano Giovanni Batista Venturi, inspirado pelo próprio princípio de Bernoulli, para criação de um equipamento que poderia ser utilizado para obter-se a velocidade de escoamento de um líquido ideal, variando a seção transversal do seu interior durante o percorrer do seu corpo.

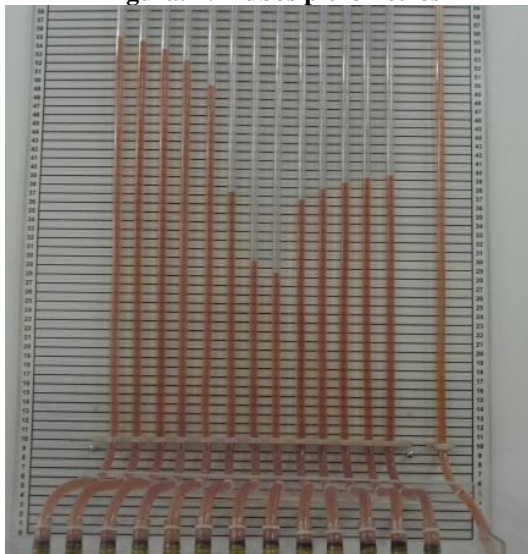
A figura. 24 mostra o tubo de Venturi utilizado na bancada de Reynolds, podendo assim ter uma visualização melhor da variação no seu diâmetro citado, mostrando que quanto mais se aproxima do centro do tubo, seu diâmetro vai diminuindo, e como vimos na lei da conservação de movimento, essa variação de diâmetro vai causar uma mudança na velocidade e na pressão do escoamento. Lembrando que, quanto menor for a área de escoamento de um fluido maior será a sua velocidade.

**Figura. 24 Tubo de Venturi**

Fonte: Autoria própria (2022)

Outro ponto de atenção que merece destaque, sobre a bancada de Bernoulli, é sobre a Tabela escalonada ligada aos tubos Piezômetros, configuração essa mostrada na figura. 25, onde essa escala é o que mostra a perda de carga em forma de altura, e com isso poderá ser encontrado a pressão em cada ponto do tubo de Venturi. É importante ressaltar que, o ultimo tubo é responsável pela medição da pressão total.

**Figura. 25 Tubos piezômetros**



*Fonte: SolveLab (2017)*

Por conseguinte, temos a figura. 26, que mostra o reservatório intermediário, sendo que, assim como nas bancadas já apresentadas, será usado para a medição do volume. O reservatório intermediário apresenta um diâmetro do cilindro maior e igual a 20 centímetros (cm) e um diâmetro para o cilindro menor de 4 centímetros (cm), com o tempo de 35 segundos para o escoamento formar a altura de coluna de líquido  $h$  em metros. Sendo que, após obter esse valor poderá ser aplicado a Eq. (8) e se encontrar o volume do escoamento.

**Figura. 26 Reservatório intermediário de Bernoulli**



*Fonte: Autoria própria (2022)*

E por fim, temos o medidor de vazão, equipamento mostrado na figura. 27, que é acoplado ao cano de entrada que antecede o tubo de Venturi, tendo como objetivo quantificar a vazão que passa sob o cano antes de entrar no sistema, para poder analisar se o equipamento está sob o efeito da conservação de energia.

**Figura. 27 Medidor de vazão**



Fonte: Autoria própria (2022)

#### **4.4.1 Ensaio de Bernoulli**

Para a realização do ensaio, primeiro se define um intervalo de tempo para a dedução do volume final. Após o experimento se definiu como variação de tempo para os testes, o tempo de 35 segundos, levando em conta desde o momento que começa o escoamento.

Para realização física do ensaio se aciona a válvula de entrada, que liga a bomba de água, onde a mesma puxa o fluido do reservatório de acrílico de 2 litros e manda para o encanamento ligado ao tubo de Venturi, passando pelo já citado medidor de vazão, que determinava a vazão que o fluido é empurrado ao tubo de Venturi, onde o mesmo conectado a tabela escalonada de tubos piezômetros determina as alturas de coluna de água, que indicam a pressão estática que cada ponto do tubo de Venturi sofre pelo escoamento, tendo o fluido que continuar a escoar pelo tubo até abastecer o reservatório intermediário. Como já descrito acima, se calcula seu volume baseado na altura de coluna de líquido que se obteve após os 35 segundos.

As equações usadas no ensaio do experimento para determinar a lei de conservação de energia, pode ser descrita e analisada da seguinte forma: para o cálculo da pressão estática do fluido em cada ponto do tubo de Venturi, se é utilizada a Eq. (12), e para a descoberta da velocidade do fluido, é utilizada a Eq. (11).

## 5 RESULTADOS

O presente tópico tem como função apresentar os resultados obtidos dos testes realizados nas quatro bancadas de fluidos, diante da metodologia apresentada no decorrer da pesquisa. É válido salientar que foram seguidas todas as medidas de segurança e os passos do projeto para a utilização das bancadas, usando como base teórica os livros de Brunetti (2008), Fox et al (2014) e White (2018)

### 5.1 BANCADA DE REYNOLDS

Então, o primeiro ponto a se executar para encontrar os resultados da bancada de Reynolds, é mensurar e tabelar o volume que o escoamento exerceu, foram feitos três testes para cada tubo em diferentes aberturas das válvulas, enquanto o escoamento apresentava um caráter mais laminar, transitório ou turbulento.

Será chamado de ensaio 1, os ensaios feitos para os dois tubos com a válvula de controle do fluido principal pouco aberta, em torno de 30 graus. Será chamado de ensaio 2, os ensaios feitos para os dois tubos com a válvula de controle do fluido principal meio aberta, em torno de 55 graus. E será chamado de ensaio 3, os ensaios feitos para os dois tubos com as válvulas de controle do fluido principal muito aberta, em torno de 70 graus. A válvula do corante para todos os ensaios foi mantida em torna de 20 graus.

Na tabela (1) são mostrados os dados de altura da coluna de liquido do reservatório intermediário ao decorrer dos 20 segundos para o tubo de diâmetro igual a 1,6 cm e alguns dados estatístico para promover a confiabilidade da análise:

**Tabela 1. Dados obtidos dos testes da altura da coluna de liquido do tubo de 1,6 cm.**

DADOS DE ALTURA DO MEDIDOR DE VAZÃO DA BANCADA DE REYNOLDS			
Tubo menor	Ensaio 1 (m)	Ensaio 2 (m)	Ensaio 3 (m)
TESTE 1	0,009	0,019	0,022
TESTE 2	0,008	0,017	0,022
TESTE 3	0,008	0,017	0,021
TESTE 4	0,008	0,016	0,025
TESTE 5	0,009	0,016	0,021
MEDIA	0,0084	0,017	0,022
DESV. PAD.	0,00055	0,00122	0,00164
INT. CONF.	+/- 0,00048	+/- 0,00107	+/- 0,00144

Fonte: Autoria própria (2022)

Na tabela (2) são mostrados os dados de altura da coluna de líquido do reservatório intermediário ao decorrer dos 20 segundos para o tubo de diâmetro igual 2,2 cm e alguns dados estatístico para promover a confiabilidade da análise:

**Tabela 2. Resultados obtidos dos testes da altura da coluna de líquido do tubo de 2,2 cm.**

DADOS DE ALTURA DO MEDIDOR DE VAZÃO DA BANCADA DE REYNOLDS			
Tubo maior	Ensaio 1 (m)	Ensaio 2 (m)	Ensaio 3 (m)
TESTE 1	0,018	0,03	0,049
TESTE 2	0,018	0,03	0,049
TESTE 3	0,015	0,028	0,055
TESTE 4	0,015	0,033	0,048
TESTE 5	0,017	0,029	0,046
MEDIA	0,017	0,03	0,049
DESV. PAD.	0,00055	0,00122	0,00164
INT. CONF.	+/- 0,00048	+/- 0,00107	+/- 0,00144

Fonte: Autoria própria (2022)

Pegando então os valores médios de  $h$  para a Eq. (8) que determina o volume do reservatório intermediário, podemos encontrar os volumes médios de cada escoamentos. Da mesma forma que se utiliza a Eq. (9) e a Eq. (10), para calcular a vazão e a velocidade média, dos três ensaios de cada tubo.

Portando já calculando e substituindo nas tabelas (3), (4) e (5) mostrando respectivamente os dados de volume médio, vazão média e velocidade média para o ensaio 1, ensaio 2 e ensaio 3, tanto para tubo de 1,6 cm. Quanto para o tubo de 2,2 cm

**Tabela 3. Resultados obtidos de volume médio, vazão média e velocidade média para o ensaio 1**

TUBOS	ENSAIO 1		
	Volume médio (m <sup>3</sup> )	Vazão media (m <sup>3</sup> /s)	Velocidade (m/s)
Tubo de 1,6 cm	$1,52 \cdot 10^{-4}$	$7,62 \cdot 10^{-6}$	0,0379
Tubo de 2,2 cm	$3,01 \cdot 10^{-4}$	$1,51 \cdot 10^{-5}$	0,0396

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 4. Resultados obtidos de volume médio, vazão média e velocidade média para o ensaio 2**

TUBOS	ENSAIO 2		
	Volume médio (m <sup>3</sup> )	Vazão média (m <sup>3</sup> /s)	Velocidade (m/s)
Tubo de 1,6 cm	3,08.10 <sup>-4</sup>	1,54.10 <sup>-5</sup>	0,0766
Tubo de 2,2 cm	5,44.10 <sup>-4</sup>	2,72.10 <sup>-5</sup>	0,0716

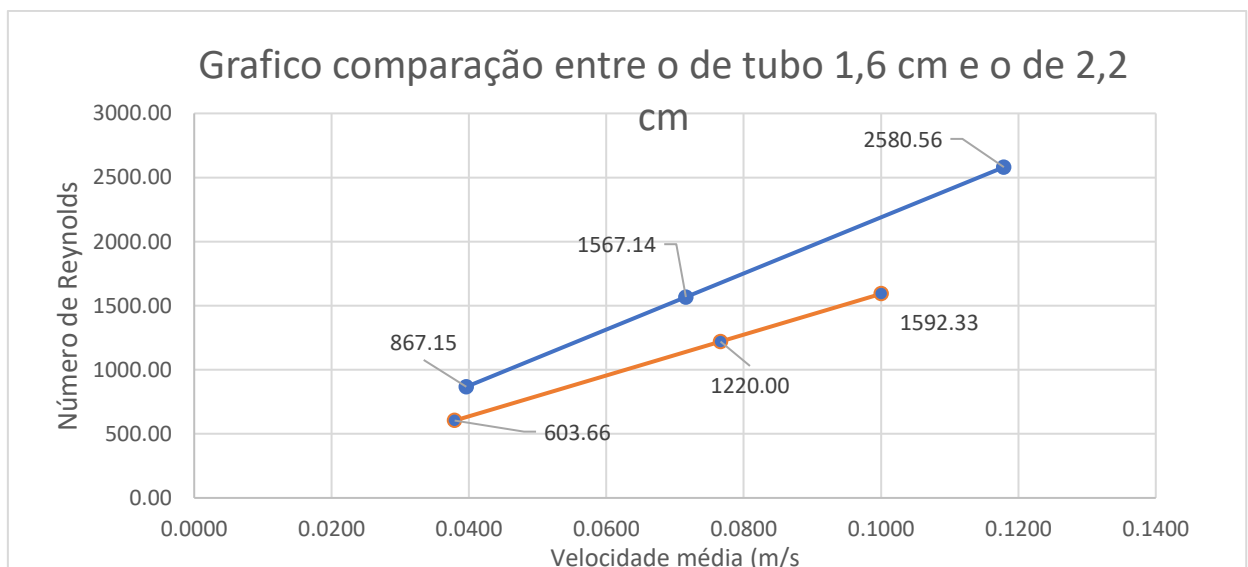
Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 5. Resultados obtidos de volume médio, vazão média e velocidade média para o ensaio 3**

TUBOS	ENSAIO 3		
	Volume médio (m <sup>3</sup> )	Vazão média (m <sup>3</sup> /s)	Velocidade (m/s)
Tubo de 1,6 cm	4,03.10 <sup>-4</sup>	2,01.10 <sup>-5</sup>	0,100
Tubo de 2,2 cm	8,96.10 <sup>-4</sup>	4,48.10 <sup>-5</sup>	0,118

Fonte: Autoria própria (2022)

Para determinar o número de Reynolds, se fez uso da Eq. (1) onde se pode determinar o parâmetro adimensional, através de todos os dados obtidos dos testes da bancada de Reynolds. A figura. 28 é a representação do gráfico de comparação entre os escoamentos do tubo de 1,6 cm, e os escoamentos no tubo 2,2 cm, destacado no eixo vertical o número de Reynolds e no eixo horizontal a velocidade do escoamento, onde cada ponto representa um ensaio. Sendo que na imagem pode se observar que o tubo de diâmetro maior representado pela linha azul apresenta números de Reynolds maiores do que tubo de diâmetro menor representado pela linha laranja, determinando assim que escoamento no tubo de 2,2 cm é mais turbulento que no tubo de 1,6 cm em todos os ensaios.

**Figura. 28 Gráfico de comparação entre os escoamentos dos dois tubos**

Fonte: Autoria própria (2022)

## 5.2 BANCADA DE POISEUILLE

Para os testes na bancada de Poiseuille foram feitos dois experimentos como citado acima, sendo que nesses dois experimentos foram feitos dois testes, para se ter uma média mínima para comprovar que não há grande variação de resultados entre os dados obtidos. Os dados obtidos foram descritos como a altura da coluna de líquido, como variável pra representar a perda de carga, e o tempo que levou para encher o reservatório intermediário, que se tem volume conhecido.

### 5.2.1 Primeiro teste

Dando início aos resultados do primeiro experimento que se variou a altura da haste móvel e foi se aferindo a vazão do mesmo, para comprovar que a diferença de altura da coluna d'água tem impacto direto às propriedades do escoamento, sendo a tabela (6) a comprovação dessa aferição, pois nela estão descritos os resultados obtidos do primeiro experimento para a pressão de perda de carga, tempo de escoamento e a vazão através da Eq. (9), em duas situações diferentes de abertura da válvula. Com o ensaio 1 mostrando a válvula pouco aberta em torno de 50° e o ensaio 2 sendo a válvula totalmente aberta.

**Tabela 6. Resultados obtidos de perda de carga. Tempo e vazão. Para ambos os ensaios do primeiro teste de Poiseuille**

Altura da haste	ENSAIO 1				ENSAIO 2			
	hi (m)	hf (m)	Tempo (s)	Vazão (m <sup>2</sup> /s)	hi (m)	hf (m)	Tempo (s)	Vazão (m <sup>2</sup> /s)
60 cm	0,52	0,42	87,6	9,88.10 <sup>-6</sup>	0,348	0,248	58,6	1,48.10 <sup>-5</sup>
55 cm	0,50	0,38	93,8	9,23.10 <sup>-6</sup>	0,328	0,238	61	1,42.10 <sup>-5</sup>
50 cm	0,50	0,38	98,4	8,79.10 <sup>-6</sup>	0,308	0,222	65,14	1,33.10 <sup>-5</sup>
45 cm	0,50	0,38	104,5	8,28.10 <sup>-6</sup>	0,286	0,21	68,74	1,26.10 <sup>-5</sup>
40 cm	0,48	0,38	127,6	6,78.10 <sup>-6</sup>	0,264	0,20	74,28	1,16.10 <sup>-5</sup>

Fonte: Autoria própria (2022)

Sendo as alturas para perda de carga encontradas, é possível encontrar a velocidade, então para a próxima etapa será encontrado as velocidades do escoamento utilizando a Eq. (10), e com a sua aferição determinando o número de Reynolds pela equação (1), pois ele é necessário para se saber se o escoamento é laminar ou turbulento, e como já explicado decidir o

procedimento do experimento, pois caso o escoamento seja laminar damos prosseguimento ao experimento, calculando o fator de atrito pela Eq. (5), a perda de carga do sistema através da Eq. (4) e vazão de Poiseuille condizente na Eq. (3). Mas caso o número de Reynolds indique um escoamento turbulento o teste se encerra.

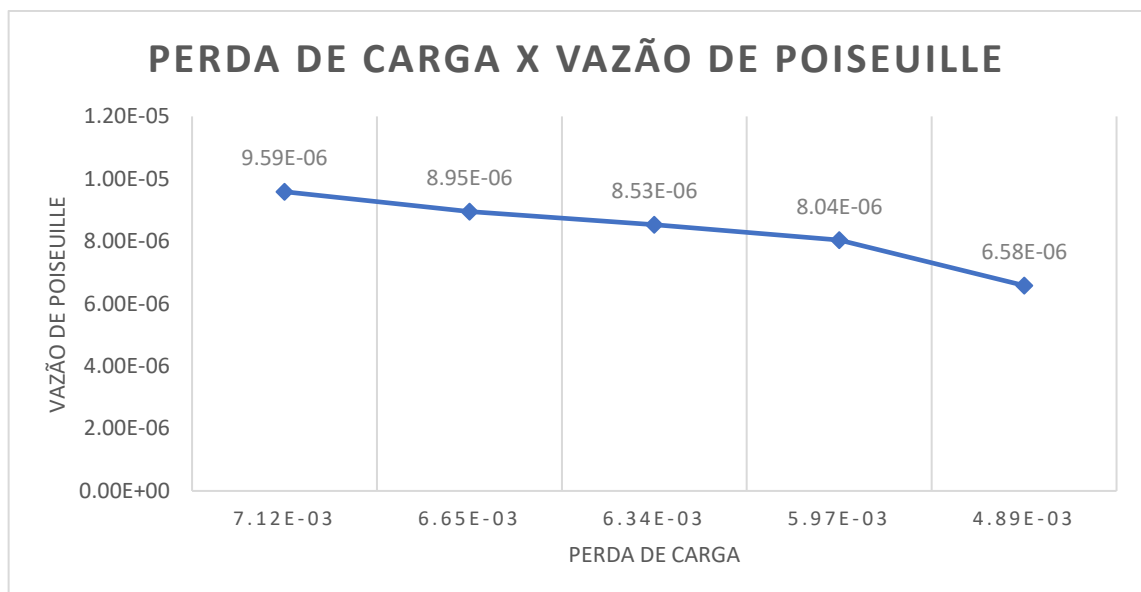
As tabelas (7) e (8) são os resultados das equações resolvidas, com a tabela (7) sendo a solução do ensaio 1, com a pouca abertura da válvula, e a tabela (8) mostrando os resultados para o ensaio 2, com as válvulas totalmente abertas. A figura. 29 por sua vez, representa um gráfico que relaciona a perda de carga com a vazão de Poiseuille para o ensaio 1, mostrando que a perda de carga é diretamente proporcional a vazão, já que na medida que perda de carga diminui, a vazão também diminui, o que se traduz que na medida que a vazão diminui o fator de atrito do fluido com o tubo aumenta.

**Tabela 7. Resultados finais do primeiro teste - Ensaio 1 de Poiseuille**

ENSAIO 1		
Velocidade	Número de Reynolds	Fator de atrito
0,257	1787,92	0,0358
0,239	1669,74	0,0383
0,229	1591,68	0,0402
0,215	1498,77	0,0427
0,176	1227,44	0,0521

Fonte: Autoria própria (2022)

**Figura. 29 Gráfico de comparação entre perda de carga x vazão de Poiseuille**



Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 8. Resultados finais do primeiro teste - Ensaio 2 de Poiseuille**

ENSAIO 2	
Velocidade	Número de Reynolds
0,384	2672,73
0,369	2567,57
0,345	2404,39
0,327	2278,47
0,303	2108,53

Fonte: Autoria própria (2022)

### 5.2.2 Segundo teste

Para a realização do segundo teste, os experimentos foram refeitos, dessa vez mantendo a haste variável em 50 cm e variando o diâmetro do tubo, foram realizados dois testes em cada tubo seguindo o mesmo procedimento do primeiro teste, em que foram impostas duas situações diferentes de vazão/abertura da válvula, com o ensaio 1 mostrando a válvula pouco aberta e o ensaio 2 sendo a válvula muito aberta.

A tabela (9) e (10) mostram os resultados aferidos para o segundo teste, sendo a tabela (9) para o tubo de 5 mm, e a tabela (10) para o tubo de 7 mm. Apresentando o tempo de cada escoamento. A vazão calculada pela Eq. (6). A velocidade determinada pela Eq. (7). O Número de Reynolds pela Eq. (1). Fator de atrito pela Eq. (8). A perda de carga representado hp, encontrada pela Eq. (9). E por fim a vazão de Poiseuille dada pela Eq. (10)

**Tabela 9: Segundo teste de Poiseuille para o tubo de 5 mm**

Tubo com diâmetro de 5 mm						
ENSAIO 1						
Tempo (s)	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Velocidade (m/s)	Número de Reynolds	Fator de atrito	hp	Vazão de Poiseuille (m <sup>3</sup> /s)
142,57	6,07.10 <sup>-6</sup>	0,309	1537,99	0,0416	0,0168	5,89.10 <sup>-6</sup>
ENSAIO 2						
Tempo (s)	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Velocidade (m/s)	Número de Reynolds	Fator de atrito	hp	Vazão de Poiseuille (m <sup>3</sup> /s)
119,81	7,22.10 <sup>-6</sup>	0,368	1830,16	0,0349	0,0200	7,01.10 <sup>-6</sup>

Fonte: Autoria própria (2022)

**Tabela 10: Segundo teste para o tubo de 7 mm**

Tubo com diâmetro de 7 mm						
ENSAIO 1						
Tempo (s)	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Velocidade (m/s)	Número de Reynolds	Fator de atrito	hp	Vazão Poiseuille (m <sup>3</sup> /s)
98,4	$8,79 \cdot 10^{-6}$	0,229	1591,69	0,0402	0,00634	$8,53 \cdot 10^{-6}$
ENSAIO 2						
Tempo (s)	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Velocidade (m/s)	Número de Reynolds	Fator de atrito	hp	Vazão Poiseuille (m <sup>3</sup> /s)
65,40	$1,32 \cdot 10^{-5}$	0,344	2394,83	0	0	0

Fonte: Autoria própria (2022)

### 5.3 BANCADA DE HIDROSTÁTICA

Os resultados aderentes da bancada de hidrostática se traduzem em mostrar pressões semelhantes em pontos de equilíbrio que tem a mesma altura, e para isso como citado na metodologia, foram feitos dois experimentos, ambos usando do teorema de Stevin expressado pela Eq. (3).

Para a realização do experimento como já discorrido, se utilizou dois manômetros, um em U e outro inclinado que foram submetidos a uma mesma pressão de um escoamento de ar, enquanto ambos os manômetros continham água dentro de seus reservatórios, e a partir do deslocamento que água sofreu dentro dos seus referidos manômetros podemos traduzir a pressão que foi exercido segundo a Eq. (3).

- Manômetro em U

**Figura. 30 Manômetro em U medição 52 mm**



Fonte: Autoria própria (2022)

Exercendo a pressão com uma bomba de ar nos tubos em T que ligam ambos os manômetros, o manômetro em U apresentou essa variação de altura igual 52 mm (0,052 m). Que pode se aplicar na Eq. (11) utilizando os valores de densidade da água de  $997 \text{ kg/m}^3$  e gravidade de  $9,81 \text{ m/s}^2$ , com  $P_B$  sendo a pressão atmosférica com o seu valor manométrico igual a zero. Portanto substituindo esses valores na equação, e encontrando um valor de pressão aplicado ao manômetro em U igual a 508,58 Pa ou 0,509 KPa.

- Manômetro inclinado

**Figura. 31 Manômetro inclinado (2)**



Fonte: Autoria própria (2022)

Para o manômetro inclinado os dados obtidos da bancada para solução da Eq. (12) foram.  $P_B$  a pressão atmosférica com o seu valor manométrico sendo zero;  $\rho$  a densidade da água de  $997 \text{ kg/m}^3$ ;  $g$  a gravidade de  $9,81 \text{ m/s}^2$ ;  $L$  a hipotenusa do triângulo inclinado igual a 23,6 cm (0,236 m);  $D$  o diâmetro do reservatório igual a 30 mm (0,03 m);  $d$  o diâmetro do tubo que ocorre a inclinação 8 mm (0,008 m). E  $\theta$  o ângulo formado da inclinação de  $10^\circ$ . Substituindo os valores na Eq. (12). Temos um valor de pressão aplicado no manômetro inclinado igual a 564,96 Pa ou 0,565 KPa.

Com sensibilidade do manômetro igual 4,08, calculado pela Eq. (13). Segundo Fox (2014) os parâmetros ideais para o desenvolvimento da sensibilidade de um manômetro são gravidade específica igual a 0,8, razão entre os diâmetros do reservatório e o diâmetro do tubo inclinado igual a 0,1 e ângulo do tubo inclinado de  $10^\circ$ . Totalizando assim uma sensibilidade de aproximadamente 6,01. Como na bancada estudada não foi possível trocar o fluido para se mudar a gravidade específica, a sensibilidade ficou abaixo do padrão desejado, o que pode acarretar a essa discrepância entre o valor calculado no manômetro em U e o valor calculado no tubo inclinado. Sendo que os valores geométricos ambos aferidos com equipamentos corretos e que o manômetro inclinado é mais preciso que o de tubo em U, pela geometria que o mesmo apresenta, sendo sujeito a leis de conservação de volume.

#### 5.4 BANCADA DE BERNOULLI

Os resultados dos experimentos realizados na bancada de Bernoulli, se foi feito três ensaios distintos para analisar a variação de velocidade e pressão que o sistema aderiu quando se variava as aberturas de válvula, em que o primeiro ensaio se manteve a válvula de entrada com uma abertura de 60°, e a de saída em torno de 30°, o segundo ensaio a válvula de entrada foi aberta em torno de 75°, e a de saída em torno de 45°, e o terceiro ensaio com uma abertura para a válvula de entrada em torno de 90°, e a de saída em torno de 45°, em que cada ensaio foi feito três vezes, e se foi coletado a altura média que cada tomada de pressão exercia para as variações nas válvulas, para assim utilizar a Eq. (16) e a Eq. (17) para determinar respectivamente a pressão e velocidade.

A tabela (11) configura as alturas médias em metros coletas de cada ensaio para cada um dos treze tubos piezômetros, a altura de perda de carga total medida pelo último tubo da tabela escalonada em metros e a pressão total de cada ensaio em Pascal.

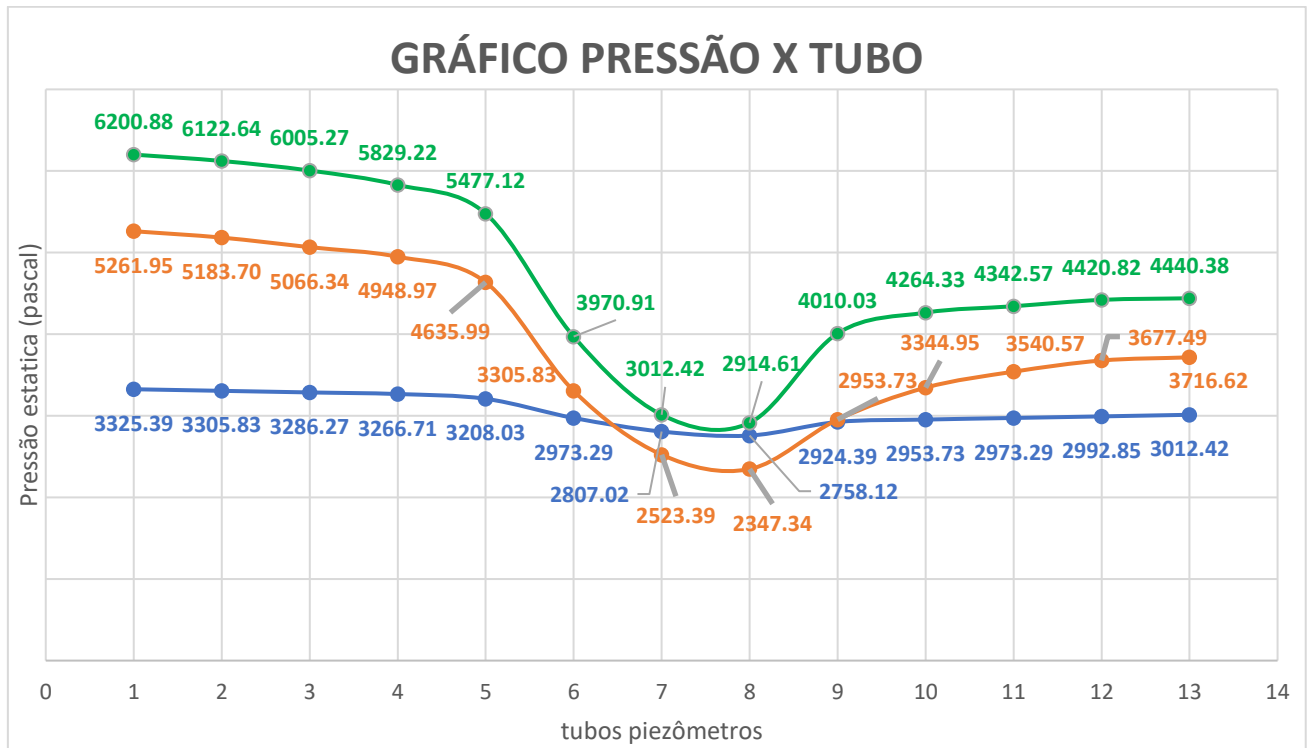
**Tabela 11: Resultados obtidos do teste realizado na bancada de Bernoulli**

	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
Tubos	Altura média (m)	Altura média (m)	Altura média (m)
1	0,34	0,538	0,634
2	0,338	0,53	0,626
3	0,336	0,518	0,614
4	0,334	0,506	0,596
5	0,328	0,474	0,56
6	0,304	0,338	0,406
7	0,287	0,258	0,308
8	0,282	0,24	0,298
9	0,299	0,302	0,41
10	0,302	0,342	0,436
11	0,304	0,362	0,444
12	0,306	0,376	0,452
13	0,308	0,38	0,454
Altura total (m)	0,346	0,546	0,636
Pressão total (Pa)	3384,08	5340,19	6220,44

Fonte: Autoria própria (2022)

A figura. 32 se apresenta como um gráfico de pontos que retrata como se comporta a pressão estática nos três ensaios para cada ponto do tubo de Venturi, calculada através da Eq. (16), onde a figura correlaciona os valores encontrados de pressão de cada ensaio em relação a cada tubo piezômetro do tubo Venturi, mostrando que a pressão cai na medida que se aproxima do centro do tubo. A linha azul representa a variação de pressão para o ensaio 1, a linha laranja para o ensaio 2 e a linha verde para o ensaio 3.

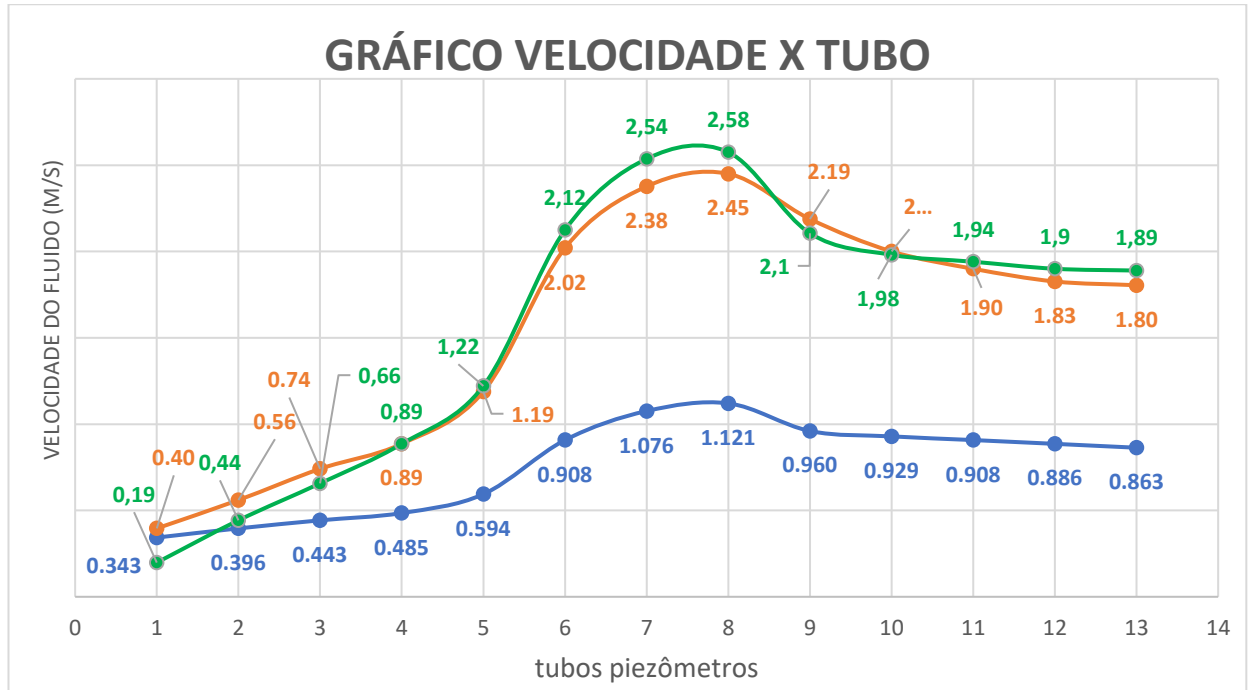
Figura. 32 Gráfico pressão x tubos piezômetros



Fonte: Autoria própria (2022)

Enquanto que na figura. 33 se tem o detalhamento de outro gráfico, onde o mesmo relaciona dessa vez a velocidade com as alturas de perda de carga, notando o inverso do proposto acima, sendo que a velocidade aumenta na medida que se aproxima do tubo de Venturi. Com relação lógica já que como as alturas diminuem quer dizer que o escoamento está sofrendo menos pressão, por esse motivo seu deslizar é mais suave, acarretando em velocidades maiores. A linha azul representa a variação de velocidade para o ensaio 1, a linha laranja para o ensaio 2 e a linha verde para o ensaio 3.

Figura. 33 Gráfico Velocidade x altura da coluna de liquido



Fonte: Autoria própria (2022)

## 6 CONCLUSÃO

Então concluiu-se ressaltando a importância que as bancadas experimentais tem para o aprendizado dos discentes, buscando expressar que cada assunto visto nas bancadas acima podem ser analisados em sala de aula de forma teórica, porém não tendo o mesmo peso de informação que visualizar presencialmente as variações, portanto o desenvolvimento de um roteiro de experimentação que possa auxiliar os alunos a trabalhar com as bancadas dissertadas acima, é de grande valia para a melhoria do aprendizado nos cursos de engenharia, na área de fluidos, pois o discente que chegar a ter contato com as presentes bancadas terá uma base de conhecimento a partir de como funciona e para que pode ser utilizado os equipamentos.

Em questão de conclusão dos ensaios realizados em cada bancada eles são importantes para a mecânica dos fluidos, como por exemplo na análise feita na bancada de Reynolds, onde se analisou a determinação de um escoamento entre laminar e turbulento, onde foi visto também que o fluxo variava dependendo do diâmetro do tubo e da vazão da válvula, com a variação sendo um escoamento mais turbulento para tubos de maior diâmetro com maior vazão.

Para a bancada de Poiseuille foi visto que alterações na altura de despejo da coluna de líquido e no diâmetro do tubo, causam alterações na perda de carga. De forma que para alturas e diâmetros maiores a perda de carga é maior. Ainda nessa bancada se analisou a equação de Poiseuille, cuja qual foi possível terminar a vazão segundo Poiseuille que levava em consideração o impacto da perda de carga no seu cálculo, deixando a vazão mais real.

A bancada de hidrostática por sua vez foi relevante para a análise de pressão em líquidos estáticos, onde a bancada ensinou como calcular a pressão de dois manômetros manuais, sendo possível notar que a sensibilidade de um manômetro inclinado é mais precisa que o manômetro em U.

A bancada de Bernoulli, mostrando a relevância da equação de conservação de energia para o experimento de Bernoulli, onde se foi visto a utilização e função do tubo de Venturi, e sendo analisado como sua variação de energia causa impacto na velocidade e pressão de cada ponto, vendo que na medida que uma tende a crescer, a outra tende a diminuir, na medida que ocorre variações do diâmetro interno.

## REFÊRENCIAS

EMIRICK, G. **Projeto e construção de uma bancada para estudos hidráulicos e hidrodinâmicos em unidades de fluxo contínuo**, 2019. Monografia (graduação em engenharia mecânica) – Instituto Federal do Espírito Santo, São Matheus, 2019.

GESKE, G. **Implementação de uma Bancada Experimental de um Sistema de Dois Tanques**, 2022. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em engenharia de controle e automação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, 2022.

COELHO, PEDRO. **Lei de Poiseuille e a Equação de Hagen-Poiseuille**, 2012. Disponível em: <<https://www.engquimicasantosp.com.br/2012/07/lei-de-poiseuille.html>>. Acesso em: 24, junho. 2022.

HORÁCIO E BRAVIANO. **Experimento de Reynolds**, 2014. Disponível em <<http://fenomenosdaengenharia.blogspot.com/2014/06/experimento-de-reynolds.html>>. Acesso em: 24, junho. 2022.

PUCCI, FÁBIO. **Lei de Stevin - Teoria e aplicações**, 2011. Disponível em <<https://educacao.uol.com.br/disciplinas/fisica/lei-de-stevin-teoria-e-aplicacoes.htm>>. Acesso em: 22, junho. 2022.

WHITE, F. **Mecânica Dos Fluidos**. 8. Ed. São Paulo. LTDA, 2018.

HIBBLER, R. **Mecânica Dos Fluidos**. 1. Ed. São Paulo. Pearson Education, 2016.

FOX et al (2014). **Introdução à mecânica dos fluidos**. 8. Ed. São Paulo. LTC. 2014.

BRUNETTI, F. **Mecânica dos fluidos**. 2. Ed. São Paulo. Pearson Education. 2008.

MORETTIN, P e BUSSAB, W. **Estatística básica**. 9. Ed. São Paulo. Saraiva. 2017

**GONÇALVES, J. Estudo e análise de uma bancada de mecânica dos fluidos localizada na universidade federal do Ceará – campus russas**, 2021. Trabalho de conclusão de curso (graduação em engenharia mecânica) – Universidade Federal do Ceará, Russas, 2021.

**GUIMARÃES, I. Desenvolvimento de roteiros de práticas no laboratório de fenômenos transporte usando uma bancada hidráulica**, 2019. Trabalho de conclusão de curso (graduação em Engenharia de Alimentos) Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2019.

**NOGARA, J. Projeto de uma bancada didática para determinar o número de Reynolds**, 2018. Trabalho de conclusão de curso (graduação em engenharia mecânica) Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Rio branco, 2019.



