

MÉTODO EXPERIMENTAL PARA ESTIMAR O FATOR DE ATRITO DE DARCY-WEISBACH

EXPERIMENTAL METHOD TO ESTIMATE THE DARCY-WEISBACH FRICTION FACTOR

Manoel José de Carvalho Neto [manoelnetoufersa@gmail.com]; Glaydson Francisco Barros de Oliveira [glaydson.barros@ufersa.edu.br]; Sharon Dantas da Cunha [sharondantas@ufersa.edu.br]

Universidade Federal Rural do Semi-Árido, BR-226, s/n - Caixa Postal 17 - CEP 59900-000 - Pau dos Ferros, RN, Brasil.

Em sistemas reais, como o escoamento de líquidos em tubulações, a perda de carga possui grande importância no dimensionamento de projetos hidráulicos. A perda de carga nesses sistemas é regida pela equação de Darcy-Weisbach, onde o fator de atrito é um número adimensional que depende do número de Reynolds e da rugosidade relativa da tubulação. Na prática, esse fator é obtido por meio da equação iterativa direta de Colebrook-White. Algumas instituições não possuem kits experimentais de hidráulica devido ao seu alto custo. Este trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento e a aplicação de um aparato experimental de baixo custo para estimar o fator de atrito a partir da perda de carga distribuída de trechos retos de tubos de PVC (Policloreto de Vinila). O experimento foi realizado em regime permanente, cuja vazão de água foi fornecida por um reservatório de grande capacidade. A partir da regressão linear da perda de carga, obtida por meio de um piezômetro, versus comprimento do tubo, obtém-se o fator de atrito a partir da relação entre o coeficiente angular e a equação de Darcy-Weisbach. O valor obtido foi bastante satisfatório quando comparado ao valor da literatura, considerando que o experimento foi realizado em ambiente aberto, para reaproveitar a água utilizada no experimento na agricultura.

Palavras-chave: Perda de carga; Experimento de Baixo Custo; Equação de Darcy-Weisbach.

In real systems, such as the flow of liquids in pipes, the pressure drop is of great importance in the design of hydraulic projects. The pressure drop in these systems is governed by the Darcy-Weisbach equation, where the friction factor is a dimensionless number that depends on the Reynolds number and the relative roughness of the pipe. In practice, this factor is obtained through the direct iterative Colebrook-White equation. Some institutions do not have experimental hydraulic kits due to their high cost. This work aims to present the development and application of a low-cost experimental apparatus to estimate the friction factor from the distributed head loss of straight stretches of PVC pipes (PolyVinyl Chloride). The experiment was carried out in a steady state, whose water flow was supplied by a large-capacity reservoir. From the linear regression of the pressure drop, obtained by means of a piezometer, versus tube length, the friction factor is obtained from the relationship between the angular coefficient and the Darcy-Weisbach equation. The value obtained was quite satisfactory when compared to the value in the literature, considering that the experiment was carried out in an open environment, to reuse the water used in the experiment in agriculture.

Keywords: Loss of load; Low Cost Experiment; Darcy-Weisbach equation.

INTRODUÇÃO

Na formação básica dos cursos de graduação na área de Ciências Exatas e Engenharia, são abordados sistemas que utilizam o conceito de “fluido ideal” (HALLIDAY, RESNIK e WALKER, 2016). Esta idealização não produz erro significativo na hidrostática; porém, ao analisar sistemas da hidrodinâmica na prática, o comportamento observado/medido difere do da teoria, pois o escoamento de fluido possui efeitos viscosos que geram perda de energia (FEYNMAN, LEIGHTON e SANDS, 2008, p. 40-8 e 40-9). Além disso, outros fatores são levados em conta ao analisar sistemas reais, como o atrito do fluido com as paredes da tubulação, a velocidade de escoamento, a turbulência, etc. Todas estas situações provocam queda de pressão, também chamada de perda de carga na engenharia.

Em termos práticos, o conhecimento das perdas de cargas é importante para o dimensionamento correto de aplicações da engenharia. Além disso, estão relacionadas às perdas, ao tipo e à temperatura do

fluido a ser transportado, à velocidade de escoamento, ao diâmetro e ao comprimento da tubulação, à diferença de altura entre os pontos do escoamento e aos acessórios empregados. As tubulações, um conduto utilizado no transporte de fluidos, objeto de estudo deste trabalho, estão presentes em praticamente todas as aplicações da Hidráulica, tais como: instalações prediais, barragens, adutoras, oleodutos, máquinas termodinâmicas, entre outros.

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 maioria dos casos, a perda de carga do sistema pode ser determinada a partir da equação de Darcy-Weisbach. Esta equação possui um parâmetro adimensional chamado de fator de atrito de Darcy-Weisbach, que mensura a proporcionalidade entre a perda de carga e os parâmetros de dimensionamento da tubulação e a velocidade do escoamento de fluido.

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 distribuídas e localizadas, 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. Porém, estas bancadas são de alto custo e muitas instituições não as possuem.

Este trabalho analisou as perdas de carga geradas por diferentes comprimentos de tubos de PVC (*PolyVinyl Chloride* ou Policloreto de Vinila). Essas perdas foram obtidas por meio da diferença de nível de dois piezômetros presentes num aparato desenvolvido com materiais de baixo custo. A partir da regressão linear do comprimento da tubulação e da perda de carga foi possível determinar o fator de atrito (f). O experimento foi realizado ao em ambiente aberto devido à quantidade de água utilizada no experimento, que foi reaproveitada na agricultura. O valor de f obtido foi compatível com o valor da literatura, considerando as incertezas das temperaturas da água e do ambiente. Desta forma, o aparato proposto neste trabalho pode ser utilizado como alternativa para o ensino, especialmente para docentes que não dispõem de laboratórios didáticos, para mostrar o comportamento de sistemas reais, bem como nas componentes que abordam hidráulica nos cursos de engenharia, ajudando na compreensão das perdas de cargas na prática.

FATOR DE ATRITO DE DARCY-WEISBACH

Em sistemas reais, como o esquematizado na Figura 1, quando um líquido se movimentar entre os pontos (1) e (2), parte da sua energia é dissipada na forma de calor. Como consequência desta perda, ocorre uma perda de pressão, representada na diferença de altura H_f dos piezômetros, denominada de perda de carga.

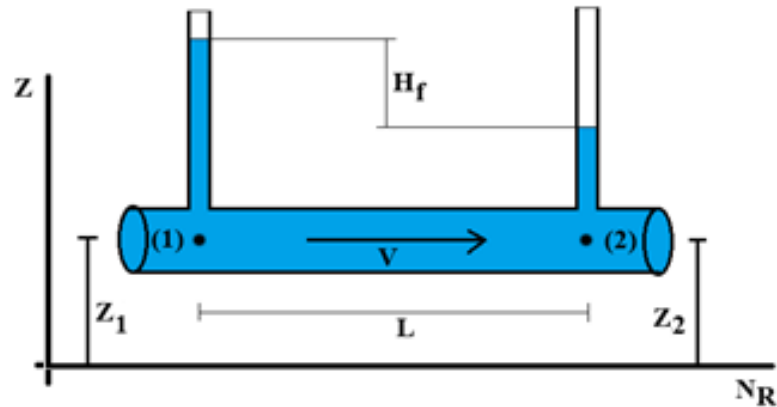


Figura 1: Perda de carga H_f gerada pelo atrito em um tubo de comprimento L . Fonte: Autor (2021)

A perda de carga é de grande importância nos problemas de Engenharia e, segundo Carvalho e Oliveira (2008), a equação mais utilizada na estimativa da perda de carga em tubulações, distribuída e localizada, é a de Darcy-Weisbach (ÇENGEL e CIMBALA, 2015; FOX, MCDONALD e PRITCHARD, 2015) (Eq. (1)).

$$H_f = (fV^2)/(2gD)L \quad H_f = \frac{fV^2}{2gD} L \quad (1)$$

onde H_f é a perda de carga, f é o fator de atrito de Darcy-Weisbach, V é a velocidade, g é a gravidade local e D e L são o diâmetro e o comprimento da tubulação, respectivamente.

A Equação 1 também pode ser usada na análise de perdas localizadas, por exemplo, válvulas, cotovelos, curvas, etc. Nesse caso, são considerados nos projetos hidráulicos uma perda de carga equivalente à um certo comprimento de tubulação (métodos dos comprimentos equivalentes ou virtuais) (AZEVEDO NETTO e FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ, 2015)

Apesar da grande aplicabilidade prática dessa equação, estudos mais precisos mostram que ela tem limitações. Para compensar essa incorreção, corrige-se o valor de f , para que os resultados teóricos se aproximem dos da prática, uma vez que em escoamento turbulento são necessárias aproximações (AZEVEDO NETTO e FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ, 2015).

O fator de atrito de escoamentos é uma grandeza adimensional que pode ser obtida a partir de uma equação iterativa, a equação de Colebrook-White (COLEBROOK, 1939), por correlações diretas, como a de Halaand (1983), ou por métodos gráficos, como o diagrama de Moody (1944), sempre em função do número de Reynolds e da rugosidade relativa da tubulação (WHITE, 2011). Os dados que foram usados para gerar essas equações e esses gráficos foram obtidos experimentalmente, onde são interpolados valores intermediários com uma limitação de temperatura e de rugosidade. Em relação a natureza ou rugosidade das paredes das tubulações, os seguintes aspectos devem ser considerados: o material, o processo de fabricação, o comprimento e o número de juntas na tubulação, a técnica de assentamento, o estado de conservação, o uso de revestimentos especiais e o emprego de medidas protetoras durante o funcionamento. Além disso, a

rugosidade é modificada por incrustações e corrosões dos tubos (AZEVEDO NETTO e FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ, 2015).

MATERIAIS E MÉTODOS

Para determinar o fator de atrito de um escoamento de fluido, neste trabalho a água, foi projetado um aparato experimental de baixo custo, constituído de uma estrutura em madeira e dois piezômetros para medir a perda de carga. A Tabela 1 lista os materiais e as ferramentas utilizadas na construção e montagem, que podem ser encontrados em lojas de material de construção. As ferramentas necessárias são de simples utilização e os métodos construtivos exigem como pré-requisito conhecimentos básicos de carpintaria e hidráulica. A estrutura em madeira foi feita com 5 peças, cujas dimensões são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1: Materiais e ferramentas usados na montagem do aparato.

Materiais	Ferramentas
2 Abraçadeiras Metálicas de 25 mm	Alicate
Tinta Spray branca	Chave Philips e de fenda
1 Cola para PVC	Nível bolha
1 Luva de Redução 25-20 mm	Estilete
1,8 m Mangueira de PVC transparente 8 mm	Furadeira e brocas de 2,5 mm e 8 mm
12 cm Mangueira de PVC 20 mm	Lima para metal
Pedaços de madeira	Lixa nº 150 para madeira
Parafusos Philips de 20 mm e 45 mm	Pincel marcador permanente
1 Válvula de esfera de PVC 20 mm	Régua
1 m de Tubo de PVC de 25 mm	Serra manual bimetal
5 m de Tubo de PVC de 20 mm	Serra para circular e tico-tico
Chapa de zinco	Tesourão para Metal

Fonte: Autor (2021).

Tabela 2: Dimensões das peças em madeira do aparato

Peça	Dimensões (cm ³)	Quantidade
Pé	25 x 6 x 8	2
Base	60 x 8 x 2,5	1
Junção	20 x 15 x 2,5	1
Torre	70 x 6 x 2,5	1

Fonte: Autor (2021).

A parte estrutural foi feita em madeira de modo a diminuir o custo do aparato. Para melhorar o

acabamento, todas as partes em madeira foram lixadas e pintadas antes da montagem, cuja cor branca foi escolhida para uma melhor visualização das mangueiras piezométricas. Depois de prontas, as peças em madeira foram furadas com a broca de 2,5 mm e parafusadas de acordo com o esquema apresentado na Figura 2.

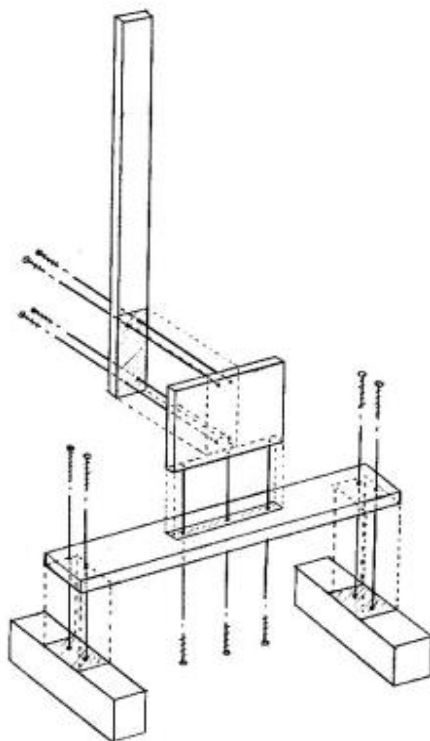


Figura 2: Esquema de montagem das peças em madeira. Fonte: Autor (2021)

Na sequência da montagem, foi anexada a parte hidráulica, composta das duas tomadas de pressão e mangueiras piezométricas. Para a montagem da primeira tomada de pressão, foi necessário 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, luva de redução 20-25 mm e uma abraçadeira metálica de 1 polegada. O tubo de PVC foi colado ao pedaço de mangueira. Para uma satisfatória colagem, o tubo foi lixado até uma distância de 3,5 mm da sua extremidade e mangueira foi encaixada até esta distância. Além da colagem, a mangueira também foi presa ao tubo com uma abraçadeira metálica. A Figura 3 mostra disposição parcial da primeira tomada.



Figura 3: Disposição parcial da primeira tomada de pressão. Fonte: Autor (2021)

Na marcação azul da Figura 3, foi feito um furo utilizando uma furadeira com uma broca de 8 mm. É nesse furo, foi fixado a mangueira piezométrica. Para prender a mangueira no tubo foi utilizado uma bucha plástica feita em PVC, e o furo na bucha também foi feita com a broca de 8 mm. A mangueira foi colada na bucha e presa com um arame. O excesso de mangueira que passa para a parte interna da tubulação foi cortado com estilete e, em seguida, lixada para garantir uma superfície lisa e sem rebarbas. A alimentação do experimento foi feita em uma rede de 25 mm, logo foi necessário utilizar uma luva de redução 20-25 mm. Dependendo da rede, essa peça pode ser modificada para diferentes diâmetros. A Figura 4 mostra a montagem da primeira tomada de pressão e a Figura 5 mostra os detalhes externos e internos da primeira tomada de pressão.



Figura 4: Disposição final da primeira tomada de pressão. Fonte: Autor (2021).



Figura 5: Detalhes: a) Externos e b) Internos da primeira tomada de pressão. Fonte: Autor (2021)

Para a montagem da segunda tomada de pressão foi utilizado a mesma quantidade de material da primeira tomada, com exceção da redução, e a inclusão da válvula de esfera de PVC, cuja função é controlar o nível de água nos tubos piezométricos. As técnicas de montagem são análogas a da primeira tomada. A Figura 6 mostra a disposição final da segunda tomada de pressão.



Figura 6: Disposição final da segunda tomada de pressão. Fonte: Autor (2021)

Duas abraçadeiras foram construídas com a chapa de zinco, utilizando alicate e tesourão, cuja função é fixar as mangueiras nas partes superior e inferior da torre. Uma alternativa para esta fixação é usar abraçadeiras de nylon. A Figura 7 mostra o esquema de montagem das tomadas de pressão e das mangueiras piezométricas na estrutura de madeira.

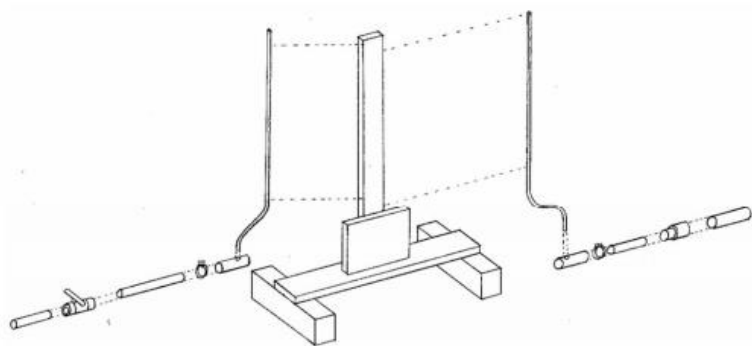


Figura 7: Esquema de montagem dos piezômetros na estrutura de madeira. Fonte: Autor (2021)

Para a determinação da perda de carga e, assim, a obtenção do fator de atrito do escoamento de água, foram utilizados, no aparato, tubos rígidos de PVC de diâmetro de 20 mm com diferentes comprimentos. Este diâmetro foi então escolhido, pois é bastante utilizado em instalações residenciais. As extremidades destes tubos foram lixados para que o engate fosse mais fácil na mangueira PVC presente nas duas tomadas de pressão. A Figura 8 mostra o aparato montado e os tubos utilizados.



Figura 8: Aparato montado e tubos com diversos comprimentos. Fonte: Autor (2021)

Após a montagem, o aparato foi ligado à rede de água e nivelado com o auxílio de um nível bolha. O controle de vazão foi feito por uma válvula antes da primeira tomada de pressão e a válvula da segunda tomada controla o nível de água nos piezômetros. A extremidade superior dos piezômetros deve ser aberta para que a pressão de referência seja a atmosférica. O fornecimento de água ocorre por meio de um reservatório de 16000 litros, com um desnível de aproximadamente 3,4 m em relação ao solo. Apesar da relativa facilidade de troca dos tubos, durante este procedimento, o escoamento torna-se transiente, logo é necessário esperar a vazão do sistema se estabilizar, de modo que o escoamento seja considerado em regime permanente. Devido

ao processo de engate das tomadas de pressão, os tubos puderam ser trocados sem interromper o funcionamento do sistema. Assim, todas as medições foram com a mesma vazão. A vazão do sistema foi determinada com o auxílio de um recipiente de volume conhecido e um cronômetro, presente na maioria dos smartphones. A Figura 9 mostra o experimento no local que foram feitas as medições.



Figura 9: Execução do experimento. As setas indicam a perda de carga (desnível entre os piezômetros). Fonte: Autor (2021)

Devido à quantidade de água utilizada no experimento, os autores optaram em fazer o experimento em uma propriedade na cidade de Coronel João Pessoa, localizado no estado do Rio Grande do Norte. Nessa cidade a aceleração da gravidade é aproximadamente $g = 9,7792 \text{ m/s}^2$, com erro de $\pm 0,0002 \text{ m/s}^2$. A escolha de fazer o experimento fora do ambiente de laboratório foi para que a água utilizada no experimento fosse reaproveitada nas plantas existentes no local.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O fluido utilizado no experimento, a água, pode ser tratada como um fluido newtoniano na condição de temperatura que o fluido se encontrava durante os testes, aproximadamente $30 \text{ }^\circ\text{C}$. De acordo com a Tabela A-3 do apêndice de Çengel e Cimbala (2012), os valores médios da viscosidade dinâmica μ e massa específica ρ para este valor de temperatura são respectivamente, $0,798 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ e 996 kg/m^3 . Levando em conta as variações de temperatura de $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ no momento que o experimento foi executado, foi considerado o erro de μ e ρ , respectivamente, $\pm 0,03 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ e $\pm 1 \text{ kg/m}^3$.

Para determinar a vazão média que escoou pela tubulação, foi utilizado um balde graduado cuja capacidade fornecida pelo fabricante é de 15 L. A incerteza na medição do volume foi de $\pm 200 \text{ ml}$. Para encontrar a vazão média, foram realizadas quatro medições do tempo necessário para que o recipiente fique

cheio até a marcação de 15 L, utilizando o cronômetro de um *smartphone*. O tempo médio obtido foi de $60,24 \pm 0,03$ s, logo a vazão média, razão entre o volume do recipiente e o tempo, é $(2,49 \pm 0,03) \times 10^{-4}$ m³/s, onde a incerteza foi obtida por meio da técnica de propagação de incertezas (TAYLOR, 2012). Conhecendo a vazão média e o diâmetro interno da tubulação, $D = (17,35 \pm 0,05)$ mm, obtém-se velocidade média de escoamento igual a $1,05 \pm 0,01$ m/s.

A perda de carga é influenciada pelo número de Reynolds. Utilizando os valores da velocidade média, da massa específica, do diâmetro e viscosidade dinâmica, obtém-se $Re = (2,27 \pm 0,02) \times 10^4$, onde novamente a incerteza foi obtida por meio da técnica de propagação de incertezas com as incertezas das variáveis utilizadas.

Para obter o fator de atrito, presente na Equação 1, é necessário a rugosidade relativa. Porém, ao pesquisar na literatura, se percebe uma grande variedade de valores para a rugosidade relativa para tubos de PVC, aumentando a incerteza do fator de atrito. No trabalho de (KELLNER, AKUTSU e REIS, 2016), foi medida a rugosidade relativa para tubos de PVC novos e usados e foi observado que a rugosidade relativa é inversamente proporcional ao diâmetro da tubulação. Neste trabalho foi utilizado o menor valor encontrado no trabalho de Kellner, Akutsu e Reis (2016), logo o valor da rugosidade relativa utilizado neste trabalho foi 0,002 para tubos novos. Para estimar o fator de atrito teórico foi utilizado o aplicativo on-line Moody (1944) chart calculator (MALEY), que usa a equação de Colebrook-White (COLEBROOK, 1939) e o método de Newton para obter este número, tendo como variáveis de entrada o número de Reynolds e a rugosidade relativa. Utilizando a incerteza do número de Reynolds, o fator de atrito obtido é $f_t f_i = 0,0292 \pm 0,0001$.

No experimento deste trabalho, a perda de carga é obtida por meio da diferença de nível dos dois piezômetros e que foi provocada pelos diferentes comprimentos de tubulação. A Figura 10 apresenta uma das medições utilizadas, onde as setas indicam a diferença de nível.

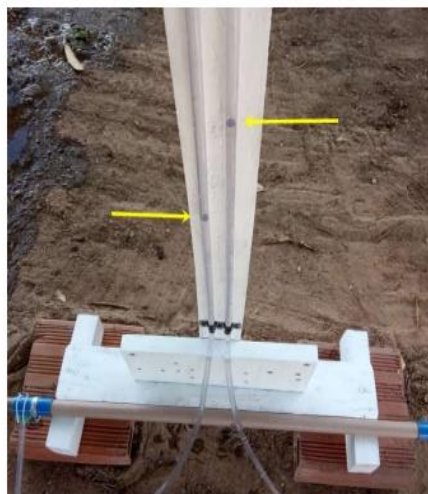


Figura 10: Detalhe do experimento, onde as setas indicam a diferença de nível entre as mangueiras provocada pela perda de pressão da tubulação. Fonte: Autor (2019)

A Tabela 3 apresenta os valores da perda de carga, $H_f H_f$, em função do comprimento da tubulação, LL . Foi atribuído um erro instrumental as medições de $H_f H_f$ no valor de 0,002 m, pois só foi feita uma medição para cada comprimento, que foi realizada após as medições ficarem estáveis.

Tabela 3: Valores de perda de carga em função do comprimento de tubo 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: Autor (2021)

A distância das duas marcações na cor azul da Figura 3, aproximadamente 2,7 cm cada, deve ser adicionada no valor de LL da Tabela 3. A Figura 11 mostra o gráfico da perda de carga H_f versus LL modificado (L_N), e a linha vermelha corresponde a regressão linear ($H_f = a L_N + b$) dos dados.

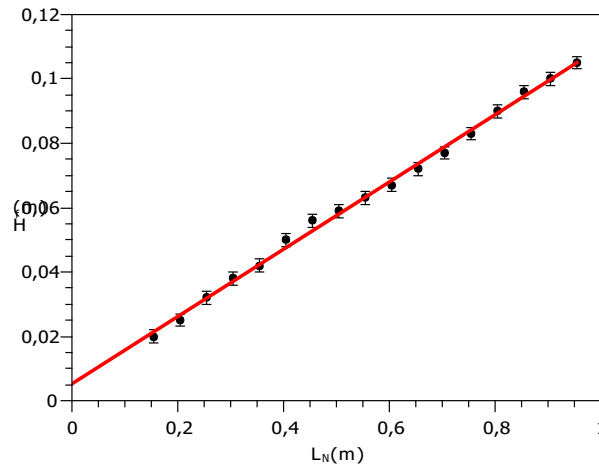


Figura 11: Gráfico da perda de carga em função do comprimento. Fonte: Autor (2021)

O valor do coeficiente angular aa é $0,105 \pm 0,002$, o valor do coeficiente linear bb é $0,005 \pm 0,001$ e o valor do coeficiente de determinação (R^2) é $0,997$. O valor de bb foi desconsiderado, pois inclui outras perdas que dependem de fatores diversos, de difícil quantificação (PORTO, 2004). Relacionando o coeficiente angular aa com a Eq. (1), obtém-se a Eq. (2):

$$a = (fV^2) / (2gD) \qquad a = \frac{fV^2}{2gD} \qquad (2)$$

Utilizando os valores da velocidade, da aceleração da gravidade e do diâmetro, obtém-se o valor do fator de atrito para o experimento $f_e f_e = 0,032 \pm 0,006$, com erro relativo percentual de 18,75%, em relação ao valor teórico. Considerando um intervalo de confiança de 95%. Outro ponto a ser destacado é que levando em conta a incerteza do valor de $f_e f_e$, o limite inferior coincide com o valor de $f_t f_i$.

CONCLUSÃO

Experimentos são atividades de grande importância na formação de profissionais das áreas de Ciências Exatas e Engenharia. Na formação básica se apresenta modelos mais simplificados, e na área de fluidos se utiliza o “fluido ideal”. Para a situação estática, o modelo idealizado não produz erro apreciável, ao contrário da situação dinâmica cujo efeito da viscosidade e seus efeitos não podem ser desprezados.

O experimento proposto neste trabalho é bastante interessante pois o discente consegue visualizar a perda de carga na prática, e assim confrontar o modelo idealizado e o real. Na formação básica se pode abordar a presença do atrito, como a interação do fluido com as paredes da tubulação, e dentre as camadas de fluido adjacentes, e abordar o conceito de viscosidade. Além disso, pode-se comentar que nos projetos hidráulicos é necessário levar em conta não só o desnível entre a bomba e a caixa d’água, como também as perdas de cargas, contínuas e/ou localizadas, e o fator de atrito, que é característica do escoamento (fluido real).

No experimento foi observado que alguns parâmetros podem ser modificados na obtenção de melhores resultados, como por exemplo, o aumento da vazão do sistema, aumenta a perda de carga, e assim, melhores

medições na perda de carga.

A simplicidade de construção e a utilização do aparato proposto são contrabalanceadas pela complexa teoria por trás das equações e dos métodos usados na análise dos escoamentos. Com o aparato e os métodos apresentados neste trabalho, foi possível obter o fator de atrito e a perda de carga, que geralmente são determinados em experimentos mais sofisticados em condições controladas. O erro experimental de aproximadamente 10% é um valor satisfatório, levando em conta que o experimento foi realizado em ambiente aberto. Além disso, deve-se levar em conta a incerteza nas medições da perda de carga devido aos instrumentos, já que foi realizada uma única medição.

Os satisfatórios resultados obtidos abrem a possibilidade de futuros trabalhos com experimentos relacionados com perdas de carga localizadas, utilizando o mesmo aparato, em um ambiente que proporcione um maior controle de temperatura, como em um laboratório e com um sistema de reaproveitamento de água (em circuito fechado).

REFERÊNCIAS

- AZEVEDO NETTO, J. M.& FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ, M.(2015) *Manual de hidráulica*. São Paulo: Blucher.
- CARVALHO, J. A.& OLIVEIRA, L. F. C. D.(2008). *Instalação de bombeamento para irrigação*. Lavras: UFLA.
- COLEBROOK, C F. (1939) Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws. *Journal of the Institution of Civil Engineers*, 11(4), 133–156. Acesso em 15 de julho, 2020, <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/ijoti.1939.13150>.
- ÇENGEL, Y. A.& CIMBALA, J. M.(2015). *Mecânica dos Fluidos, Fundamentos e Aplicações*. Porto Alegre: AMGH.
- FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.& SANDS, M. (2008). *Lições de Física de Feynman*. Porto Alegre: Bookman.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.& PRITCHARD, P. J. (2015). *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. Rio de Janeiro: LTC.
- HAALAND, S. E. (1983) Simple and explicit formulas for the friction factor in turbulent pipe flow. *Journal of Fluids Engineering*, 105(1), 89–90. Acesso em 17 de jan.,2020, <https://asmedigitalcollection.asme.org/fluidsengineering/article/105/1/89/408126/Simple-and-Explicit-Formulas-for-the-Friction>.
- HALLIDAY, D.; RESNIK, W.& WALKER, J.(2016) *Fundamentos de física, volume 2: Gravitação, Ondas e Termodinâmica*. Rio de Janeiro: Grupo GEN.
- KELLNER, E.; AKUTSU, J.& REIS, L. F. R. (2016). Avaliação da rugosidade relativa dos tubos de PVC com vistas ao dimensionamento das redes de distribuição de água. *Eng. Sanit. Ambient.*, Rio de Janeiro, 21(2), 347-355. Acesso em 25 nov.,2020, <https://www.scielo.br/j/esa/a/Tz9xXbY7rkyNdCpWCBbjmgc/?lang=pt>.

para...

MALEY, M. Moody Chart Calculator. Acesso em 28 jan., 2020, http://www.advdelpsys.com/michael_maley/Moody_chart/.

MOODY, L.F (1944). Friction factors for pipe flow. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 66, 671-681.

PORTO, R. D. M.(2004). *Hidráulica Básica*. São Paulo: EESC-USP.

WHITE, F. M.(2011). *Mecânica dos Fluidos* Porto Alegre: AMGH.