

PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UMA BANCADA EXPERIMENTAL PARA ESTUDO DE PERDA DE CARGA EM TUBULAÇÕES

Rafael Moreira de Araújo¹, Victor Wagner Freire de Azevedo²

¹Graduando em Bacharelado em Ciência e Tecnologia na Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA).
E-mail: rafael.araujo@alunos.ufersa.edu.br

²Departamento de Engenharia e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA). E-mail:
victorwfreire@ufersa.edu.br

Resumo: Um conceito crucial na área de mecânica dos fluidos é a perda de carga ou perda de energia. Isso acontece quando um fluido viscoso está em movimento e, devido ao atrito com as superfícies ao seu redor, parte de sua energia é consumida para superar as resistências ao fluxo. A perda de carga ocorre tanto em trechos retos de tubulação quanto em pontos onde o fluido sofre alterações de direção ou velocidade. Compreender esse fenômeno permite melhorar projetos ou instalações existentes, reduzindo o gasto total de energia para promover o fluxo, o que aumenta a eficiência energética do sistema. Assim, buscando explicar e compreender experimentalmente e didaticamente como age esse fenômeno, foi construída uma bancada experimental de forma que, permitisse a adaptação para vários tipos de teste de perda de carga, possibilitando a implementação de acessórios e variações nos tamanhos das tubulações, tornando perceptível os fatores de influência e os efeitos da perda de carga. Essa bancada, localizada no laboratório de Termodinâmica e Transferência de calor do Centro de Engenharia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – Campus Mossoró, possui justamente esse objetivo, auxiliar o aprendizado ao associar a parte prática com os conhecimentos teóricos. Desse modo, foi comprovada a validação da bancada, contrastando os resultados obtidos neste trabalho e comparando-os com os valores obtidos através da equação de Darcy-Weisbach e da equação de Colebrook. Portanto, concluiu-se que os resultados apresentaram um padrão de comportamento similar, mostrando-se adequados e parecidos, com algumas diferenças pontuais.

Palavras-chave: Perda de carga. Tubulações. Bancada experimental.

1. INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da existência humana, a compreensão da energia presente nos fluidos e sua aplicação tem desempenhado um papel crucial no avanço da humanidade [1]. Com o avanço da civilização e consequentemente da tecnologia, a aplicação da energia contida nos fluidos se tornou mais recorrente no cotidiano da humanidade, pois se percebeu que a aplicação desse tipo de energia facilitava e otimizava atividades simples do dia a dia, como ensaios hidráulicos de mecânica dos fluidos.

A mecânica dos fluidos é o campo científico que aborda o estudo do comportamento dos fluidos quando estão em repouso (estática dos fluidos ou hidrostática) ou em movimento (dinâmica dos fluidos ou hidrodinâmica), além de examinar as interações entre fluidos e sólidos ou entre diferentes fluidos [2]. Levando em consideração o comportamento dos fluidos em movimento, a hidrodinâmica possui um subgrupo conhecido como hidráulica, que é justamente a responsável pelo escoamento dos fluidos em dutos e tubulações, sendo assim muito aplicada em projetos de compressores, dutos, tubulações e bombas usadas em casas e edifícios.

Um ramo de bastante destaque na mecânica dos fluidos, e ponto principal deste trabalho, é a perda de carga, que é definida com o termo usado para descrever a diminuição de energia que um fluido experimenta ao percorrer um sistema, sendo subdividida em duas categorias: perda de carga distribuída, que resulta do atrito entre as partículas do fluido, e perda de carga localizada, que ocorre devido a irregularidades repentinas no fluxo, como válvulas, mudanças de direção, alargamentos, obstruções, entre outros fatores [3].

A perda de carga está diretamente relacionada com a turbulência que ocorre no conduto [4]. Levando isso em consideração, pode-se imaginar que a perda de carga seja menor em uma tubulação retilínea se comparada com uma tubulação semelhante integrada com várias peças especiais, como cotovelos e curvas. Essas

partes específicas causam perdas localizadas devido à intensificação da turbulência na área adjacente, uma vez que afetam a uniformidade do fluxo de corrente.

Diante do que foi mencionado, o presente trabalho tem o intuito de desenvolver e validar uma bancada experimental simplificada para estudo de perda de carga em tubulações capaz de estimar a queda de pressão quando diferentes acessórios são considerados no sistema.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Perda de carga

A perda de carga ou queda de pressão, de maneira ampla, é um termo que diz respeito à redução da pressão de um fluido (como água ou ar) ao atravessar uma estrutura, como tubos, dutos ou canais [5]. Esse declínio na pressão pode ser ocasionado por diferentes motivos, como atrito com as superfícies internas da estrutura, variações na velocidade do fluxo, bloqueios ao longo do percurso e até mesmo expansão ou contração súbita da seção transversal do fluxo [6].

Ao perceber que o fluido perdia pressão quando transportado por uma tubulação notou-se a necessidade de calcular essa perda de carga para garantir que o sistema funcione de forma eficiente e segura, pois essa queda de pressão afeta diretamente o desempenho do sistema.

O cálculo da perda de carga pode também ajudar a compreender e determinar a potência fundamental para bombear o fluido através do sistema.

Um exemplo dos dois tipos de perda de carga pode ser visto na Fig. 1, e será mais detalhado posteriormente.

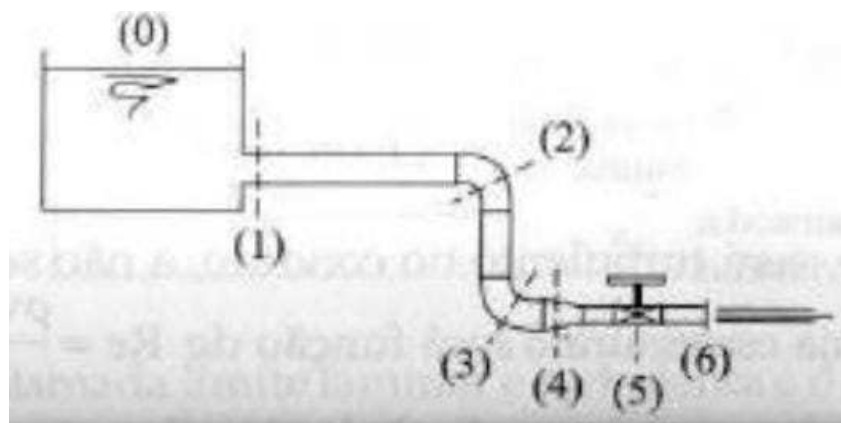


Figura 1. Perda de carga distribuída e perda de carga pontual. (Fonte: Mecânica dos fluidos [7].)

2.1.1 Perda de carga contínua

A perda de carga contínua é aquela que ocorre por causa do atrito entre as próprias partículas do fluido, devido à sua viscosidade cinemática, e também ao atrito entre o líquido e a parede da tubulação [8]. O atrito do tubo em relação ao fluido é inerente à transferência de fluidos e é resultado do movimento do fluido através do sistema de tubulação. À medida que o fluido se movimenta através do sistema, há atrito que ocorre entre o fluido e as paredes da tubulação. Esse atrito pode ser bastante influenciado pela viscosidade do fluido, já que quanto maior é a viscosidade de um fluido, mais atrito é gerado dentro do tubo, isto é, impacta na capacidade do fluido em fluir facilmente pela tubulação, pois as moléculas são coesivamente ligadas em fluidos viscosos, logo, é necessário uma maior quantidade de energia para bombear o fluido.

O grau de perda de carga contínua em um sistema será influenciado pela vazão, pelo diâmetro e pelo tipo de material do tubo [9]. A magnitude desta perda de pressão contínua pode ser calculada através da equação universal de perda de carga, ou comumente conhecida com a equação de Darcy-Weisbach, que é descrita da seguinte forma:

$$h_f = f \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

Onde:

h_f é a perda de carga contínua ou distribuída

L é o comprimento da tubulação

D é o diâmetro interno da tubulação

V é a velocidade de escoamento do fluido

g é a aceleração da gravidade

f é o fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach

O coeficiente de perda de carga f é um valor adimensional que está principalmente relacionado ao regime de escoamento, que pode ser calculado através do Número de Reynolds. A equação pode ser utilizada com qualquer tipo de material e em tubos de qualquer diâmetro [10]. A título de exemplo, é percebido na Fig. 1 a perda de carga distribuída entre (1 e 2), (2 e 3), (3 e 4), (4 e 5) e (5 e 6).

2.1.2 Perda de carga localizada

As perdas de energia secundárias ou localizadas são aquelas que acontecem em conexões, válvulas e pontos de saída de reservatórios [11]. Esses acessórios especiais acabam provocando uma dissipação localizada de energia na tubulação, pois apetrechos como: joelhos, registros e curvas podem alterar o dinamismo do fluxo do fluido, causando modificações na direção do escoamento ou até mesmo auxiliando na redução do diâmetro de algumas seções da tubulação. Ainda na Fig. 1 é ilustrado alguns exemplos da perda de carga localizada, como: uma diminuição entre os pontos (1) e (4), cotovelos posicionados nos pontos (2) e (3) e no ponto (5) uma válvula.

Cada tipo de acessório implementado na tubulação tem uma perda de carga específica. Para rastrear a perda de energia localizada, emprega-se uma fórmula geral que conecta essa perda à velocidade de referência, à gravidade e a um coeficiente específico do componente [12].

A fórmula geral para a perda de pressão localizada é expressa como:

$$h_l = K \frac{V^2}{2g} \quad (2)$$

Onde:

h_l é a perda de carga localizada

K é uma constante específica do acessório

V é a velocidade de referência

g é a aceleração devido à gravidade

Cada tipo de acessório tem um coeficiente de perda de carga característico, normalmente indicado pela letra K. Por causa da complexidade do comportamento do fluido quando este atravessa os vários tipos de conexões, normalmente se determina o coeficiente de perda (K) experimentalmente [13].

Este trabalho experimental tem sido conduzido ao longo de vários anos por engenheiros interessados no assunto, fabricantes de conexões e válvulas e laboratórios de hidráulica. Logo, verificou-se que o valor de K é praticamente constante para valores do Número de Reynolds superiores a 50 000 [14]. Assim, para propósitos de aplicação prática, o valor de K pode ser considerado constante para uma peça específica, desde que o fluxo seja turbulento.

Os valores de aproximados de K são apresentados na Fig. 2 para as peças e perdas mais comuns.

Peça	K	Peça	K
Ampliação gradual	0,30*	Junção	0,40
Bocais	2,75	Medidor Venturi	2,50**
Comporta aberta	1,00	Redução gradual	0,15*
Controlador de vazão	2,50	Saída de canalização	1,00
Cotovelo de 90°	0,90	Tê, passagem direta	0,60
Cotovelo de 45°	0,40	Tê, saída de lado	1,30
Crivo	0,75	Tê, saída bilateral	1,80
Curva de 90°	0,40	Válvula de ângulo aberta	5,00
Curva de 45°	0,20	Válvula de gaveta aberta	0,20
Curva de 22,5°	0,10	Válvula borboleta aberta	0,30
Entrada normal em canalização	0,50	Válvula-de-pé	1,75
Entrada de Borda	1,00	Válvula de retenção	2,50
Existência de pequena derivação	0,03	Válvula de globo aberta	10,00
* Com base na velocidade maior (seção menor)		Velocidade	1,00
** Relativa à velocidade na canalização			

Figura 2. Quadro de valores de K (perdas localizadas). (Fonte: UFPel [15])

2.2 Equação de Bernoulli

A equação de Bernoulli descreve a conservação da energia em um fluxo de fluido em um escoamento ideal, incompressível e sem viscosidade ao longo de uma linha de corrente [16]. A equação é frequentemente utilizada para analisar o comportamento do fluxo em tubos, dutos e outros sistemas.

equação de Bernoulli é:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + h_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_2 \quad (3)$$

Onde:

p é a pressão do fluido

γ é a densidade do fluido

v é a velocidade do fluido

g é a aceleração devido à gravidade

h é a altura em relação a um ponto de referência

Como os fluidos reais se afastam do modelo perfeito, introduzimos um termo corretivo h_p chamado de perda de carga à equação de Bernoulli, logo, obtemos o que é comumente conhecido como a equação de Bernoulli modificada. Essa versão leva em consideração a perda de energia devido ao atrito e outros efeitos não ideais.

A versão alterada da equação de Bernoulli pode ser expressa como

$$h_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_p \quad (4)$$

Essa equação alterada leva em conta a perda de energia devido a fatores não ideais, como o atrito, quando calculado às mudanças de energia do fluido.

2.3 Equação de Colebrook-White

A equação implícita de Colebrook-White tem sido extensivamente empregada para calcular o coeficiente de atrito em fluxos turbulentos [17]. No contexto de fluxos turbulentos em fluidos, o coeficiente de atrito desempenha um papel crucial na avaliação das perdas de pressão ao longo de um sistema de tubulação, sendo um fator determinante nos custos associados à construção de infraestruturas hidráulicas. Normalmente, fórmulas como a de Darcy-Weisbach são aplicadas para resolver essa questão, no entanto, a equação de Colebrook-White é considerada mais eficiente para esse propósito [18].

O principal desafio ao calcular as perdas de pressão em tubulações reside na determinação do fator de atrito [19]. Logo, a equação de Colebrook acaba sendo uma ferramenta bastante útil para a determinar o fator de atrito, que é peça essencial para o cálculo da perda de carga em uma tubulação.

Colebrook e White desenvolveram uma equação que correlaciona o número de Reynolds, a rugosidade relativa da tubulação e o coeficiente de atrito, sendo esta equação a que melhor representa precisamente o cálculo da resistência ao fluxo [19].

O número de Reynolds pode ser obtido através da seguinte equação:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (5)$$

Onde:

ρ é a massa específica do fluido

V é a velocidade média na seção transversal do duto

D é o diâmetro hidráulico

μ é a viscosidade dinâmica do fluido

A obtenção do valor do fator de atrito é influenciado por dois regimes de fluxo distintos: laminar e turbulento. No regime laminar, que se manifesta quando o número de Reynolds está próximo de 2300, a influência da rugosidade é insignificante, e o fator de atrito (f_d) é definido por:

$$f_D = \frac{64}{Re} \quad (6)$$

Para regime de fluxo turbulento, a relação entre o fator f_d , número de Reynolds e a rugosidade relativa é dado pela equação de Colebrook, disposta abaixo

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left[\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right] \quad (7)$$

A Eq. 7 é implícita, no entanto, pode ser usada para auxiliar os cálculos de perda de carga distribuída.

3. METODOLOGIA

3.1 Descrição da bancada

A bancada experimental desenvolvida no presente trabalho está esquematizada na Fig. 3. A mesma consiste em um tubo que conecta todas as partes do experimento, dois reservatórios de água, um para abastecimento e outro para armazenamento, dois manômetros de água para medir pequenas diferenças de pressão e uma bomba para gerar energia necessária para que o experimento aconteça. A seção entre os dois manômetros (ver Fig. 3) possui disponibilidade para diferentes testes para avaliação de perda de carga, como a inclusão de acessórios para avaliação de perda de carga localizada e diferentes tamanhos de tubulação para avaliação da perda de carga distribuída.

O experimento acontece da seguinte forma: Um tubo de entrada é conectado diretamente ao reservatório de abastecimento da bancada e também a bomba que tem seu acionamento realizado, dois manômetros realizam a tomada de pressão em pontos distintos da seção de testes. Com os valores lidos pelos manômetros, a Eq. 4 é utilizada para obtenção da perda de carga.

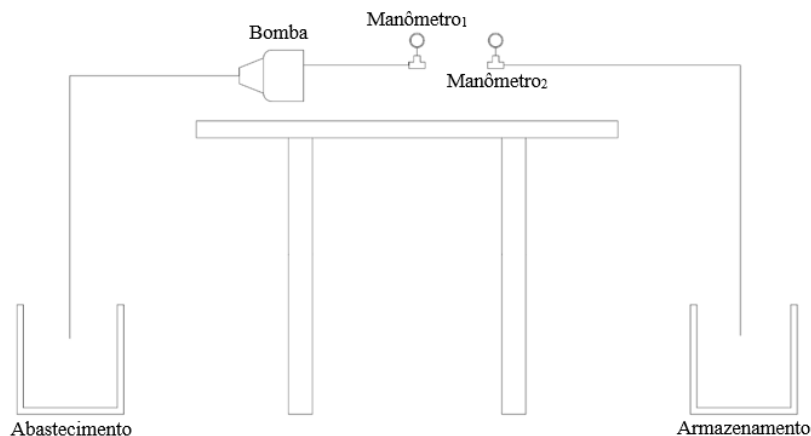


Figura 3. Esquema da bancada experimental. (Autoria própria)



Figura 4. Bancada experimental. (Autoria própria)

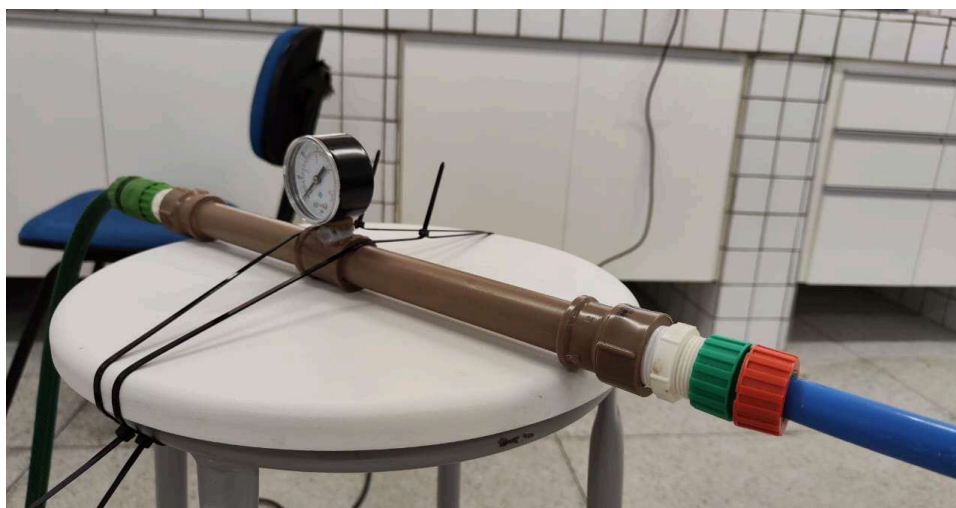


Figura 5. Manômetro de bancada. (Autoria própria)

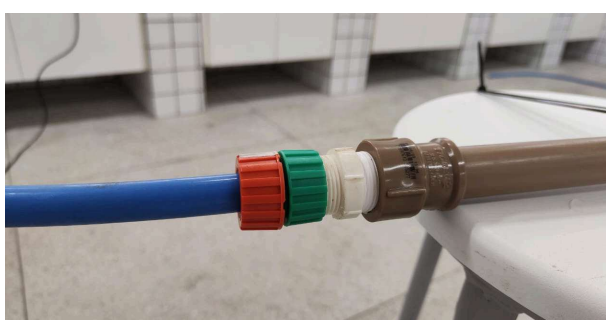


Figura 6. Acessórios de conexão. (Autoria própria)



Figura 7. Bomba de acionamento do sistema. (Autoria própria)

3.2 Procedimento Experimental

O presente experimento será realizado com uma vazão volumétrica, fornecida pela bomba utilizada, e diferentes comprimentos de tubulação para avaliar a influência desta variável na perda de carga distribuída. Assim, os casos definidos na Tab. 1 serão estudados.

Tab. 1 - Matriz de pontos do experimento. (Autoria própria)

Caso	Vazão	Comprimento
Experimento 1	Q = 20,76 l/min	L1 = 0,5 m
Experimento 2	Q = 20,76 l/min	L2 = 1 m
Experimento 3	Q = 20,76 l/min	L3 = 2 m

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Utilizando a Eq. 4, como as seções são iguais nos manômetros, pela conservação da massa, temos que $v_1 = v_2$ e, como as seções estão alinhadas (aproximadamente) na mesma altura: $h_1 = h_2$. Assim, conseguimos achar a perda de carga como:

$$h_p = \frac{\Delta p}{\gamma g} \quad (8)$$

Onde o Δp pode ser medido com auxílio do manômetro.

No teste inicial da bancada foram obtidos os resultados que estão apresentados na Tab.2. O resultado experimental ficou relativamente próximo do resultado analítico quando diminuído da perda de carga localizada estimada, sendo que as diferenças no valor da perda de carga podem ser atribuídas à não contabilização das perdas de carga localizadas no modelo analítico.

Tab. 2 - Resultados das perdas de cargas. (Autoria própria)

Experimento 1				
<u>Pressão</u>		<u>Perda de carga total</u>	<u>Perda de carga distribuída</u>	<u>Perda de carga localizada</u>
P1	P2	h_T (experimental)	h_L (teórico)	h_k
10 psi	7 psi	2,06 m	0,46 m	1,61 m
Experimento 2				
P1	P2	h_T (experimental)	h_L (teórico)	h_k

13 psi	9 psi	2,75 m	0,868 m	1,89 m
Experimento 3				
P1	P2	h_T (experimental)	h_L (teórico)	h_k
11 psi	6 psi	3,44 m	1,69 m	1,76 m

A bancada experimental utiliza engates rápidos para conexão da seção de testes, que não puderam ser contabilizados no modelo teórico pela falta de informação disponível acerca deles com relação à perda de carga. Dessa forma, a pequena diferença vista entre o modelo experimental e analítico pode ser atribuída a isso.

As mangueiras de teste são mangueiras flexíveis de polietileno, que possuem rugosidade estimada de aproximadamente 0,000023 m [20]. Utilizando a Eq. 5 para o cálculo do número de Reynolds é obtido um valor de 34696,34, consequentemente, o fluxo em questão está em regime turbulento. Com isso, foi necessário o uso da Eq. 7 para calcular o fator de atrito em regime turbulento, o valor obtido foi de aproximadamente 0,0273. Com o uso da Eq. 1, foi obtido como resultado o valor de perda de carga teórica descrito na Tab.2.

Os canos de PVC que foram utilizados para as conexões e fixação dos manômetros têm rugosidade equivalente a 0,000022344 m [21]. Eles também são empregados na soma da perda de carga total obtida na Tab.2. Utilizando também a Eq. 5 para a obtenção do valor do número de Reynolds é alcançado um valor de 23130,9. Logo, foi necessário o uso da Eq. 7 para o cálculo do fator de atrito, o valor encontrado foi de aproximadamente 0,0274. Os valores das perdas de cargas teóricas foram obtidos justamente pela soma da perda de carga distribuída das mangueiras e dos canos de PVC.

É estimado que o valor de h_k na Tab. 2 equivale ao valor da perda de carga localizada, resultado dos acessórios utilizados para conexão da seção de testes no sistema.

Vale salientar que os valores lidos para as pressões variaram entre as leituras, principalmente P1, o que não era esperado, uma vez que a mesma bomba foi utilizada nos experimentos. Uma razão para isto é a não disponibilidade de um reservatório para a água, sendo utilizado o sistema de alimentação disponibilizado no laboratório. Mesmo assim, os valores estimados para as perdas de carga localizadas ficarão relativamente próximos, quando comparados os três experimentos, como pode ser visto também na Tab. 2.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho implementou uma bancada de testes simplificada para estudo de perda de carga. A validação da bancada foi realizada através de comparação com o equação de Bernoulli e a equação de Darcy-Weisbach que usa o método implícito de Colebrook-White para o cálculo do fator de atrito, sendo obtida proximidade entre os valores medidos e teóricos.

Vale ressaltar que ao utilizar a equação de Darcy-Weisbach e Colebrook foram obtidos os valores da perda de carga total e não os valores isolados de cada tipo de perda. O resultado do valor de perda de carga localizada é uma valor estimado.

Nesse contexto, após análise e comparações dos resultados obtidos através da bancada experimental com os resultados obtidos por meio da equação de Darcy-Weisbach tendo como ferramenta auxiliadora a equação de Colebrook, pode-se observar veracidade e credibilidade nos resultados fornecidos pela bancada experimental, já que foi possível perceber semelhanças nos resultados de perda de carga obtida em ambos.

Portanto, conclui-se que a bancada experimental do presente trabalho é válida para estudos de perda de carga em tubulações.

Além disso, torna-se necessário ressaltar que a bancada experimental pode servir para futuros estudos e pesquisas, visto que possui uma grande capacidade de adaptação dos seus componentes e uma área de teste livre para diferentes combinações e ensaios, tanto de perda de carga distribuída, como também de perda de localizada, pois possibilita a inserção de diversos acessórios como também facilita a medição de perda de carga em tubos de diferentes diâmetros e comprimentos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] HENN, Érico Antônio Lopes. **Máquinas de Fluido**. Terceira Edição. Santa Maria: Ed. Da Universidade Federal de Santa Maria, 2012.
- [2] ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos**. 1ª. Edição. 2007.
- [3] FOX, Robert W. et al. **Fluid mechanics**. Hoboken. 2012.
- [4] Hidráulica e Hidrologia 3. PERDA DE CARGA. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://adm.online.unip.br/img_ead_dp/59562.pdf>.
- [5] FERNANDO, E.; UCKER. AULA 2 PERDA DE CARGA PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS ESCOLA DE ENGENHARIA AMBIENTAL E CIVIL. [s.l.: s.n.]. Disponível em:

- <<https://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/17409/material/AULA%2020%20-%20PERDA%20DE%20CARGA.pdf>>. Acesso em: 3 abr. 2024.
- [6] SUPORTE, P. O que é Perda de Carga e como calcular? - Bomserv Bombas. Disponível em: <<https://bomservbombas.com.br/perda-de-carga/>>. Acesso em: 3 abr. 2024.
- [7] BRUNETTI, F. Mecânica dos fluidos. Pearson Educación, 2008.
- [8] PACELI MIRANDA, EUGENIO et al. AJUSTE DA EQUAÇÃO DE HAZEN-WILLIAMS PARA DETERMINAÇÃO DA PERDA DE CARGA CONTÍNUA EM TUBULAÇÕES DE PVC. Revista IRRIGA (Brazilian Journal of Irrigation & Drainage), 2019
- [9] SILVA, Juciano Gabriel da et al. Análise de coeficientes em fórmulas empíricas de perda de carga contínua em tubos de PVC. 2021.
- [10] PEREIRA, F. F. S.; DA SILVA, T. B. G.; CASTRO, E. R.; SAAD, J. C. C. O Desempenho de fórmulas explícitas para determinar o fator de fricção Darcy-Weisbach. Revista Engenharia Agrícola, v.40, n. 2, 2020.
- [11] 4.1. PERDA DE CARGA O que é Perda de Carga? . [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://drb-m.org/av1/aula3.pdf>>.
- [12] SANTOS, N. DOS. Como Calcular a Perda de Carga em Tubulações. Disponível em: <<https://vidadeengenhario.com.br/perda-de-carga/>>.
- [13] UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO” INSTITUTO DE QUÍMICA -ARARAQUARA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA, FÍSICA E MATEMÁTICA FENÔMENOS DE TRANSPORTE I. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.iq.unesp.br/Home/ensino/departamentos/engenhariafisicaematematica/laboratoriodeengenhariaquimica/ft1_roteiro-aula-pratica-5---perdas-em-acidentes.pdf>.
- [14] Revista DAE - Artigo - Perdas de carga localizadas, em canalizações. Disponível em: <<https://revistadae.com.br/site/artigo/1000-Perdas-de-carga-localizadas>>. Acesso em: 11 abr. 2024.
- [15] ALEXANDRE, H.; GUEDES, S. Escoamento em Condutos Forçados. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/hugoguedes/files/2018/09/Condutos-For%C3%A7ados_Perda-de-Carga.pdf>.
- [16] JR, J. B. T. 4.4 Aplicações práticas do teorema de Bernoulli | Hidráulica Agrícola. [s.l: s.n.].
- [17] TURBULENTOS, E. INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA DAVI ALMEIDA OLIVEIRA APLICAÇÃO DE MÉTODOS NUMÉRICOS E COMPARAÇÃO COM O MÉTODO IMPLÍCITO DE COLEBROOK-WHITE NA DETERMINAÇÃO DO FATOR DE ATRITO. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://repositorio.ifes.edu.br/bitstream/handle/123456789/1922/TCC_Aplica%C3%A7%C3%A3o_Compara%C3%A7%C3%A3o_M%C3%A9todos_Colebrook-White_E escoamento_.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 abr. 2024.
- [18] AVCI, A.; KARAGOZ, I. A new explicit friction factor formula for laminar, transition and turbulent flows in smooth and rough pipes. European Journal of Mechanics / B Fluids, Bursa, v. 78, p.182 – 187, dez. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0997754619301591?via%3Dihub> . Acesso em 20 abr. 2024.
- [19] SAMADIANFARD, S. Gene expression programming analysis of implicit Colebrook – White equation in turbulent flow friction factor calculation. Journal of Petroleum Science and Engineering, Tabriz, v. 92, p. 48 – 55, ago. 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0920410512001477?via%3Dihub> . Acesso em: 20 abr. 2024.
- [20] ARAÚJO, Renata Shirley de Andrade. et al. Comparação para o fator de atrito no dimensionamento de redes de distribuição utilizando equações explícitas. Brazil Journal of Development, Curitiba, p.16, Março 2021
- [21] 48o CBQ - DETERMINAÇÃO DE RUGOSIDADE EM TUBULAÇÕES: UMA PROPOSTA DE PRÁTICA DE LABORATÓRIO PARA CURSOS DE FENÔMENOS DE TRANSPORTE. Disponível em: <<https://www.abq.org.br/cbq/2008/trabalhos/6/6-41-1254.htm#:~:text=As%20rugosidades%20estimadas%20foram%20de>>. Acesso em: 15 abr. 2024.
- [22] KELLNER, E.; AKUTSU, J.; REIS, L. F. R. Avaliação da rugosidade relativa dos tubos de PVC com vistas ao dimensionamento das redes de distribuição de água. Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 21, n. 2, p. 347–355, 20 jun. 2016.