



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS-DECEN  
BACHARELADO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

MANOEL JOSE DE CARVALHO NETO

**ESTIMATIVA DO FATOR DE ATRITO DE UM FLUIDO PELO MÉTODO  
DE DARCY-WEISBACH**

PAU DOS FERROS

2019

MANOEL JOSE DE CARVALHO NETO

**ESTIMATIVA DO FATOR DE ATRITO DE UM FLUIDO PELO MÉTODO  
DE DARCY-WEISBACH**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Examinadora do Curso de Ciência e Tecnologia, da Universidade Federal Rural do Semi-Árido em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Glaydson Francisco Barros de Oliveira

PAU DOS FERROS

2019

MANOEL JOSE DE CARVALHO NETO

**ESTIMATIVA DO FATOR DE ATRITO DE UM FLUIDO PELO MÉTODO  
DE DARCY-WEISBACH**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Examinadora do Curso Ciência e Tecnologia, da Universidade Federal Rural do Semi-Árido em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

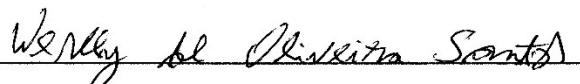
DEFENDIDA EM 11/12/2019

**BANCA EXAMINADORA:**



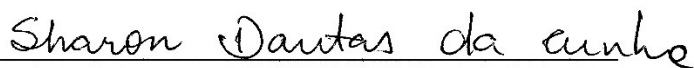
---

Prof. Dr. Glaydson Francisco Barros de Oliveira



---

Prof. Dr. Wesley de Oliveira Santos



---

Prof. Dr. Sharon Dantas da Cunha

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

N469e Neto, Manoel Jose de Carvalho.  
Estimativa do fator de atrito de um fluido  
pelo método de Darcy-Weisbach / Manoel Jose de  
Carvalho Neto. - 2019.  
47 f. : il.

Orientador: Glaydson Francisco Barros de  
Oliveira.  
Monografia (graduação) - Universidade Federal  
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e  
Tecnologia, 2019.

1. Perda de carga. 2. Regressão linear. 3.  
Número de Reynolds. 4. Erro experimental. I.  
Oliveira, Glaydson Francisco Barros de, orient.  
II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

*A minha querida mãe, a minha família, e  
aos amigos que me apoiaram ao longo desta  
caminhada.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pela saúde, força e determinação que ele me deu ao longo de toda a minha vida acadêmica.

Agradeço a minha mãe, minha rainha, Maria Audeci de Carvalho por todo seu amor, carinho e pelo esforço que compartilhamos para chegar à essa etapa importante da minha vida, e a toda minha família que sempre me acolheu e apoiou ao longo dessa jornada.

Agradeço ao meu orientador e grande amigo, Prof. Dr. Glaydson Francisco Barros de Oliveira, por tudo que fez por mim ao longo do meu curso, por ter me conduzido ao longo de toda a minha graduação, por sua paciência, responsabilidade, compromisso, e além de tudo por sua amizade.

Agradeço ao grande amigo, Prof. Dr. Otávio Paulino Lavor, por todo o apoio que me deu ao longo do meu curso, pelos conselhos, pelas dúvidas tiradas, e por sua dedicação como profissional educador.

Agradeço aos membros da banca examinadora, Prof. Wesley de Oliveira Santos e Prof. Sharon Dantas da Cunha, por dedicarem um pouco de seu tempo para o aperfeiçoamento deste trabalho.

Agradeço a todos os professores a quem tive a honra de ser aluno, em especial a, Hidalyn Mattos, Sharon Dantas, Diego Farias, Josy Ramos, Sanderlir Dias, Matheus Fernandes, Shirlene Carmo, Bruno Fontes, Ernandes Costa, Wagner Cavalcanti e Messias Fernandes. Obrigado a todos pelo conhecimento compartilhado.

Agradeço aos amigos de muito tempo que sempre me apoiaram profissionalmente, em especial a, Irineu Luís, Washington Luís, Jailson Souza, Francisco Queiroz, Nelson Bessa, Paulinere Lima, Raimundo Nunes, Osvaldo Lima, Isaías Lima e Eudimar Marinho.

Agradeço aos muitos amigos que fiz ao longo da minha graduação, em especial, Rocílio Bessa, Marcos Vinícios, Carlos Ítalo, Ronielbe Avelino, Joyce Teodoro, Monaliza Soares, Renata Rego, Rita de Cássia, Aury Paulino, Daiara Melquíades, Viviane Mirela, Gabryel Barros, Ricassily Lima, Amanda Beatriz, Anábíia Fernandes, Naiara Pereira, Lucas Linhares, Paulo Neto, Niedson Charles, Ruan Santana, Thiago Aquino, Fagner Resende, José Lira, Felipe Wiliam, Luiz Paulo, Bruno Fernandes, Bruna Fernandes, Fatima Alencar, Kaio Alencar, Cássio Alencar, Adriano Bezerra e muitos outros. Muito obrigado pela amizade e por todos os momentos compartilhados. Agradeço a todos que, direto ou indiretamente contribuíram com a realização do meu objetivo. Muito obrigado a todos!

*“Um sapo em um poço não conhece o grande oceano.”*

**Provérbio Japonês.**

## RESUMO

O fator de atrito para o escoamento em condutos forçados é um número adimensional de grande importância no dimensionamento de projetos hidráulicos em geral e sua determinação é feita em geral a partir do diagrama de Moody ou da equação de Colebrook. Este trabalho tem como objetivo estimar o fator de atrito ( $f$ ) durante a perda de carga contínua num aparato experimental desenvolvido com materiais de baixo custo. A análise de dados foi feita pelo software *Scilab*, onde a partir dos valores de perda de carga em função do comprimento, foi obtido por meio de regressão linear o coeficiente angular da equação de Darcy-Weisbach, que representa a perda de carga unitária do sistema e a partir dele podemos determinar o fator de atrito. O valor obtido de  $f$  foi bastante satisfatório quando comparado com a literatura, já que o experimento não foi realizado em laboratório, mas sim em uma rede comum de distribuição de água. O estudo mostra também que para diferentes velocidades de escoamento, o principal parâmetro de influência nas incertezas de medição é o número de Reynolds, sendo de suma importância seu conhecimento quando se trabalha com mecânica dos fluidos. Uma das dificuldades enfrentadas foi obter as condições necessárias à aplicação das equações, como por exemplo, obter um escoamento em regime permanente. Outra consideração é que, os dados da literatura também são em sua maioria baseados em dados empíricos, o que pode aumentar a margem de erro experimental.

**Palavras-chave:** Perda de carga. Regressão linear. Número de Reynolds. Erro experimental.



## ABSTRACT

The friction factor for flow in forced ducts is a dimensionless number of great importance in the sizing of hydraulic projects in general and its determination is generally made from the Moody diagram or the Colebrook equation. This work aims to estimate the friction factor ( $f$ ) during continuous pressure drop in an experimental apparatus developed with low cost materials. Data analysis was performed by the Scilab software, where, from the values of pressure loss as a function of length, the angular coefficient of the Darcy-Weisbach equation, which represents the unit pressure loss of the system, was obtained by linear regression. and from it we can determine the friction factor. The obtained  $f$  value was quite satisfactory when compared to the literature, since the experiment was not performed in the laboratory, but in a common water distribution network. The study also shows that for different flow velocities, the main parameter of influence on measurement uncertainties is the Reynolds number, and their knowledge when working with fluid mechanics is of paramount importance. One of the difficulties faced was to obtain the necessary conditions to apply the equations, such as obtaining a steady flow. Another consideration is that literature data are also mostly based on empirical data, which may increase the experimental margin of error.

**Keywords:** Cargo loss. Linear regression. Reynolds number. Experimental error.

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|        |                                          |
|--------|------------------------------------------|
| LE     | Linha de Energia                         |
| LP     | Linha Piezométrica                       |
| NR     | Nível de Referência                      |
| PVC    | Policloreto de Vinila                    |
| SI     | Sistema Internacional de Unidades        |
| UFERSA | Universidade Federal Rural do Semi-Árido |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Rugosidade absoluta de alguns materiais empregados na fabricação de tubos industriais. ....    | 21 |
| Tabela 2: Materiais e ferramentas usados na montagem do aparato. ....                                    | 31 |
| Tabela 3: Dimensões das peças em madeira do aparato.....                                                 | 31 |
| Tabela 4: Valores do tempo que o recipiente levou para encher completamente, obtidos de 4 aferições..... | 42 |
| Tabela 5: Valores de perda de carga em função do comprimento obtidos com uso do aparato. ....            | 43 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: As tensões de cisalhamento causam deformações tangenciais contínuas em um fluido. ....                                                                                                                                                                                                     | 14 |
| Figura 2: A condição de não escorregamento em escoamento de água sobre uma placa fina fixa. O escoamento superior é turbulento; o escoamento inferior é laminar. O perfil de velocidades torna-se visível por uma linha de bolhas de hidrogênio descarregadas por um fio através do escoamento. .... | 16 |
| Figura 3: Regimes de escoamento de um gás.....                                                                                                                                                                                                                                                       | 17 |
| Figura 4: Conservação da massa em um escoamento incompressível não viscoso.....                                                                                                                                                                                                                      | 18 |
| Figura 5: Representação da rugosidade absoluta em tubulações.....                                                                                                                                                                                                                                    | 21 |
| Figura 6: Linha de Energia e Linha Piezométrica ao longo de um escoamento. ....                                                                                                                                                                                                                      | 23 |
| Figura 7: Diagrama de Moody.....                                                                                                                                                                                                                                                                     | 26 |
| Figura 8: Representação da perda de carga em um comprimento L de tubulação. ....                                                                                                                                                                                                                     | 28 |
| Figura 9: Aparato construído para medição da perda de carga dos diversos comprimentos de tubo. ....                                                                                                                                                                                                  | 30 |
| Figura 10: Esquema de montagem das peças em madeira. ....                                                                                                                                                                                                                                            | 32 |
| Figura 11: Representação da base do aparato e suas dimensões. ....                                                                                                                                                                                                                                   | 32 |
| Figura 12: Base do aparato finalizada. ....                                                                                                                                                                                                                                                          | 33 |
| Figura 13: Esquema de montagem das peças hidráulicas do aparato.....                                                                                                                                                                                                                                 | 33 |
| Figura 14: Materiais utilizados para construção das tomadas de pressão. ....                                                                                                                                                                                                                         | 34 |
| Figura 15: Extremidade da tomada de pressão preparada para colagem.....                                                                                                                                                                                                                              | 34 |
| Figura 16: Mangueira flexível da tomada de pressão após a colagem. ....                                                                                                                                                                                                                              | 35 |
| Figura 17: Braçadeira metálica fixada à tomada de pressão. ....                                                                                                                                                                                                                                      | 35 |
| Figura 18: Detalhe do furo feito para encaixar a mangueira piezométrica. ....                                                                                                                                                                                                                        | 36 |
| Figura 19: Bucha plástica em PVC usada para fixação das mangueiras piezométricas.....                                                                                                                                                                                                                | 36 |
| Figura 20: Tomada de pressão finalizada. ....                                                                                                                                                                                                                                                        | 37 |
| Figura 21: Vista interna da tubulação com a mangueira passando de forma incorreta. ....                                                                                                                                                                                                              | 37 |
| Figura 22: Detalhe do interior da tubulação após cortar o excesso de mangueira e lixar. ....                                                                                                                                                                                                         | 38 |

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 23: Tubulação para entrada de água no aparato. ....                     | 39 |
| Figura 24: Tubulação de saída de água do aparato.....                          | 39 |
| Figura 25: Braçadeira para fixação das mangueiras piezométricas.....           | 40 |
| Figura 26: Mangueiras piezométricas montadas no aparato. ....                  | 40 |
| Figura 27: Aparato finalizado sendo testado. ....                              | 41 |
| Figura 28: Detalhe da diferença de nível entre as mangueiras .....             | 41 |
| Figura 29: Interface gráfica do <i>Moody Chart Calculator</i> . ....           | 43 |
| Figura 30: Interface gráfica do <i>Scilab</i> . ....                           | 44 |
| Figura 31: Gráfico da equação 7.26 com os respectivos pontos da tabela 5. .... | 45 |

## SUMÁRIO

|                                                                  |           |
|------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                                        | <b>12</b> |
| <b>2 CONCEITOS BÁSICOS DA MECÂNICA DOS FLUIDOS .....</b>         | <b>13</b> |
| <b>2.1 Definição .....</b>                                       | <b>13</b> |
| <b>2.2 Propriedades dos Fluidos .....</b>                        | <b>13</b> |
| 2.2.1 Massa Específica e Peso Específico.....                    | 14        |
| 2.2.2 Viscosidade Dinâmica.....                                  | 14        |
| 2.2.3 Condição de Não Escorregamento .....                       | 15        |
| <b>2.3 Regimes de Escoamentos de Fluidos .....</b>               | <b>16</b> |
| 2.3.1 Escoamento Laminar e Turbulento .....                      | 16        |
| 2.3.2 Escoamento em Regime Permanente .....                      | 17        |
| <b>3 ESCOAMENTO INCOMPRESSÍVEL DE FLUIDOS NÃO VISCOSOS .....</b> | <b>18</b> |
| <b>3.1 Equação da Continuidade.....</b>                          | <b>18</b> |
| <b>3.2 Conservação de Energia e Equação de Bernoulli .....</b>   | <b>19</b> |
| <b>4 ESCOAMENTO VISCOSO EM TUBULAÇÕES .....</b>                  | <b>20</b> |
| <b>4.1 Número de Reynolds.....</b>                               | <b>20</b> |
| <b>4.2 Rugosidade Relativa de Tubulações.....</b>                | <b>21</b> |
| <b>4.3 Linha Piezométrica (LP) e Linha de Energia (LE).....</b>  | <b>22</b> |
| <b>4.4 Equação da Energia.....</b>                               | <b>23</b> |
| <b>4.5 Perda de Carga.....</b>                                   | <b>24</b> |
| 4.5.1 Perda de Carga Contínua.....                               | 25        |
| 4.5.2 Perda de Carga Localizada .....                            | 25        |
| <b>4.6 Métodos Para Obtenção do Fator de Atrito .....</b>        | <b>25</b> |
| 4.6.1 Diagrama de Moody.....                                     | 26        |
| 4.6.2 Equação de Colebrook-White .....                           | 27        |
| 4.6.3 Equação de Haaland.....                                    | 27        |
| <b>5 METODOLOGIA.....</b>                                        | <b>28</b> |
| <b>5.1 Descrição do Fator de Atrito.....</b>                     | <b>28</b> |
| <b>5.2 Procedimento Experimental .....</b>                       | <b>29</b> |

|                                                              |           |
|--------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>6 DESCRIÇÃO DA MONTAGEM DO APARATO EXPERIMENTAL .....</b> | <b>30</b> |
| <b>6.1 Materiais e Ferramentas .....</b>                     | <b>30</b> |
| <b>6.2 Construção da Base do Aparato .....</b>               | <b>31</b> |
| <b>6.3 Construção das Tomadas de Pressão .....</b>           | <b>33</b> |
| <b>7 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                        | <b>42</b> |
| <b>8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>                           | <b>46</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                      | <b>47</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Sistemas de tubulação estão presentes em praticamente todos os projetos de engenharia, desde instalações prediais, barragens, adutoras, oleodutos, máquinas termodinâmicas, entre outros. Na prática é possível encontrar várias situações distintas de projeto, como por exemplo, o tipo de fluido transportado, a velocidade de escoamento, o diâmetro da tubulação e seu material de fabricação, a temperatura do fluido, diferença de nível entre os pontos do escoamento, o comprimento total da tubulação e os diferentes tipos de acessórios empregados.

O problema básico das tubulações é o seguinte: dada a geometria dos tubos e de seus componentes adicionais (tais como válvulas, curvas e difusores) mais a vazão desejada para o escoamento e as propriedades do fluido, qual é a diferença de pressão necessária para manter o escoamento? O problema, é claro, pode ser formulado de outra maneira: dada a diferença de pressão mantida, digamos, por uma bomba, que vazão irá ocorrer? (WHITE, 2011, p.353).

Na concepção de um projeto hidráulico, deve-se levar em consideração a dissipação de energia ao longo do escoamento, conhecida como perda de carga, causada por diversos fatores, tais como, o atrito do fluido com as paredes da tubulação, velocidade de escoamento, turbulência, entre outros, que são responsáveis pela perda de carga contínua ao longo de um escoamento. A perda de carga do sistema pode ser determinada a partir da equação de Darcy-Weisbach, que tem como variável o comprimento total da tubulação e o seu o fator de atrito.

O fator de atrito é um número adimensional que mensura a proporcionalidade entre a perda de carga, os parâmetros de dimensionamento da tubulação e a velocidade. Sua determinação pode ser realizada por meio de equações iterativas, diretas ou por métodos gráficos, como função do número de Reynolds e da rugosidade relativa da tubulação.

Atualmente no mercado existem bancadas didáticas experimentais de alta tecnologia, que permitem a realização de diversos experimentos relacionados ao escoamento de fluidos. Entre eles podemos destacar: determinação das perdas de carga contínua e localizada, associação de bombas centrífugas em série e paralelo, medições de vazão, escoamento em canal aberto, escoamento em orifícios, entre outros. Esses kits permitem que resultados experimentais possam ser facilmente ampliados para os casos reais de escoamento, sendo de grande utilidade na elaboração de projetos de engenharia hidráulica.

Partindo deste contexto, este trabalho tem como principal objetivo estimar o fator de atrito para um escoamento de um fluido newtoniano de baixa viscosidade, por regressão linear com dados obtidos a partir da leitura da perda de carga  $H_f$  obtida por um aparato desenvolvido com materiais de baixo custo, para cada comprimento de tubo testado.



## 2 CONCEITOS BÁSICOS DA MECÂNICA DOS FLUIDOS

### 2.1 Definição

O ramo da física que estuda os fluidos e as leis que regem seu comportamento, é a Mecânica dos Fluidos.

Mecânica dos fluidos é definida como a ciência que trata do comportamento dos fluidos em repouso (estática dos fluidos) ou em movimento (dinâmica dos fluidos) e da interação entre fluidos e sólidos ou outros fluidos nas fronteiras. A mecânica dos fluidos também é chamada de dinâmica dos fluidos, considerando os fluidos em repouso como um caso especial de movimento com velocidade zero (CENGEL E CIMBALA, 2012, p.2).

Seus conceitos são de fundamental importância em vários ramos da engenharia, destacando-se por exemplo, projeto de bombas e turbinas, sistemas pneumáticos, canais de irrigação e drenagem, barragens, sistemas de abastecimento de água, turbinas eólicas, entre outros.

Por ser um ramo da mecânica é de se esperar que o escoamento de fluidos satisfaça um conjunto de leis fundamentais, como as leis de Newton, porém é uma área de análise bastante complexa. Parte dessa complexidade se dá ao fato de que muitos dados e constantes foram determinados com base em métodos empíricos.

As equações básicas do movimento dos fluidos são muito difíceis para permitir ao analista estudar configurações geométricas arbitrárias. Assim, a maioria dos livros-texto se concentra em placas planas, tubos circulares e outras geometrias simples. É possível aplicar técnicas numéricas computacionais a geometrias complexas, e há atualmente, livros-texto especializados para explicar as novas aproximações e métodos da dinâmica dos fluidos computacionais (WHITE, 2011, p.15).

### 2.2 Propriedades dos Fluidos

De acordo com Munson, Young e Okiishi (2004), fluidos são substâncias que se deformam continuamente quando sujeitos a uma tensão de cisalhamento qualquer. Os fluidos podem ser divididos em líquidos e gases, onde a principal diferença entre eles é que os líquidos são praticamente incompressíveis, ao passo que os gases são compressíveis e muitas vezes devem ser assim tratados. Entre algumas propriedades dos fluidos podemos destacar.

### 2.2.1 Massa Específica e Peso Específico

A massa específica de um fluido é definida pela eq. 2.1 como a massa ( $m$ ) por unidade de volume ( $\forall$ ).

$$\rho = \frac{m}{\forall} \quad (2.1)$$

A massa específica é dada (no SI) em unidade de massa por unidade de volume, que no S.I fica  $kg/m^3$ .

O peso específico de um fluido ( $\gamma$ ), é o peso por unidade de volume.

$$\gamma = \rho g \quad (2.2)$$

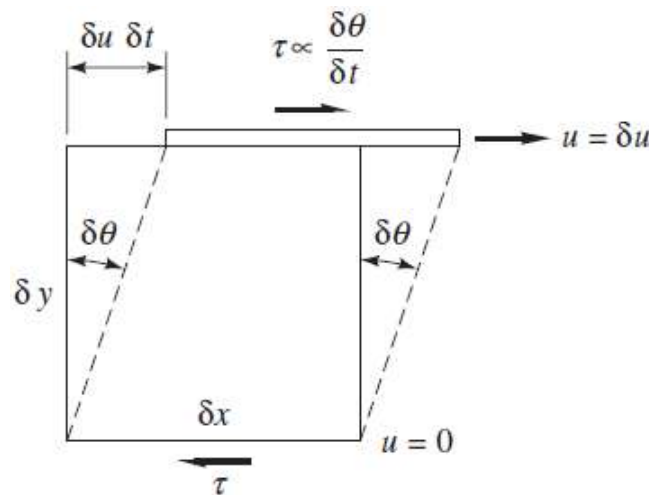
Onde  $g$  é a aceleração gravitacional. O peso específico é dado em  $N/m^3$ .

### 2.2.2 Viscosidade Dinâmica

Munson, Young e Okiishi (2004) afirmam que, propriedades como massa específica ou peso específico não são suficientes para caracterizar o comportamento de um fluido, porque mesmo os fluidos que apresentam valores aproximados de peso específico, podem se comportar de forma bem distinta ao escoar. A viscosidade é uma das propriedades de maior influência nas características mecânicas de um fluido, pois é uma medida quantitativa da resistência de um fluido ao escoamento.

Considere um elemento de fluido sujeito a uma tensão de cisalhamento  $\tau$ , como mostra a figura 1, o ângulo de deformação  $\delta\theta$  cresce continuamente com o tempo enquanto a tensão for mantida.

Figura 1: As tensões de cisalhamento causam deformações tangenciais contínuas em um fluido.



Fonte: White (2011).

A placa sob o fluido se move com uma velocidade constante  $\delta u$ . Para fluidos newtonianos, a tensão de cisalhamento é proporcional a taxa de deformação

$$\tau \propto \frac{\delta \theta}{\delta t} \quad (2.3)$$

De acordo com a geometria da figura 1,

$$\tan \delta \theta = \frac{\delta u \delta t}{\delta y} \quad (2.4)$$

Para ângulos muito pequenos,  $\tan \delta \theta \approx \delta \theta$ , logo, tomando o limite da variação infinitesimal, obtém-se

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dy} \quad (2.5)$$

Como mostra a eq. 2.3, a tensão de cisalhamento em fluidos newtonianos é proporcional ao gradiente de velocidade, onde a constante de proporcionalidade é a viscosidade dinâmica ( $\mu$ ) do fluido, assim chega-se na seguinte relação:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.6)$$

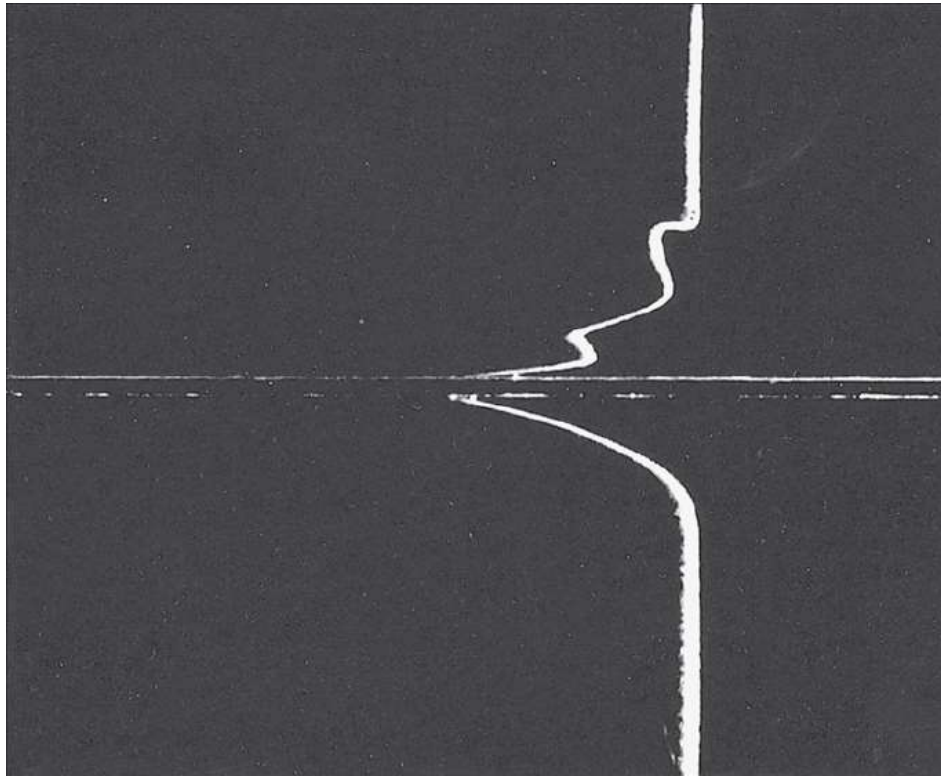
Uma interpretação da eq. 2.6 é que, a viscosidade dos fluidos pode ser interpretada como o coeficiente de atrito para os sólidos. Ela determina a taxa de deformação do fluido que é gerada pela aplicação de uma dada tensão de cisalhamento.

### 2.2.3 Condição de Não Escorregamento

Segundo Cengel e Cimbala (2012), é de grande importância compreender as interações de um fluido com as superfícies que limitam seu escoamento. Experimentos mostram que um fluido em contato direto com um sólido gruda na superfície devido aos efeitos viscosos. Em outras palavras, um fluido escoando sobre uma superfície qualquer, como mostra a figura 2, tem velocidade zero na camada de contato com a mesma. Tal princípio é conhecido como condição de não escorregamento.

Quando um escoamento de fluido é limitado por uma superfície sólida, as interações moleculares fazem o fluido, em contato com a superfície, buscar o equilíbrio de quantidade de movimento e energia com tal superfície. Todos os líquidos estão essencialmente em equilíbrio com as superfícies de contato. Todos os gases também estão, exceto em condições muito rarefeitas (WHITE, 2011, p.49).

Figura 2: A condição de não escorregamento em escoamento de água sobre uma placa fina fixa. O escoamento superior é turbulento; o escoamento inferior é laminar. O perfil de velocidades torna-se visível por uma linha de bolhas de hidrogênio descarregadas por um fio através do escoamento.



Fonte: White (2011).

## 2.3 Regimes de Escoamentos de Fluidos

O escoamento de fluidos pode ocorrer de forma bastante suave, como em um bastão de mel, ou de forma muito caótica, como por exemplo, em uma cachoeira ou um vertedouro de uma usina hidrelétrica. Além disso, dependendo da situação, a velocidade de escoamento pode variar ao longo do tempo.

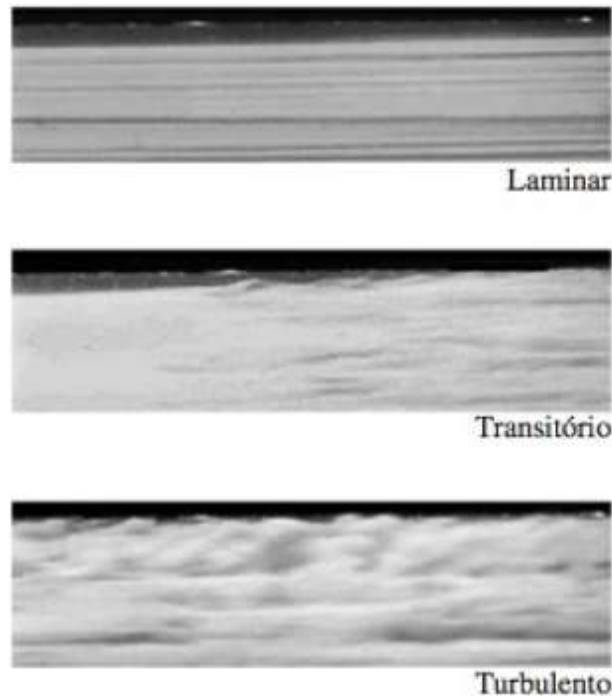
### 2.3.1 Escoamento Laminar e Turbulento

De acordo com Cengel e Cimbala (2012), escoamento laminar é o movimento altamente ordenado dos fluidos, caracterizado por camadas suaves que se sobrepõem. Uma característica desse tipo de escoamento é que uma partícula qualquer do fluido sempre vai percorrer um caminho sobre a mesma linha de corrente.

Como pode ser visto na figura 3, escoamentos turbulentos são caracterizados pelo movimento desordenado das partículas fluidas em todas as direções. A maioria dos problemas

reais envolve o escoamento turbulento, o que os torna bastante difíceis de se analisar. A presença ou não de turbulência tem influência direta nas características energéticas do sistema, pois quanto mais desordenado for o escoamento, mais energia é dissipada pelas colisões entre as moléculas do fluido.

Figura 3: Regimes de escoamento de um gás.



Fonte: Cengel e Cimbala (2012).

### 2.3.2 Escoamento em Regime Permanente

Um fluido escoando em regime permanente, deve necessariamente apresentar (para um determinado ponto do sistema) as mesmas propriedades ao longo do tempo. Em outras palavras, as propriedades do fluido podem variar entre dois locais do sistema, porém devem permanecer constantes para um mesmo local.

Diversos dispositivos, como turbinas, compressores, caldeiras, condensadores e trocadores de calor operam durante longos períodos de tempo sob as mesmas condições e são classificados como dispositivos de escoamento em regime permanente (CENGEL E CIMBALA, 2012, p.11).

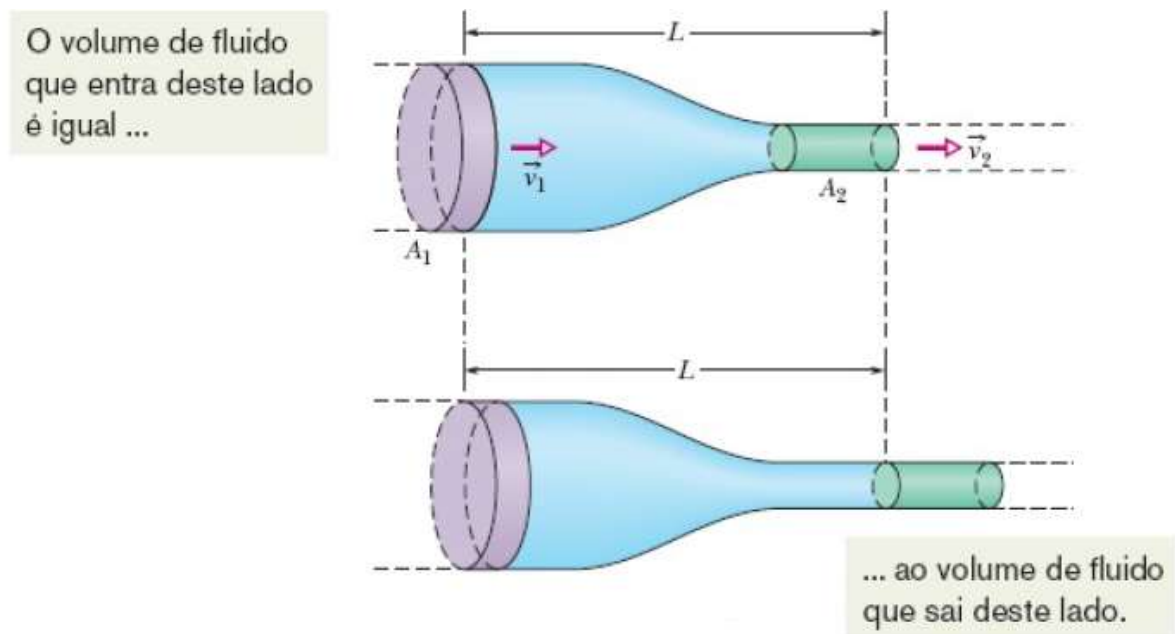
### 3 ESCOAMENTO INCOMPRESSÍVEL DE FLUIDOS NÃO VISCOSOS

O escoamento de fluidos em algumas situações pode ser descrito por simples modelos idealizados. De acordo com Young e Freedman (2008) um fluido ideal é um fluido incompressível, ou seja, aquele cuja densidade não varia, e sem viscosidade, propriedades que podem ser desprezadas em comparação às diferenças de pressão e forças oriundas da ação da gravidade.

#### 3.1 Equação da Continuidade

Para fluidos incompressíveis a massa específica não varia ao longo do escoamento, ou seja, se considerarmos uma tubulação com duas seções de áreas diferentes, como mostra a figura 4, o volume de fluido que entra na seção 1 deve ser igual ao volume que sai na seção 2, logo, em qualquer ponto da tubulação deve-se ter a mesma vazão ( $Q$ ), esse é o princípio de conservação da massa.

Figura 4: Conservação da massa em um escoamento incompressível não viscoso.



Fonte: Halliday e Resnick (2016).

A equação que relaciona as diferentes seções e velocidades de escoamento em uma tubulação é conhecida como equação da continuidade.

$$Q = \rho A_1 V_1 = \rho A_2 V_2 \quad (3.1)$$

Onde  $A_1$  e  $A_2$  são as áreas da seção de escoamento nos pontos 1 e 2, respectivamente. Analogamente,  $V_1$  e  $V_2$  são as velocidades nos pontos 1 e 2. A vazão volumétrica é dada em unidade de  $m^3/s$ , enquanto a vazão mássica é dada em  $kg/s$ .

### 3.2 Conservação de Energia e Equação de Bernoulli

Um escoamento é, simplesmente, a movimentação de um fluido de local para outro, estabelecendo uma vazão e um fluxo de massa. O escoamento pode acontecer naturalmente devido à diferença de nível entre dois pontos, como acontece em um rio ou um canal, ou de forma forçada, como no bombeamento de água de uma represa para uma caixa d'água de abastecimento de uma cidade.

A equação de Bernoulli é uma importante ferramenta matemática que permite expressar as energias cinética, energia potencial e energia de pressão, ou seja, ela trata de um balanço da energia mecânica do fluido e da sua conservação ao longo de um escoamento.

$$P + \rho gz + \frac{1}{2}\rho V^2 = \text{constante} \quad (3.2)$$

Onde  $P$ ,  $V$ ,  $z$ , são, respectivamente, a pressão, velocidade de escoamento, e altura em relação a um referencial.

A equação de Bernoulli afirma que durante o escoamento em regime permanente com atrito desprezível, as diversas formas de energia mecânica são convertidas entre si, mas sua soma permanece constante. Em outras palavras, não há dissipação de energia mecânica durante tais escoamentos, uma vez que não há atrito que converta a energia mecânica em energia térmica sensível (interna) (CENGEL E CIMBALA, 2012, p.163-164).

Para aplicar a equação de Bernoulli é importante entender suas restrições e limitações de uso. Algumas considerações são que, o escoamento deve ser laminar, em regime permanente, incompressível, e sem nenhuma forma de atrito (fluido não viscoso), ou seja, não deve existir nenhuma forma de dissipação ou perdas energéticas. Além disso, o sistema analisado não deve possuir nenhuma máquina de fluxo como bombas e turbinas. Podemos analisar esses sistemas considerando apenas a energia na forma mecânica, desconsiderando o atrito, que é responsável pelas perdas na forma de calor.

## 4 ESCOAMENTO VISCOSO EM TUBULAÇÕES

Um importante problema prático de engenharia ocorre no escoamento de fluidos em sistemas de tubulações, que podem apresentar vários diâmetros e materiais de fabricação, diferentes velocidades e regimes de escoamento, além de diversos acessórios, como válvulas, registros, curvas, entre outros. O atrito entre o fluido e as paredes da tubulação está diretamente relacionado com a perda de energia no escoamento.

As características da tubulação, a quantidade de acessórios e seu tipo, são os fatores que influenciam diretamente a perda de carga do sistema. O conhecimento sobre escoamentos viscosos em sistemas de tubulação é de grande importância no dimensionamento de máquinas de fluxo, como bombas, turbinas e ventiladores.

A maioria dos fluidos, particularmente os líquidos, são transportados em tubos circulares. Isso acontece porque os tubos com uma seção transversal circular podem suportar grandes diferenças de pressão entre o interior e o exterior sem sofrer distorção significativa (CENGEL E CIMBALA, 2012, p.278).

### 4.1 Número de Reynolds

O Número de Reynolds é um valor adimensional relacionado ao regime de escoamento de um fluido, sendo usado no dimensionamento de projetos hidráulicos. De acordo com Cengel e Cimbala (2012) a transição do escoamento laminar para turbulento depende da geometria, da rugosidade da superfície, da velocidade de escoamento, da temperatura da superfície, entre outros fatores.

Após experimentos exaustivos na década de 1880, Osborne Reynolds descobriu que o regime de escoamento depende principalmente da relação entre as forças inerciais e as forças viscosas do fluido (CENGEL E CIMBALA, 2012, p.279).

O Número de Reynolds ( $Re$ ) é expresso por,

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (4.1)$$

Onde,  $\rho$  é a massa específica,  $V$  é a velocidade média de escoamento,  $D$  é o diâmetro interno da tubulação e  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido.

Através do número de Reynolds podemos determinar se um escoamento é laminar, turbulento, ou de transição, onde os regimes laminar e turbulento se trocam de forma aleatória entre si. Para Cengel e Cimbala (2012), os regimes de escoamento são determinados pelos seguintes intervalos de  $Re$ :

**Laminar -  $Re \leq 2300$ ;**

**Transitório -  $2300 \leq Re \leq 4000$ ;**



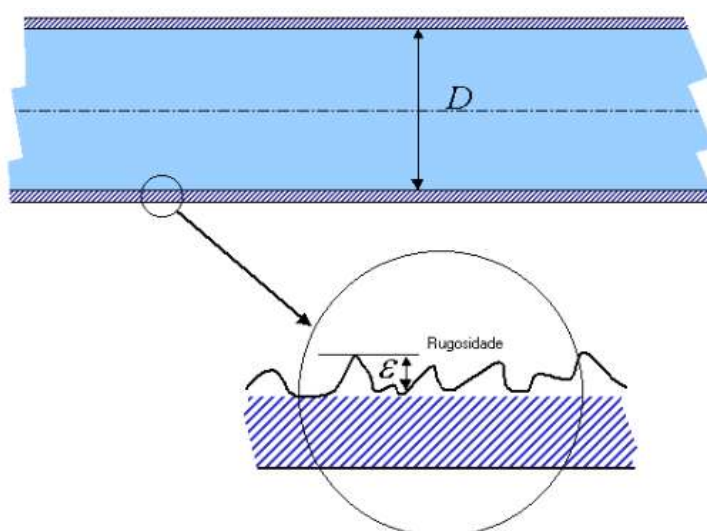
### Turbulento - $Re \geq 4000$

Para critérios de cálculo, já se considera um regime de escoamento turbulento a partir de valores de  $Re$  entre 2300 e 2400.

#### 4.2 Rugosidade Relativa de Tubulações

Todo material, por mais liso polido que seja, possui uma pequena rugosidade, veja na figura 5. Em tubos, a rugosidade é responsável pelo atrito do fluido com as paredes do mesmo, provocando a perda de energia mecânica (perda de carga) ao longo do escoamento. A rugosidade absoluta ( $\varepsilon$ ), como pode ser visto na tabela 1, depende do tipo de material empregado na tubulação.

Figura 5: Representação da rugosidade absoluta em tubulações.



Fonte: Villar (2011).

Tabela 1: Rugosidade absoluta de alguns materiais empregados na fabricação de tubos industriais.

| Material                            | Rugosidade absoluta $\varepsilon$ (mm) |
|-------------------------------------|----------------------------------------|
| Aço revestido com asfalto quente    | 0,3 a 0,9                              |
| Aço enferrujado                     | 0,4 a 0,6                              |
| PVC e Cobre                         | 0,015                                  |
| Cimento-amianto novo                | 0,05 a 0,1                             |
| Ferro galvanizado novo, sem costura | 0,06 a 0,15                            |
| Ferro fundido com crostas           | 1,5 a 3,0                              |
| Aço muito enferrujado               | 0,9 a 2,4                              |

Fonte: Adaptado de Villar (2011).

A rugosidade relativa ( $e$ ), por sua vez, é a razão entre a rugosidade absoluta e o diâmetro da tubulação.

$$e = \frac{\varepsilon}{D} \quad (4.2)$$

Tanto  $\varepsilon$  quanto  $D$  são expressos em unidade de comprimento (em milímetros), de forma que a rugosidade relativa ( $e$ ) é um valor adimensional.

### 4.3 Linha Piezométrica (LP) e Linha de Energia (LE)

É de bastante utilidade representar o nível de energia mecânica graficamente usando alturas para facilitar a visualização dos termos da equação de Bernoulli. Para isso dividimos cada termo da equação 3.2 por  $\rho g$  para obter

$$\frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z = H \quad (4.3)$$

Os termos da equação 4.3 tem dimensão de comprimento, onde cada um deles representa um tipo de carga existente ao longo do escoamento em uma linha de corrente.

$P/\rho g$  é a carga de pressão, que representa a altura de uma coluna de fluido que produz uma pressão estática  $P$ .  $V^2/2g$  é a carga de velocidade, representando a elevação necessária para que um fluido atinja a velocidade  $V$  durante a queda livre sem atrito.  $z$  é a carga de altura, ela representa a parcela de energia potencial do fluido. Logo,  $H$  é a carga total do escoamento.

Assim, a equação de Bernoulli pode ser expressa em termos de cargas como: a soma das cargas da pressão, velocidade e elevação ao longo de uma linha de corrente é constante durante o escoamento em regime permanente, quando a compressibilidade e os efeitos de atrito são desprezíveis (CENGEL E CIMBALA, 2012, p.167).

A linha que representa a soma da pressão estática e as cargas da elevação é chamada de linha piezométrica (LP). Seu valor em um ponto qualquer ao longo do escoamento é dado por

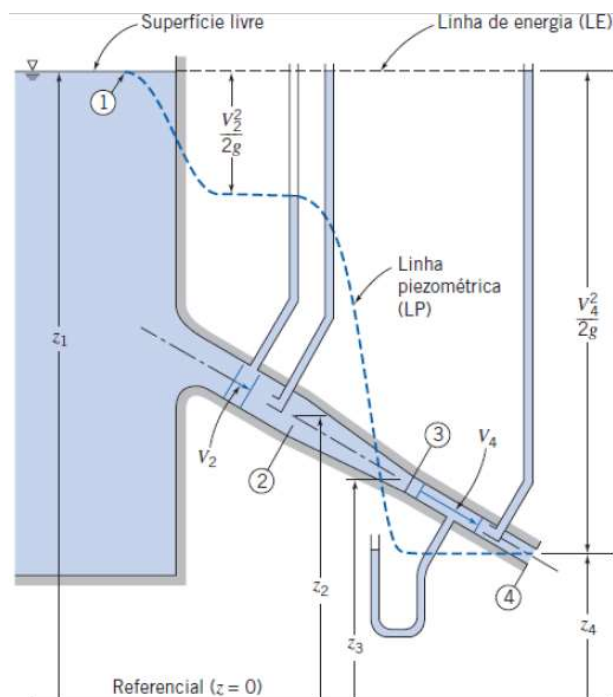
$$LP = \frac{P}{\rho g} + z \quad (4.4)$$

A linha que representa a carga total do fluido é chamada de linha de energia (LE), dada por,

$$LE = \frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z \quad (4.5)$$

De acordo com Cengel e Cimbala (2012), a linha piezométrica de um escoamento é obtida instalando-se vários piezômetros ao longo do tubo, desenhando uma linha através dos níveis de líquido dos piezômetros. Onde a distância vertical acima do centro do tubo é uma medida da pressão em seu interior, como mostra a figura 6.

Figura 6: Linha de Energia e Linha Piezométrica ao longo de um escoamento.



Fonte: Fox, Mcdonald e Pritchard (2015).

Munson, Young e Okiishi (2004) afirmam que, a linha de energia representa a carga total disponível no fluido, que pode ser obtida a partir da pressão de estagnação (estática e dinâmica) medida com um tubo de Pitot. Assim, a pressão de estagnação fornece uma medida da carga (ou energia) total do escoamento. De acordo com a figura 6, a diferença entre as alturas da linha de energia e piezométrica é dada pela carga dinâmica ( $V^2/2g$ ), logo.

$$LE - LP = \frac{V^2}{2g} \quad (4.6)$$

#### 4.4 Equação da Energia

A equação de Bernoulli é uma das ferramentas mais práticas para resolução de problemas envolvendo escoamento de fluidos, porém sua aplicação é restrita a modelos idealizados que tratam de fluidos ideais, e a inexistência de atrito ou perdas de energia. Seu uso torna-se inviável em problemas reais de engenharia, onde devemos levar todos os fatores que ocasionam as perdas. Para isso é desenvolvida uma nova relação que envolve além das variáveis pressão, velocidade e altura, o trabalho de eixo realizado no sistema  $w_{eixo}$  (constituído por bombas ou turbinas) e as perdas de energia ao longo do escoamento. Essa relação é conhecida como equação da energia, que para escoamentos em regime permanente pode ser escrita como um balanço da energia mecânica dada por,

$$\left(\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1\right) - \left(\frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2\right) + w_{eixo} = e_{mec,perda} \quad (4.7)$$

Observando que  $w_{eixo} = w_{bomba} - w_{turbina}$ , a equação da energia pode ser escrita de forma mais explícita como,

$$\left(\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1\right) + w_{bomba} - \left(\frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2\right) - w_{turbina} = e_{mec,perda} \quad (4.8)$$

Onde  $w_{bomba}$  é a adição de energia mecânica ao sistema devido à presença de uma bomba, e  $w_{turbina}$  é a perda de energia causada por alguma máquina que consome trabalho mecânico, como por exemplo uma turbina.

Por conveniência, podemos representar o nível de energia mecânica graficamente utilizando alturas, para isso dividimos a equação 4.10 por  $g$  para obter

$$\left(\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1\right) + H_{bomba} - \left(\frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2\right) - H_{turbina} = H_f \quad (4.9)$$

Onde  $H_{bomba}$  é a carga (ou altura manométrica) bomba ao sistema,  $H_{turbina}$  é a perda de carga causada por uma turbina ou alguma outra máquina que retira energia mecânica do sistema, e  $H_f$  é a perda de carga causada pelo atrito com as paredes da tubulação e seus acessórios.

#### 4.5 Perda de Carga

Sabe-se que a linha de energia é uma medida da energia mecânica total (pressão, cinética e potencial) ao longo de um escoamento. Para o caso ideal (fluidos incompressíveis não viscosos) a LE permanece constante durante toda a trajetória do fluido. Para o caso real, a LE e LP iram diminuir continuamente ao longo da tubulação de escoamento, e isso ocorre devido aos efeitos do atrito (dissipação de energia) entre o fluido e as paredes da tubulação. Esses efeitos do atrito e da viscosidade são conhecidos como perda de carga ( $H_f$ ). A perda de carga representa a conversão irreversível de energia mecânica em energia térmica para um escoamento.

A perda de carga total é considerada como a soma das perdas contínuas, causadas por efeitos de atrito no escoamento completamente desenvolvido em tubos de seção constante, com as perdas localizadas, causadas por entradas, acessórios, variações de área e outras. A seguir apresentamos a principal diferença entre os dois tipos de perda de carga.

#### 4.5.1 Perda de Carga Contínua

Para simplificação em projetos de engenharia, pode-se calcular a perda de carga contínua ( $H_{f,c}$ ) pela equação de Darcy-Weisbach.

$$H_{f,c} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (4.10)$$

Onde,  $L$  é comprimento total da tubulação,  $D$  é o diâmetro da tubulação,  $V$  é a velocidade média do escoamento,  $g$  a aceleração gravitacional,  $f$  é fator de atrito de Darcy-Weisbach, em homenagem ao francês Henry Darcy (1803-1858) e ao alemão Julius Weisbach (1806-1871), dois engenheiros que foram responsáveis pelo seu desenvolvimento.

#### 4.5.2 Perda de Carga Localizada

Em qualquer projeto de sistemas de tubulação, são necessários alguns acessórios para que possamos garantir a funcionalidade necessária ao sistema, entre eles podemos destacar: curvas, joelhos, registros, válvulas de retenção, cruzetas, plugs, luvas roscadas, entre outros. Porém devemos ter cautela quanto ao tipo de acessório utilizado e sua quantidade, pois os mesmos também são responsáveis pela perda de energia no escoamento, chamada de perda de carga localizada.

Para facilitar projetos, uma forma que os fabricantes encontraram para quantificar a perda de carga localizada de cada acessório, foi considerar que uma determinada peça causa uma perda equivalente à um comprimento especificado de tubulação. Esta relação é conhecida como método dos comprimentos equivalentes. Seu cálculo também é baseado na equação de Darcy.

$$H_{f,l} = f \frac{L_e}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (4.11)$$

Onde  $L_e$  representa o comprimento de tubulação equivalente ao acessório.

### 4.6 Métodos Para Obtenção do Fator de Atrito

A perda de carga em um escoamento real depende diretamente do fator de atrito ( $f$ ) presente na equação de Darcy, este que por sua vez é determinado a partir do número de Reynolds e da rugosidade relativa da tubulação.

Cengel e Cimbala (2012) definem que, o escoamento em tubos é laminar para  $Re \leq 2300$  e que é completamente desenvolvido para tubos suficientemente longos em relação ao comprimento de entrada, de modo que se possa desprezar os efeitos da entrada. Para o escoamento laminar em tubos circulares, o fator de atrito é dado por

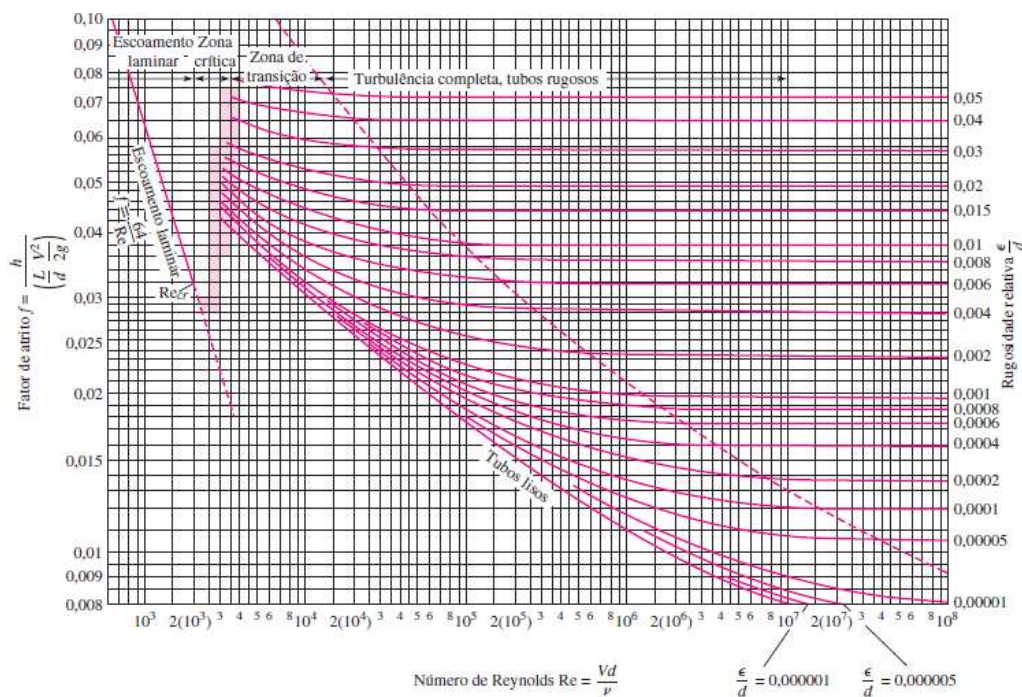
$$f = \frac{64}{Re} \quad (4.12)$$

Dessa forma, em um escoamento laminar o fator de atrito é função apenas do número de Reynolds, independente da rugosidade do material de fabricação da tubulação. Para escoamentos turbulentos, devido a sua complexidade, o fator de atrito é determinado por outros métodos que são baseados em dados experimentais.

#### 4.6.1 Diagrama de Moody

O fator de atrito em escoamentos turbulentos pode ser obtido a partir de um método gráfico, desenvolvido por Lewis F. Moody (1880-1953), apresentado na figura 7, conhecido como diagrama de Moody. Segundo Cengel e Cimbala (2012), o diagrama de Moody representa o fator de atrito de Darcy para o escoamento em tubos como uma função do número de Reynolds e da rugosidade relativa em um amplo intervalo. Esse é um dos diagramas mais usados na engenharia, e que embora tenha sido desenvolvido para tubos circulares, também pode ser usado para diferentes tipos de seções, substituindo o diâmetro comum pelo diâmetro hidráulico.

Figura 7: Diagrama de Moody.



Fonte: White (2011).

Para se obter  $f$  a partir do diagrama de Moody devemos seguir três passos. 1º- Encontrar a curva logarítmica que representa o valor da rugosidade relativa  $e$ . 2º- Traçar uma reta vertical marcada no valor aproximado do número de Reynolds até interceptar a curva de  $e$ . 3º- A partir do intercepto, deve-se traçar uma linha horizontal em direção ao lado esquerdo do diagrama, e então conferir o valor de  $f$  encontrado. Por exemplo, em  $e = 0,002$  e  $Re = 3 \cdot 10^4$ , encontramos  $f \cong 0,028$ .

#### 4.6.2 Equação de Colebrook-White

Segundo Fox, Mcdonald e Pritchard (2015), para se obter  $f$  sem a necessidade de uso de métodos gráficos, diversas expressões matemáticas foram criadas por ajuste de dados experimentais, dentre elas, a mais usual para determinação do fator de atrito é a equação de Colebrook.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[ \frac{e}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right] \quad (4.13)$$

A equação 4.13 é implícita em  $f$ , o qual pode ser determinado por métodos iterativos, em softwares matemáticos como Exel, Scilab, ou em algumas calculadoras gráficas.

#### 4.6.3 Equação de Haaland

Um outro método para se determinar  $f$  de forma direta é a equação de Haaland. Ainda Segundo Fox, Mcdonald e Pritchard (2015), Haaland desenvolveu a seguinte equação como uma aproximação à equação de Colebrook.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 \log \left[ \left( \frac{e}{3,7} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re} \right] \quad (4.14)$$

Para  $Re > 3000$ , a equação 4.14 dá resultados com aproximadamente 2% de diferença em relação à equação de Colebrook, sem a necessidade de usar métodos iterativos.

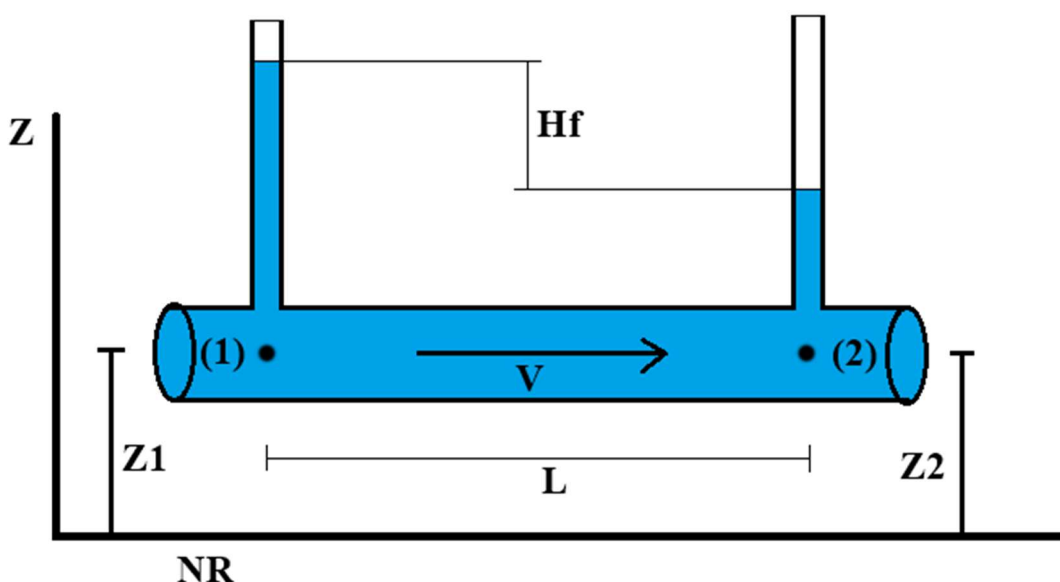
## 5 METODOLOGIA

Para atingirmos o objetivo de estimar o fator de atrito é necessário o uso de um aparato que possibilite o escoamento do fluido em questão. Para tal, desenvolve-se de modo didático, um método experimental de baixo custo constituído por duas mangueiras com função de indicar o nível piezométrico, na entrada e na saída da tubulação de PVC, fixados num suporte de madeira e conectados num sistema de distribuição de água em regime aproximadamente permanente.

### 5.1 Descrição do Fator de Atrito

O fator de atrito de escoamentos é uma grandeza adimensional que pode ser obtida a partir de equações iterativas (Colebrook), diretas (Halaand) ou por métodos gráficos (diagrama de Moody), todos esses sendo função do Número de Reynolds e da Rugosidade Relativa da tubulação. Todavia, esse parâmetro ainda pode ser determinado por um método experimental, onde são instalados piezômetros em uma tubulação, como na figura 8, onde a perda de carga é medida com base na diferença de altura entre as colunas de fluido.

Figura 8: Representação da perda de carga em um comprimento  $L$  de tubulação.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Utilizando a equação de Darcy, podemos tratar a perda de carga contínua como uma função linear  $y = ax + b$ ,



$$H_f = \frac{fV^2}{2gD}L \quad (5.1)$$

Com o coeficiente angular  $a = \frac{fV^2}{2gD}$  (que representa a perda de carga unitária) e por meio de uma regressão linear podemos determinar  $f$  com base nos dados coletados com o uso do aparato elaborado. Para isso, utilizamos tubulações de 20 mm de diâmetro e diferentes comprimentos.

## 5.2 Procedimento Experimental

Deve-se fazer algumas considerações e ter alguns cuidados durante a realização do experimento. O escoamento deve ser em regime permanente, ou seja, uma vez que o aparato for ligado à rede de água, o escoamento só poderá ser interrompido depois de feitas todas as medições. A vazão do sistema deve ser determinada com um recipiente de volume conhecido e com o auxílio de um cronômetro. O local de realização do experimento, foi em Coronel João Pessoa, localizado no estado do Rio Grande do Norte, que está a uma altitude cuja gravidade é de aproximadamente  $g = 9,78 \text{ m/s}^2$ .

O aparato permite que a altura das colunas de líquido possa ser ajustada para uma melhor visualização, isso pode ser feito fechando ou abrindo o registro de saída de água. Outro fator que pode influenciar bastante nas medições é a velocidade de escoamento, já que ela está diretamente relacionada a  $Re$ , e sabe-se que quanto maior for o número de Reynolds maior será a perda de carga para um mesmo comprimento de tubulação.

## 6 DESCRIÇÃO DA MONTAGEM DO APARATO EXPERIMENTAL

Para realização do experimento foi necessário desenvolver um aparato de baixo custo, mostrado na figura 9 que permitiu medir com boa precisão a perda de carga de vários comprimentos de tubo rígido de PVC. O diâmetro comercial escolhido foi de 20 mm, comum em instalações residenciais.

Figura 9: Aparato construído para medição da perda de carga dos diversos comprimentos de tubo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

### 6.1 Materiais e Ferramentas

Todos os componentes usados na montagem do aparato são listados na tabela 2, e podem ser encontrados em qualquer loja de material de construção, as ferramentas necessárias são de simples utilização. Os métodos construtivos exigem como pré-requisito, conhecimentos básicos de carpintaria e hidráulica.

Tabela 2: Materiais e ferramentas usados na montagem do aparato.

| Materiais                          | Ferramentas                            |
|------------------------------------|----------------------------------------|
| Abraçadeiras metálicas 25 mm       | Alicate                                |
| Arame                              | Chave de fenda                         |
| Cola para PVC                      | Chave Philips                          |
| Luva de redução 25-20 mm           | Estilete                               |
| Madeira reaproveitada              | Furadeira e brocas de 2,5 mm; e 8,0 mm |
| Mangueira de PVC 20 mm             | Lima para metal                        |
| Mangueira de PVC transparente 8 mm | Lixa nº 150 para madeira               |
| Parafusos Philips de 20 mm e 45 mm | Pincel marcador permanente             |
| Registro de PVC 20 mm              | Régua                                  |
| Tinta spray branca                 | Serra manual bimetal                   |
| Tubos de PVC de 20 mm e 25 mm      | Serra para circular e tico-tico        |
| Chapa de Zinco                     | Tesourão para metal                    |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

## 6.2 Construção da Base do Aparato

Para a base do piezômetro deve-se fazer 5 peças em madeira com as dimensões mostradas na tabela 3.

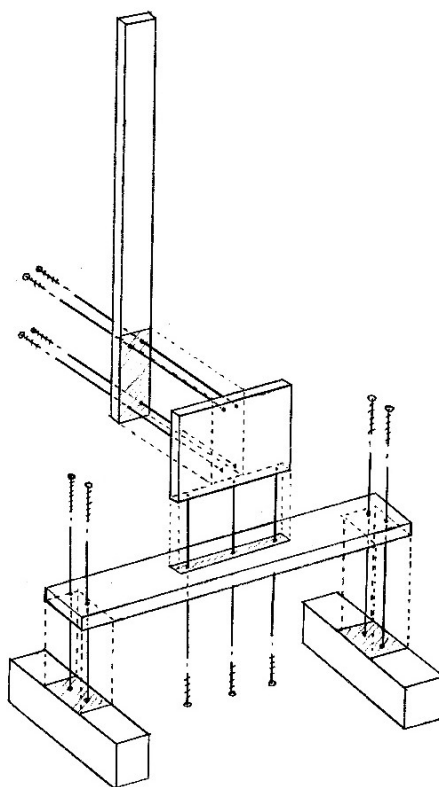
Tabela 3: Dimensões das peças em madeira do aparato.

| Peça           | Pé         | Base         | Junção        | Torre        |
|----------------|------------|--------------|---------------|--------------|
| Dimensões (cm) | 25 x 6 x 8 | 60 x 8 x 2,5 | 20 x 15 x 2,5 | 70 x 6 x 2,5 |
| Quantidade     | 02         | 01           | 01            | 01           |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Para melhorar o design do aparato, todas as partes em madeira devem ser corretamente lixadas antes da montagem. Depois de prontas, a peças em madeira devem ser furadas com a broca de 2,5 mm e parafusadas de acordo com o esquema apresentado na figura 10.

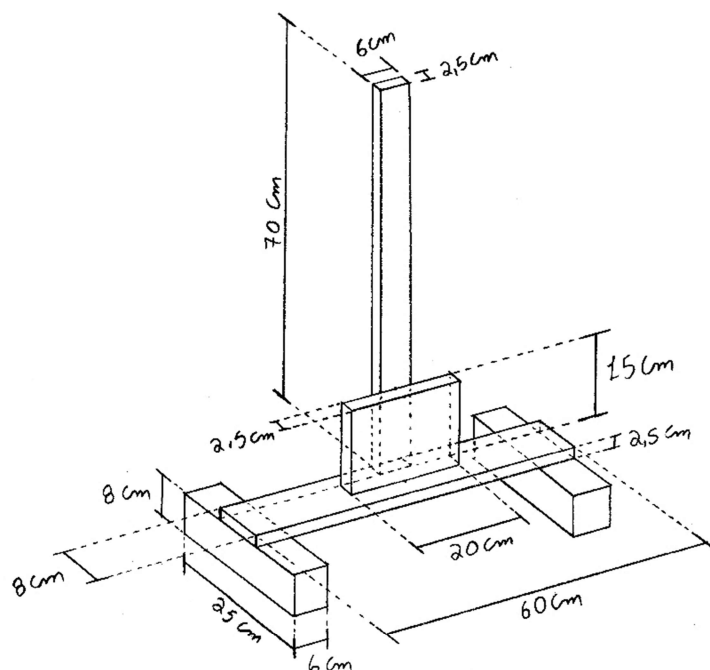
Figura 10: Esquema de montagem das peças em madeira.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Depois de montada, a base do aparato deve ficar como apresenta-se na figura 11. Observe as dimensões de cada peça.

Figura 11: Representação da base do aparato e suas dimensões.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Em seguida deve-se pintar a base com tinta spray de secagem rápida como apresentado na figura 12. Recomenda-se a cor branca por facilitar a visualização das mangueiras piezométricas.

Figura 12: Base do aparato finalizada.

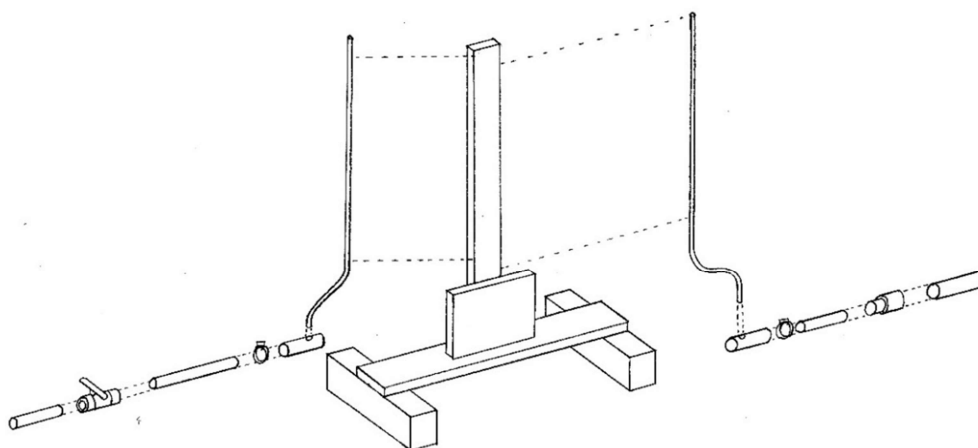


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

### 6.3 Construção das Tomadas de Pressão

As tomadas de pressão são as peças que serão usadas para conectar as mangueiras piezométricas à tubulação, ou seja, são usadas para determinar a perda de carga para cada comprimento de tubo testado. O esquema de montagem das tomadas de pressão e das mangueiras piezométricas é apresentado na figura 13.

Figura 13: Esquema de montagem das peças hidráulicas do aparato.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Para a montagem da tomada de pressão serão necessários, 90 cm de mangueira transparente com bitola de 8 mm, 30 cm de tubo rígido de PVC com bitola de 20 mm, 6 cm de mangueira de PVC com bitola 20 mm, uma braçadeira metálica de 1 polegada, como apresenta-se na figura 14.

Figura 14: Materiais utilizados para construção das tomadas de pressão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Anexou-se devemos colar o pedaço de mangueira na extremidade do tubo. Para garantir uma boa colagem devemos lixar o mesmo uniformemente até uma distância de 3,5 da ponta, como mostra a figura 15.

Figura 15: Extremidade da tomada de pressão preparada para colagem.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Depois disso, aplicou-se a cola uniformemente no tubo e na parte interna da mangueira, e encaixe até a distância marcada de 3,5 cm, como mostra a figura 16.

Figura 16: Mangueira flexível da tomada de pressão após a colagem.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Em seguida, deve-se prender a mangueira ao tubo com uma braçadeira metálica, para isso, foi inserida próximo à extremidade do tubo, conforme apresentado na figura 17.

Figura 17: Braçadeira metálica fixada à tomada de pressão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.



Usando a furadeira com a broca de 8 mm, faça um furo na peça como apresenta-se na figura 18. Esse furo será usado para fixar a mangueira piezométrica.

Figura 18: Detalhe do furo feito para encaixar a mangueira piezométrica.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Para prender a mangueira no tubo, foi utilizado uma bucha plástica feita em PVC, como apresenta-se na figura 19. O furo da bucha ser feito com a mesma broca de 8 mm.

Figura 19: Bucha plástica em PVC usada para fixação das mangueiras piezométricas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.



Depois de encaixar a mangueira, deve-se usar cola de PVC e arame para finalizar a fixação da tomada de pressão, como apresenta-se na figura 20.

Figura 20: Tomada de pressão finalizada.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Vale ressaltar que a mangueira não pode ficar passando pra dentro da tubulação, como apresenta-se na figura 21, pois dessa forma ela vai causar uma estagnação no fluxo de água, causando assim um erro na medição da altura piezométrica.

Figura 21: Vista interna da tubulação com a mangueira passando de forma incorreta.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Para evitar esse problema, deve-se cortar com um estilete o excesso de mangueira que passa pra dentro, e em seguida lixar para garantir uma superfície lisa e sem rebarbas, como mostra a figura 22.

Figura 22: Detalhe do interior da tubulação após cortar o excesso de mangueira e lixar.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

São necessárias duas tomadas de pressão para a montagem do aparato. A primeira peça servirá para entrada de água, e para isso deve-se colar uma luva com um pedaço de tubo que será ligado à rede de distribuição de água, como apresenta-se na figura 23. Em nosso experimento foi utilizada uma rede com tubulações de 25 mm, o que faz necessário utilizar uma luva de redução 20-25, mas dependendo da rede essa peça pode ser modificada para diferentes bitolas. Vale ressaltar que o controle da vazão de água no aparato deverá ser feito em algum registro ou válvula da própria rede de distribuição.

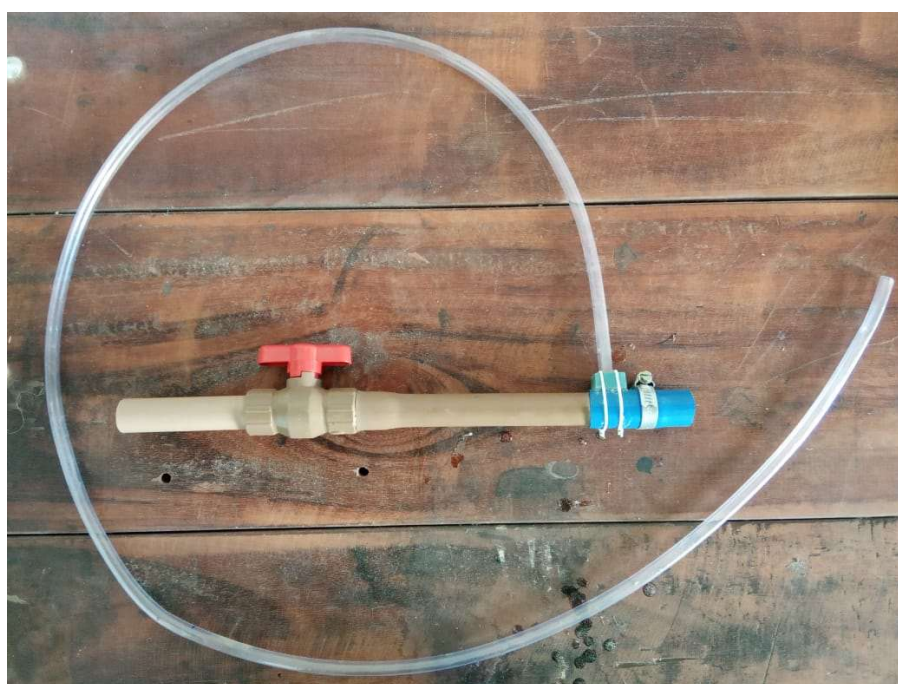
Figura 23: Tubulação para entrada de água no aparato.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

A segunda tomada de pressão será ligada a saída de água, e para isso deve-se colar um registro e um pedaço de tubo de 10 cm, como apresenta-se na figura 24. Esse registro tem a função de controlar o nível de água nos tubos piezométricos.

Figura 24: Tubulação de saída de água do aparato.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Usando chapa de zinco, construa duas braçadeiras iguais a apresentada na figura 25. Essas peças serão usadas para prender as mangueiras piezométricas. Foi utilizado um tesourão para cortar a chapa e um alicate para dobrá-la.

Figura 25: Braçadeira para fixação das mangueiras piezométricas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

As braçadeiras deverão ser usadas para prender as mangueiras piezométricas na coluna da base, como apresenta-se na figura 26. Essa é a última etapa de montagem.

Figura 26: Mangueiras piezométricas montadas no aparato.

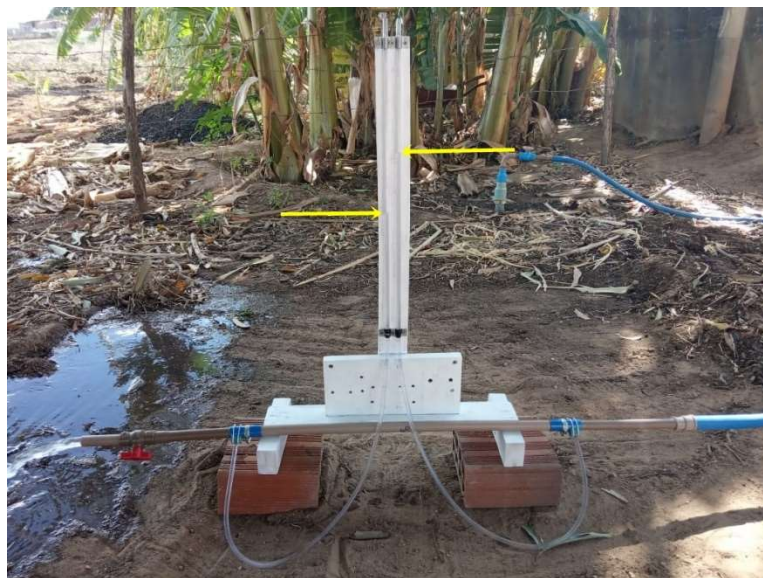


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.



As mangueiras piezométricas devem ser abertas na extremidade superior, isso é importante para que a única pressão sob a coluna piezométrica seja a pressão atmosférica. Depois de finalizado o aparato deve ficar como mostra a figura 27.

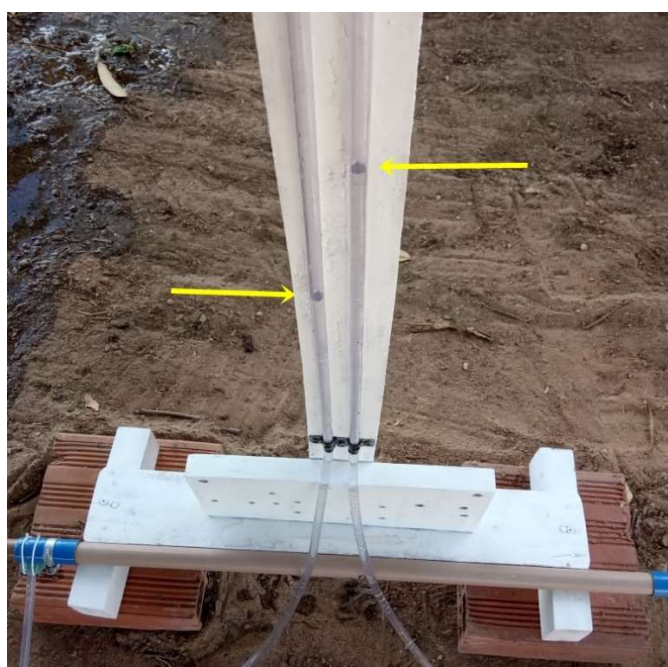
Figura 27: Aparato finalizado sendo testado.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Para determinar a perda de carga de algum comprimento de tubo, basta conectar as duas tomadas de pressão e conectar o aparato a uma rede de distribuição de água, e em seguida medir a diferença de nível entre as mangueiras, como mostra a figura 28.

Figura 28: Detalhe da diferença de nível entre as mangueiras



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

## 7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A água pode ser tratada como um fluido newtoniano, especialmente em temperatura ambiente (entre 30°C e 35°C). Por isso, ela é objeto de nosso estudo, onde sua viscosidade dinâmica  $\mu$  é de  $1,12 \cdot 10^{-3} \text{ pa.s}$  e massa específica igual a  $1000 \text{ kg/m}^3$ . O tubo de PVC utilizado apresenta diâmetro interno  $D = (17,35 \pm 0,05) \text{ mm}$  e rugosidade relativa  $e = 0,086 \%$ . A capacidade máxima do recipiente utilizado para coletar o volume de água escoando pelo tubo é dada pelo fabricante como sendo  $V=15 \text{ L}$ .

Uma vez que o regime de escoamento é permanente, foi necessário a obtenção do tempo necessário para que o recipiente fique plenamente cheio, possibilitará estimarmos a vazão da tubulação ligada ao aparato. Para tanto, foram realizadas 4 medições, nas mesmas condições, todas elencadas na Tabela 4.

Tabela 4: Valores do tempo que o recipiente levou para encher completamente, obtidos de 4 aferições.

|             | $t_1$  | $t_2$  | $t_3$  | $t_4$  | $\bar{t}$ |
|-------------|--------|--------|--------|--------|-----------|
| Tempo (min) | 1,0016 | 1,0065 | 1,0008 | 1,0088 | 1,0044    |

$t_i$ = tempo da  $i$ -ésima medição.  $i= 1,2,3$  e  $4$ .

Fonte: Dados experimentais, 2019.

A vazão média pode ser obtida da razão entre o volume e a média do tempo,

$$Q = \frac{V}{\bar{t}} = 2,489 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}. \quad (7.1)$$

Já a velocidade média de escoamento é dada a partir da vazão volumétrica por,

$$Q = AV \quad (7.2)$$

resultando,

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}} = 1,053 \text{ m/s} \quad (7.3)$$

O número de Reynolds,

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = 16312$$

Para estimar o fator de atrito utilizamos o software *moody chart calculator*, cuja interface gráfica pode ser visualizada com os respectivos valores supracitados na Figura 28.

Figura 29: Interface gráfica do *Moody Chart Calculator*.

× +

advdelphisys.com/michael\_maley/moody\_chart/

## Moody Chart Calculator

Reyolds number: 16312

relative roughness: 0.0008646

Calculate

friction factor: 0.028858384457969087

 Try the Free Moody Chart Calculator app for Android at the Google play, [here!](#)

Learn more about the Moody Chart Calculator, [here](#).

Fonte: Extraída do próprio software pelo autor, 2019.

Como pode ser observado, o valor do fator de atrito  $f = 0,02886$ . A Tabela 5 elenca os valores de perda de carga em função do comprimento dos tubos obtidos com uso do aparato.

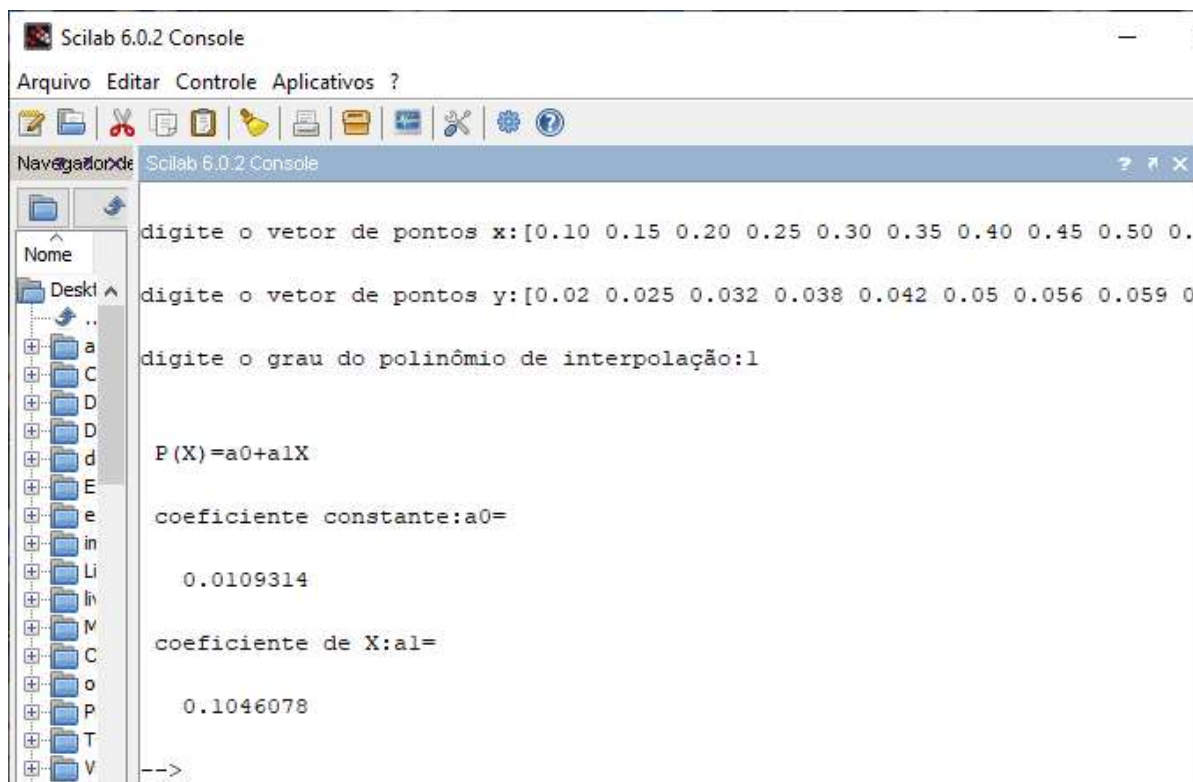
Tabela 5: Valores de perda de carga em função do comprimento obtidos com uso do aparato.

| $L(m)$ | $H_f(m)$ |
|--------|----------|
| 0,10   | 0,020    |
| 0,15   | 0,025    |
| 0,20   | 0,032    |
| 0,25   | 0,038    |
| 0,30   | 0,042    |
| 0,35   | 0,050    |
| 0,40   | 0,056    |
| 0,45   | 0,059    |
| 0,50   | 0,063    |
| 0,55   | 0,067    |
| 0,60   | 0,072    |
| 0,65   | 0,077    |
| 0,70   | 0,083    |
| 0,75   | 0,090    |
| 0,80   | 0,096    |
| 0,85   | 0,100    |
| 0,90   | 0,105    |

Fonte: Dados experimentais, 2019.

O coeficiente angular, a partir dos dados da tabela 5, pode ser obtido com auxílio do software *Scilab 6.0.2* (Figura 30).

Figura 30: Interface gráfica do *Scilab*.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

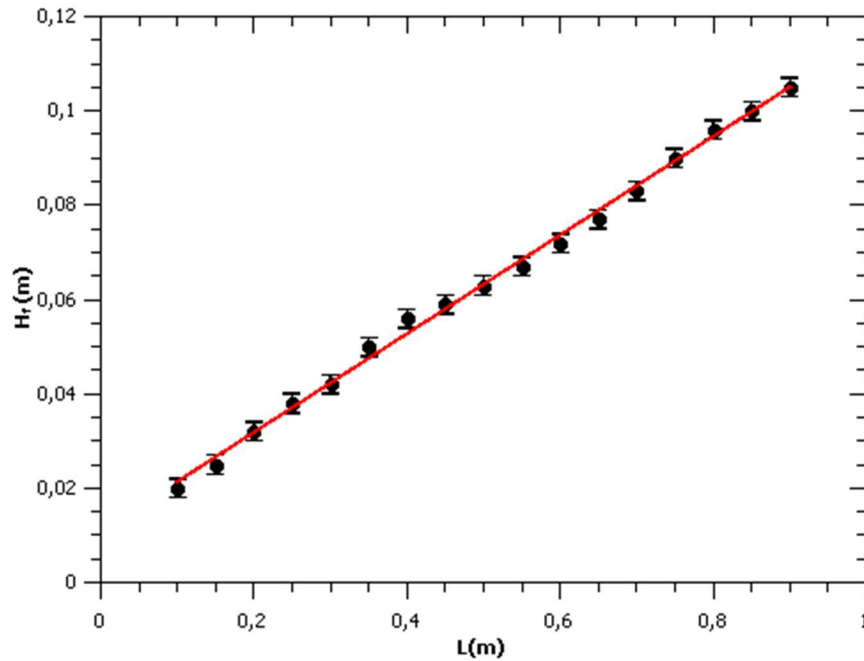
Assim, a função que melhor se ajusta aos dados foi

$$H_f = 0,0109 + 0,1046L \quad (7.4)$$

Com o coeficiente de correlação  $R^2 = 0,99684$ , podemos afirmar que há uma correlação entre as variáveis muito forte. O gráfico pode ser visto na figura 31.



Figura 31: Gráfico da equação 7.26 com os respectivos pontos da tabela 5.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.

Das Eqs (4.10) e (7.4) obtivemos o coeficiente angular

$$a = 0,1046$$

Dessa forma, obtemos o seguinte valor de  $f$ ,

$$f = \frac{2agD}{V^2} = \frac{2 \cdot 0,1046 \cdot 9,78 \cdot 0,01735}{1,053^2} = 0,03201$$

O nosso erro experimental pode ser calculado por,

$$\epsilon(\%) = \frac{|v_{teorico} - v_{experimental}| \cdot 100}{v_{teorico}} \quad (7.5)$$

Assim temos que o erro experimental obtido é de,

$$\epsilon(\%) = \frac{|0,02886 - 0,03201| \cdot 100}{0,02886} = 10,91 \%$$

Logo, obteve-se o fator de atrito com um erro experimental satisfatório, considerando a complexidade dos experimentos na área da mecânica dos fluidos, além da incerteza dos dados.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os experimentos na área da mecânica dos fluidos são fundamentais para a obtenção de parâmetros que serão usados como referência em projetos de engenharia, um exemplo disso são os métodos para determinação do fator de atrito apresentados neste trabalho. A simplicidade de construção e utilização do aparato proposto é contrabalanceada pela complexa teoria por trás das equações e métodos usados na análise dos escoamentos.

O aparato elaborado para este trabalho nos permitiu obter, parâmetros (como fator de atrito e perda de carga unitária) que geralmente são determinados em experimentos mais sofisticados com condições cuidadosamente controladas. Os bons resultados obtidos abrem a possibilidade para futuros trabalhos com experimentos relacionados à turbulência e perdas de carga, utilizando o mesmo aparato.

O erro experimental obtido foi de aproximadamente 11%, um valor satisfatório se analisarmos as considerações feitas para a realização do experimento, como por exemplo, escoamento em regime permanente, e que a viscosidade e outras propriedades da água não variam com a temperatura. Além disso devemos levar em conta a incerteza nas medições e nos próprios valores encontrados na literatura, estes que em sua maioria são baseados em dados obtidos em experimentos anteriores.

Foi observado que alguns parâmetros podem ser modificados para a obtenção de melhores resultados, como por exemplo, a vazão do sistema, pois ela está diretamente relacionada a velocidade de escoamento. Quanto maior for a velocidade, maior será a diferença de nível entre as mangueiras piezométricas, possibilitando assim uma melhor medição da perda de carga.

Um regime de escoamento em baixa velocidade é mais fácil de ser analisado, porém implica em valores de perda de carga muito baixos, fazendo com que a incerteza de medida seja muito significativa, mas ao mesmo tempo, uma velocidade maior implica em um regime cada vez mais turbulento. É importante respeitar os parâmetros citados anteriormente, sendo a velocidade de escoamento o principal deles, pois caso contrário os dados obtidos podem se distanciar bastante dos valores da literatura.

Esse trabalho possibilitou mostrar que, mesmo com equipamentos simples e de baixo custo, é possível obter dados experimentais com uma boa margem de erro. Esse estudo nos permitiu a elaboração de um aparato com objetivo de fornecer uma boa interpretação física dos conteúdos abordados nas disciplinas de Fenômenos de Transporte e Mecânica dos Fluidos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos, Fundamentos e Aplicações**. 1. ed. Porto Alegre: AMGH Bookman, 2012.

FOX, R. W.; MACDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física-Gravitação, Ondas e Termodinâmica**. 10. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2016.

MARLEY'S M. **Moody Chart Calculator-Uses the Colebrook equation and Newton's method to efficiently calculate friction factors**. Maley's Engineering Site. Disponível em: <[http://www.advdelpsisys.com/michael\\_maley/Moody\\_chart/](http://www.advdelpsisys.com/michael_maley/Moody_chart/)>.

MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H. **Fundamentos da Mecânica do Fluidos**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2004.

VILLAR, J. A. **Mecânica dos Fluidos, Curso Básico**. 1. ed. Porto Alegre: PUC-RS, 2011.

WHITE, F. M. **Mecânica dos Fluidos**. 6. ed. Porto Alegre: AMGH Bookman, 2011.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física II-Termodinâmica e Ondas**. 12. ed. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2008.