

DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTOS DIDÁTICOS PARA ENSINO DE MECÂNICA DOS FLUIDOS: ESTUDO DA PERDA DE CARGA

Thaís Cavalheri dos Santos,¹ Pedro José Gabriel Ferreira,² Tulio Cearamicoli Vivaldini,³
Iara Batista de Lima,⁴ Alexandre Daliberto Frugoli,⁵ Pedro Américo Frugoli⁶

RESUMO

A Mecânica dos Fluidos é uma das mais importantes disciplinas no Ensino de Engenharia, visto que é fundamental na área de projetos. Na indústria, é comum ocorrer perda de eficiência energética, devido ao mau dimensionamento de redes e de transferência de fluidos, resultando em custos adicionais de produção e manutenção de equipamentos. O Grupo de Pesquisa em Ensino de Física para Engenharias (GruPEFE) desenvolveu um aparato experimental com o objetivo de envolver o estudante nas aulas práticas de Mecânica dos Fluidos, associando conceitos teóricos e práticos, otimizando o tempo de aula e custos de aquisição de equipamentos. O sistema desenvolvido permite o estudo de perda de carga, associação de bombas, medição de vazão e velocidade de um fluido. O equipamento foi construído visando à durabilidade e à operacionalidade. No presente estudo, a perda de carga distribuída e singular foi determinada para os principais itens de uma tubulação. A comparação entre os resultados é realizada durante a aula, dando enfoque não apenas no custo de aquisição dos equipamentos, mas também nos problemas ocasionados pela escolha inadequada no momento do projeto.

Palavras-chave: Perda de carga; Mecânica dos fluidos; ensino de Engenharia.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF DIDACTICAL EQUIPMENT FOR TEACHING OF FLUID MECHANICS: STUDY OF FRICTION LOSS

Fluid Mechanics is one of the most important subjects in Engineering Education, since it is fundamental in the project area. In industry, the loss of energy efficiency is often due to poor design of networks and fluid transfer, which results in additional costs and equipment maintenance. The Research Group in Physics Teaching for Engineering (GruPEFE) developed an experimental apparatus aiming to engage the students in practical classes, combining theoretical and practical concepts, optimizing class time and the acquisition costs of equipment. The developed system allows determining friction losses, pumps association, flow rate and fluid velocity profile. The equipment was built aiming durability and operability. In the present work, the friction losses for the main items of a pipeline were determined. During the classes, the comparison of the results is carried out focusing on the acquisition cost of the equipment and on the problems caused by inadequate choice at the project elaboration.

Keywords: Friction loss; Fluid Mechanics; Engineering Teaching.

1 Doutora em Tecnologia Nuclear, Professora Titular da Universidade Paulista – UNIP, e Professora Adjunta da Universidade São Judas Tadeu – USJT; thaís_cavalheri@yahoo.com.br

2 Mestre em Engenharia de Produção, Coordenador de Curso, Coordenador dos Laboratórios do ICET e Professor da Universidade Paulista – UNIP; pedrojgf@unip.br

3 Doutor em Tecnologia Nuclear e Professor Titular da Universidade Paulista – UNIP; tuliocv@unip.br

4 Doutora em Tecnologia Nuclear e Professora Titular da Universidade Paulista – UNIP; iblima@unip.br

5 Doutor em Engenharia de Produção, Assessor da Vice-Reitoria de Planejamento, Administração e Finanças e Professor Titular da Universidade Paulista – UNIP; alefrugoli@unip.br

6 Doutor em Engenharia de Produção, Diretor do ICET, Coordenador de Curso e Professor Titular da Universidade Paulista – UNIP; pedrofrugoli@unip.br

INTRODUÇÃO

A “dinâmica dos fluidos” é um tópico acadêmico fundamental na elaboração de projetos de aeronaves, barcos e automóveis e, portanto, essencial no ensino de engenharia (VERTCHENKO *et al.*, 2009). Em virtude da relevância do tema, deve-se ter um olhar especial sobre o ensino da disciplina, integrando teoria e prática, de modo a fornecer ao estudante um elevado patamar de aprendizagem. Nesse âmbito, é comum a perda de eficiência energética, devido ao mau dimensionamento de redes e de transferência de fluidos na indústria, resultando em custos adicionais de produção e manutenção de equipamentos.

Nos últimos anos, as universidades racionalizaram os currículos dos cursos de engenharia, promovendo cortes de custo e redução de cargas horárias (RUSSELL *et al.*, 2000). Assim, o ensino superior requer educadores e administradores educacionais capazes de fornecer alta qualidade de ensino, com custos adequados (AGRAWAL; KHAN, 2008). O Brasil se insere nesse cenário e seus administradores devem ser capazes de visualizar possibilidades de adequações em equipamentos utilizados em aulas laboratoriais, reduzindo custos e oferecendo qualidade de ensino apropriada.

Os estudantes devem ser capazes de vincular a teoria e a prática, manipulando equipamentos e observando os experimentos (BUCH; WOLFF, 2000). Para otimizar os custos em cursos de engenharia, deve-se dedicar particular atenção à instrumentação às atividades práticas a serem desenvolvidas. A partir dos experimentos, os estudantes desenvolvem habilidades laboratoriais práticas, abrangendo a resolução de problemas nos equipamentos, o planejamento de uma atividade experimental e a observância de fenômenos físicos ao longo de períodos de tempo (JONG *et al.*, 2013). Ocorre que, de acordo com as teorias da cognição incorporada, os laboratórios experimentais fornecem uma informação tátil, encorajando o desenvolvimento do conhecimento conceitual (TOTH *et al.*, 2009).

Nesse contexto, o Grupo de Pesquisa de Ensino de Física para Engenharias (GruPEFE) foi criado em 2014, na Universidade Paulista (UNIP), a

qual forma engenheiros desde 1977. Em busca do incremento da aprendizagem ativa, para formação de engenheiros colaborativos e com um curso adequado ao sistema produtivo brasileiro e à sua economia, o grupo realiza estudos para desenvolver e adaptar tecnologias existentes, com custos reduzidos, o que permite otimizar o tempo de aula prática e proporcionar ao estudante uma aprendizagem participativa. Além disso, o GruPEFE desenvolve materiais didáticos (FERREIRA; CAVALHERI, 2014; SANTOS; FERREIRA, 2015) e instrumentação especialmente voltada para os laboratórios de Mecânica dos Fluidos, que são atualmente utilizados por aproximadamente dez mil alunos (por semestre), em habilitações como Civil, Mecatrônica, Mecânica e Aeronáutica.

No laboratório de Mecânica dos Fluidos, um dos assuntos amplamente estudados é a perda de carga. No campo da hidráulica, a energia mecânica dissipada é dividida em perda de carga distribuída e perda de carga localizada, ou singular. A perda de carga distribuída é causada por atrito durante o escoamento do fluido em condutos. Já a perda de carga singular é causada pela passagem através de um acessório, como uma válvula, uma curva ou uma redução. O estudo da dissipação de energia em singularidades envolve o coeficiente de perda de carga K_s , que pode ser determinado experimentalmente por meio da medição do diferencial de pressão (POLIZELLI *et al.*, 2003; SHI-HE *et al.*, 2013).

Atualmente, há uma preocupação mundial no desenvolvimento de tecnologias e acessórios para redução de dissipação de energia (FESTER *et al.*, 2007). Com base nisso, o GruPEFE desenvolveu um aparato experimental com o objetivo de envolver o estudante no aprendizado de Mecânica dos Fluidos, associando conceitos teóricos e práticos, racionalizando o tempo de aula e reduzindo os custos de aquisição desses equipamentos (FERREIRA *et al.*, 2015; LIMA *et al.*, 2015). Os trabalhos em laboratório são realizados incentivando-se a participação colaborativa, com o intuito de formar e preparar o futuro profissional para o mercado de trabalho no mundo globalizado.

No presente artigo, são apresentados os resultados de perda de carga distribuída e singular obtidos na bancada desenvolvida no experimento.

Estudos preliminares referentes à repetibilidade e às incertezas associadas às medições de perda de carga em válvulas foram realizados em trabalhos prévios do grupo (SANTOS *et al.*, 2015).

METODOLOGIA

O sistema empregado nas aulas experimentais consiste em uma bancada com tubulações em aço inox que permitem realizar medições multiparamétricas de velocidade de escoamento, vazão, perdas de carga e associação de bombas (Figura 1).

Figura 1: Sistema empregado nas aulas de laboratório de Mecânica dos Fluidos.



Foto dos autores.

Anteriormente, utilizavam-se tubos de PVC em toda bancada, por se tratar de um material de baixo custo. Contudo, a durabilidade e a manutenção do PVC não são apropriadas, considerando o extenso uso das bancadas de fluidos nos laboratórios da UNIP, e a influência de variações de temperatura para esse material, que causavam recorrentes vazamentos durante as aulas de laboratório.

Além disso, eram usados para as medições de diferença de pressão tubos em U, preenchidos com mercúrio. Nesses tubos, os alunos relacionam a diferença de pressão ΔP com a altura h da coluna de mercúrio, por meio da equação manométrica, $\Delta P = (\gamma_{Hg} - \gamma_{\text{água}}) \cdot h$, sendo γ_{Hg} o peso específico do mercúrio e $\gamma_{\text{água}}$ o peso específico da água. Portanto, realizar medições de baixos valores de diferença de pressão com esse manômetro é uma tarefa difícil, uma vez que, para alguns experimentos, resultam em valores da mesma ordem de grandeza que a re-

solução do instrumento. Assim, a fim de aumentar a sensibilidade do sistema, substituiu-se o mercúrio por bromofórmio como fluido manômetro. Porém, o bromofórmio, assim como o mercúrio, é tóxico. Para a redução da exposição ocupacional ao fluido e alcance da sensibilidade requerida, minimizando o tempo de aquisição de dados, manômetros digitais foram especialmente desenvolvidos para as aplicações do laboratório (Figura 2).

Figura 2: Manômetro digital desenvolvido especialmente para as aulas práticas.



Foto dos autores.

As alterações citadas tiveram como objetivo otimizar a qualidade das aulas de laboratório, aumentando o tempo dedicado à análise crítica dos resultados e, conseqüentemente, o interesse dos alunos nos fenômenos físicos associados a cada experimento. Além disso, durante a aquisição e análise dos resultados, priorizou-se o trabalho em grupo, e os alunos foram questionados sobre os fatores que afetaram as medições e as possíveis incertezas associadas às grandezas estudadas.

Perda de carga distribuída

Quando um fluido escoar ao longo de um conduto de comprimento L , o atrito causado por esse movimento provoca uma perda, denominada perda de carga distribuída (h_f), que pode ser analisada, por meio da queda de pressão (ΔP), ao longo do conduto em função da vazão de água (Q) no sistema, medida por meio de um rotâmetro conectado ao mesmo (Figura 3).

Figura 3: Rotômetros conectados ao sistema.



Aplicando-se a Equação da Energia para fluidos reais, na entrada e na saída da tubulação:

$$\alpha \cdot \frac{\bar{v}_e^2}{2g} + \frac{p_e}{\gamma} + z_e = \alpha \cdot \frac{\bar{v}_s^2}{2g} + \frac{p_s}{\gamma} + z_s + h_f \quad (1)$$

onde:

α é o coeficiente cinético;

\bar{V}_e e \bar{V}_f são as velocidades médias de entrada e saída da região analisada;

g é a aceleração da gravidade, sendo que o valor considerado nas análises foi de 10 m/s^2 ;

p_e e p_s são as pressões na entrada e saída;

γ é o peso específico da água. O valor considerado nas análises foi de 10000 N/m^3 ; e

z_e e z_s são as cargas potenciais em relação ao plano horizontal de referência.

As velocidades da água na entrada e saída do conduto não são consideradas uniformes. Contudo, foi conveniente utilizar as velocidades médias, eliminando as integrais utilizando-se o coeficiente cinético α (ASSAY, 2004; BRUNETTI, 2008; FOX e McDONALD, 2011; MUNSON, *et al.*, 1997).

Em regime de escoamento turbulento, o coeficiente cinético é determinado por meio de uma complexa equação, variando entre o intervalo de 1,08 e 1,03. Portanto, no estudo realizado, adotou-se α igual a 1, levando-se em consideração que as cargas de pressão e potencial são mais significativas (ASSAY, 2004; BRUNETTI, 2008; FOX; McDONALD, 2011; MUNSON, *et al.*, 1997).

Então, $\bar{V}_e = \bar{V}_s$, $z_e = z_s$, a perda de carga distribuída pode ser determinada por:

$$h_f = \frac{p_e - p_s}{\gamma} = \frac{\Delta P}{\gamma} \quad (2)$$

A perda de carga distribuída também pode ser expressa em termos do fator de atrito (f) por meio da relação de Darcy-Weisbach:

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D_H} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (3)$$

onde D_H corresponde ao diâmetro hidráulico do conduto. O valor da velocidade do fluido no sistema pode ser calculado a partir da vazão (Q):

$$v = \frac{4Q}{\pi D_H^2} \quad (4)$$

Vale destacar que o fator de atrito depende do regime de escoamento e do número de Reynolds (Re):

$$Re = \frac{v \cdot D_H}{\nu} \quad (5)$$

sendo ν a viscosidade cinemática da água, que equivale a $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Para o regime de escoamento laminar, o fator de atrito depende apenas do número de Reynolds; já para o regime de escoamento turbulento, o fator depende também da rugosidade da superfície do tubo (ϵ).

A fim de estudar essa dependência do fator de atrito com a rugosidade, nesse experimento, os alunos analisam quatro tubulações cujas especificações são apresentadas na Tabela 1, a seguir:

Tabela 1: Tubulações analisadas com seus respectivos comprimentos (L) e diâmetros hidráulicos (D_H).

Tubulação	L (m)	D _H (m)
1	1,73	0,0256
2	1,73	0,0192
3	0,88	0,0192

Perda de carga singular

Para a determinação da perda de carga causada pela inserção de uma singularidade (h_s), analisa-se a variação da diferença de pressão (ΔP) entre a entrada e a saída de tal singularidade, em função da vazão de água (Q) no sistema, medida por meio de um rotâmetro.

Considerando a equação da energia para fluidos reais na entrada e na saída da singularidade:

$$\alpha \cdot \frac{\bar{v}_e^2}{2g} + \frac{p_e}{\gamma} + z_e = \alpha \cdot \frac{\bar{v}_s^2}{2g} + \frac{p_s}{\gamma} + z_s + h_s \quad (6)$$

Para acessórios com diâmetro constantes e fluido em regime de escoamento turbulento, adotou-se α igual a 1 e, portanto: $\bar{V}_e = \bar{V}_s$. Ainda, se $z_e = z_s$, a perda de carga singular pode ser determinada por:

$$h_s = \frac{p_e - p_s}{\gamma} = \frac{\Delta P}{\gamma} \quad (7)$$

A perda de carga h_s pode ser expressa em termos do coeficiente de perda de carga singular K_s , por meio da relação:

$$h_s = K_s \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (8)$$

O coeficiente de perda de carga depende da geometria do componente e do número de Reynolds (Re).

As perdas de carga singulares também podem ser expressas em termos do fator de atrito (f), por meio da relação:

$$h_s = f \cdot \frac{L_{eq}}{D_H} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (9)$$

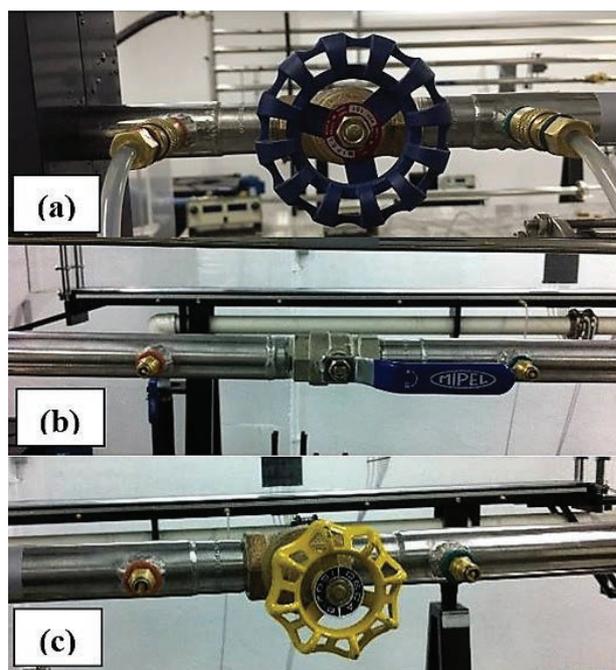
onde L_{eq} é o comprimento equivalente, que representa o comprimento imaginário de uma tubulação de mesmo diâmetro, que causaria uma perda de carga igual à perda (h_s) causada pela singularidade.

Dessa forma, igualando as Eq. (8) e (9), o comprimento equivalente pode ser determinado por meio da expressão:

$$L_{eq} = \frac{K_s D_H}{f} \quad (10)$$

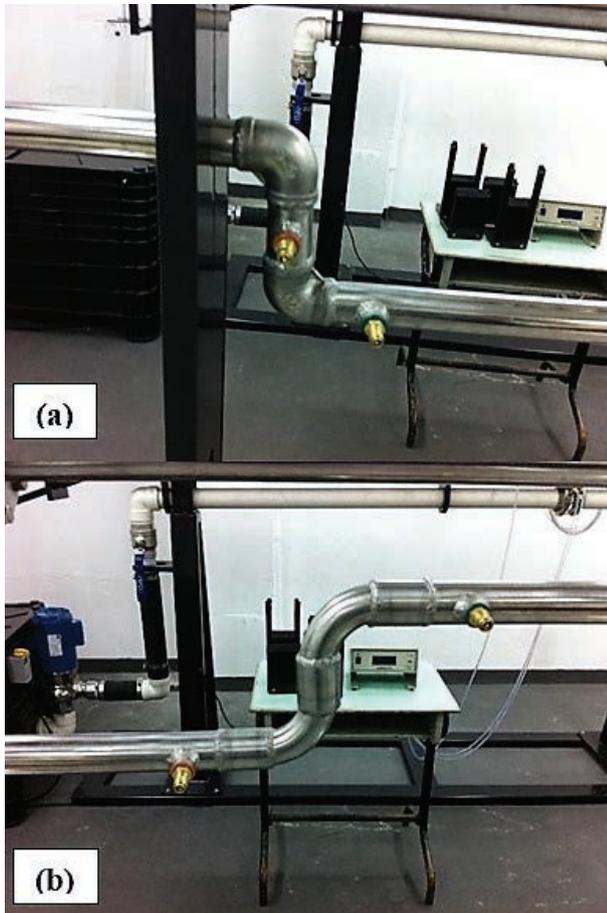
O estudo da perda de carga singular foi realizado para válvulas (globo, esfera e gaveta), que são mostradas na Figura 4, a seguir, e cotovelo de 90° e curva de 90°, que são mostrados na Figura 5, na sequência.

Figura 4: (a) Válvula globo, (b) válvula esfera e (c) válvula gaveta.



Entre as alterações realizadas no sistema para facilitar o entendimento dos alunos sobre o experimento, efetuou-se a diminuição das distâncias das tomadas de diferença de pressão, por meio de conexões de engate rápido. No sistema empregado anteriormente, as distâncias eram maiores e, para os estudos das perdas de carga singular, devido às válvulas, as distâncias de tubulação tinham que ser descontadas dos resultados obtidos.

Figura 5: (a) Cotovelo de 90° e (b) curva de 90°.



RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como detalhado na seção anterior, medindo-se a diferença de pressão nas tubulações, é possível determinar a perda de carga distribuída (h_f) – pela Eq. (2) – e o fator de atrito (f), a partir da relação de Darcy-Weisbach, Eq. (3). Os resultados são mostrados nos Gráficos 1 e 2, a seguir. As barras de incerteza correspondem a incertezas instrumentais, relacionadas com a maior variação observada nos valores de diferença de pressão, que foi de $\pm 20\%$. As incertezas nos valores de pressão foram propagadas para as demais variáveis dependentes (HELENE; VANIN, 1991).

Gráfico 1: Perda de carga distribuída em função da vazão para diferentes tubulações.

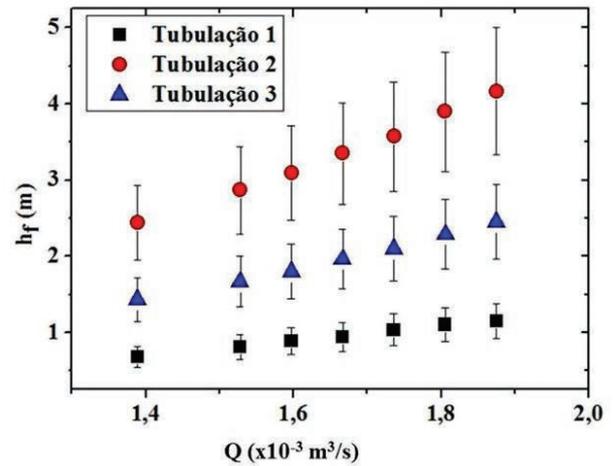
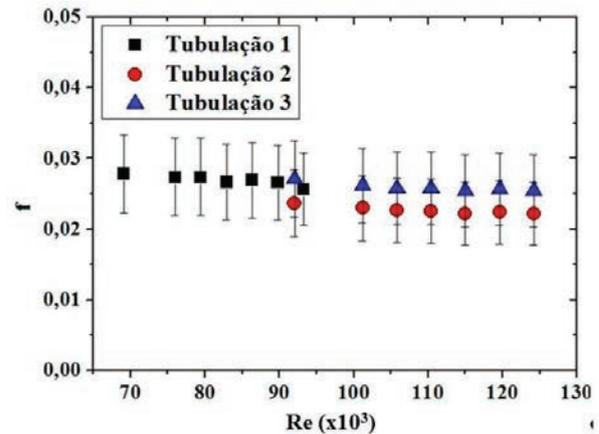


Gráfico 2: Fator de atrito em função do número de Reynolds para diferentes tubulações.



A partir dos resultados obtidos e empregando-se o diagrama de Moody-Rouse, é possível determinar a rugosidade relativa (ϵ/D), e, conseqüentemente, a rugosidade (ϵ) de cada tubulação da bancada (Tabela 2).

Tabela 2: Rugosidade relativa (ϵ/D) e rugosidade (ϵ) de cada tubulação analisada.

Tubulação	ϵ/D	ϵ (mm)
1	$2,63 \times 10^{-3}$	0,067
2	$1,38 \times 10^{-3}$	0,026
3	$2,39 \times 10^{-3}$	0,045

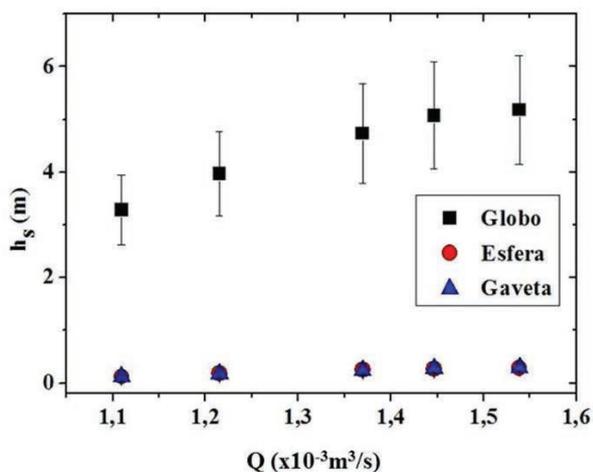
Os valores de rugosidade obtidos na bancada apresentam bom acordo com os valores da literatura. Como a rugosidade para tubos comerciais novos de aço inox é de 0,002 mm (ÇENGEL; CIMBALA,

2015), os valores experimentais obtidos devem ser superiores, devido à formação de depósitos que aumentam a rugosidade das paredes.

O experimento de perda de carga singular é dividido em duas partes: uma dedicada a válvulas e outra ao estudo de curva, cotovelo de 90° e redução.

As válvulas analisadas neste trabalho foram do tipo globo, esfera e gaveta. Os resultados de perda de carga singular em função da vazão, determinadas por meio da Eq. (7), para as válvulas totalmente abertas, são mostrados no Gráfico 3, a seguir. Como esperado teoricamente (FOX; McDONALD, 2011), para a condição de passagem plena, a válvula globo apresenta maiores perdas por atrito do que as válvulas esfera e gaveta.

Gráfico 3: Perda de carga singular em função da vazão para válvula globo, esfera e gaveta.



Na literatura, é comum representar o coeficiente de perda de carga singular K_s , em função do número de Reynolds (Gráfico 4). Vale destacar que, teoricamente (WHITE, 2010), para válvulas, esse parâmetro é praticamente independente do número de Reynolds. Os valores médios obtidos são mostrados na Tabela 3, adiante. É importante, ainda, salientar durante o experimento que esse coeficiente é

fortemente influenciado pelas características de fabricação da válvula analisada. Os valores de referência do fabricante (MIPEL, 2015), para cada tipo de válvula empregada na condição de passagem plena, também são apresentados na Tabela 3.

Gráfico 4: Coeficiente de perda de carga singular em função do número de Reynolds para válvulas globo, gaveta e esfera.

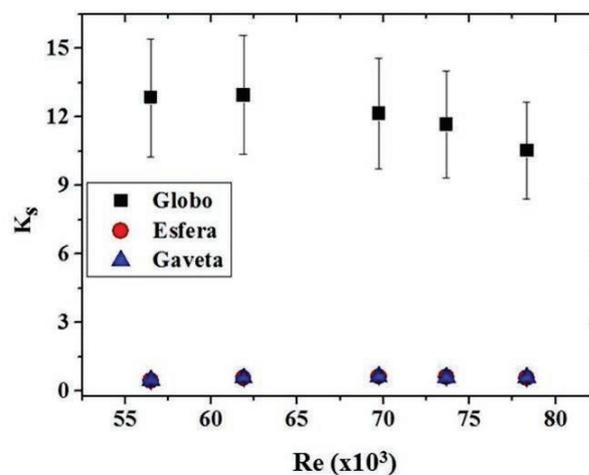
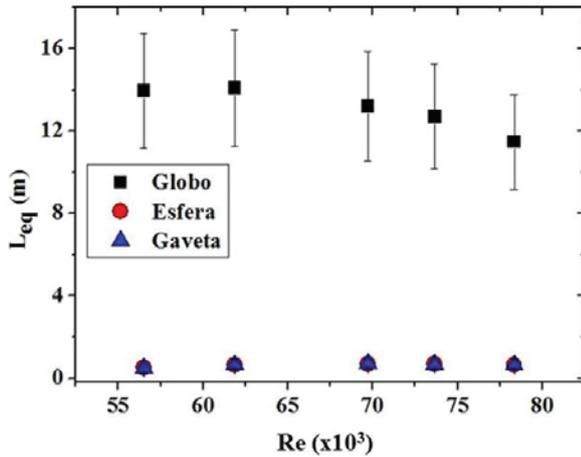


Tabela 3: Valores do coeficiente de perda de carga singular para as válvulas analisadas (METALÚRGICA IPÊ S.A – MIPEL).

Válvula	K_s	K_s - fabricante
Globo	12,04	11,21
Esfera	0,58	0,30
Gaveta	0,58	0,30

Empregando-se os valores obtidos do coeficiente K_s com os valores dos diâmetros hidráulicos D_H e do fator de atrito f para tubos lisos (por meio do diagrama de Moody-Rouse), é possível determinar o comprimento equivalente L_{eq} de cada válvula (Gráfico 5). A contribuição de uma válvula para a perda total de carga de um sistema pode ser calculada pela adição do comprimento equivalente L_{eq} ao comprimento total da tubulação.

Gráfico 5: Comprimento equivalente em função do número de Reynolds para válvulas globo, gaveta e esfera.



Além das diferentes perdas de carga singulares em cada válvula, devem ser salientados pontos relacionados com as diferenças técnicas entre elas. Entre esses pontos, pode-se destacar o fato de a válvula esfera ser uma válvula de bloqueio, que se destina a estabelecer ou interromper o fluxo, e que, portanto, só deve operar aberta ou fechada. A válvula gaveta possui um obturador que desliza para cima e para baixo, como uma barreira, e é projetada para produzir baixas perdas de carga, quando operada totalmente aberta. Já a válvula globo é uma válvula de regulação, destinada para controlar o fluxo, podendo operar em qualquer posição de fechamento. Apesar de apresentarem maior perda de carga, as válvulas globo permitem o controle parcial do fluxo, apresentam abertura e fechamento rápidos e são de fácil manutenção.

Uma análise análoga pode ser efetuada para acessórios introduzidos para alterar a direção do escoamento, como cotovelo 90° e curva. A seguir, são mostrados os resultados da perda de carga singular (Gráfico 6), do coeficiente de perda de carga singular (Gráfico 7), e do comprimento equivalente (Gráfico 8) para esses dispositivos.

Gráfico 6: Perda de carga singular em função da vazão para curva e cotovelo de 90° .

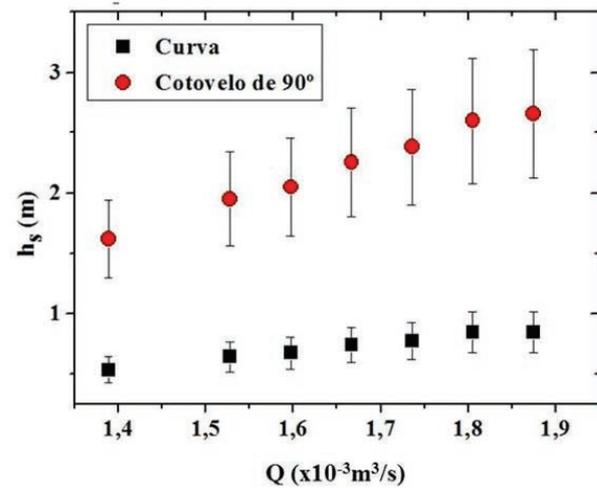


Gráfico 7: Coeficiente de perda de carga singular em função do número de Reynolds para curva e cotovelo de 90° .

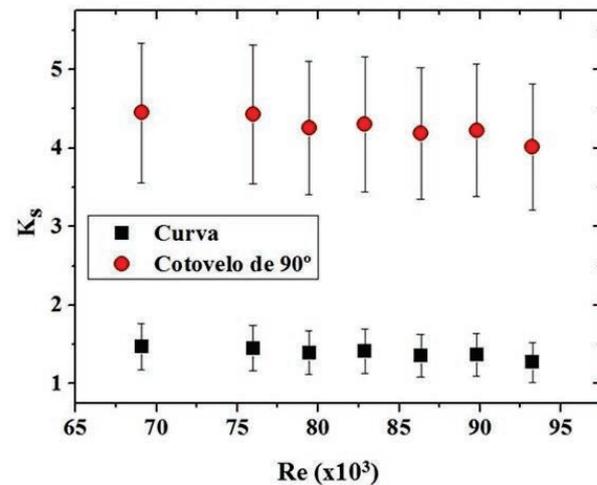
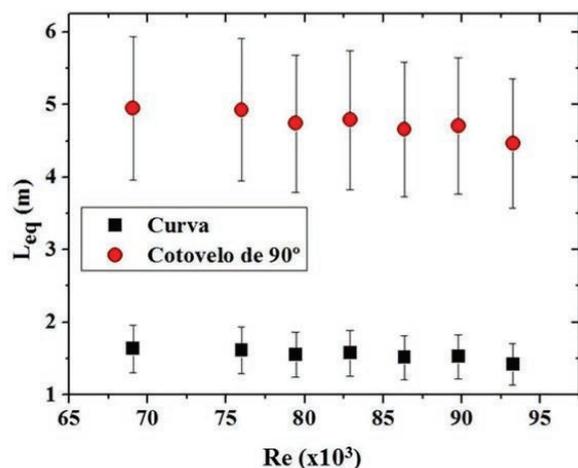


Gráfico 8: Comprimento equivalente em função do número de Reynolds para curva e cotovelo de 90°.



Por se tratarem de componentes mais baratos, cotovelos de 90° são largamente empregados em tubulações. Contudo, os alunos verificaram experimentalmente que esses dispositivos apresentam perda de carga aproximadamente três vezes maior do que curvas.

CONCLUSÕES

Com o intuito de aperfeiçoar e conduzir a um nível mais elevado o aprendizado, o GruPEFE vem desenvolvendo melhorias nos laboratórios de Mecânica dos Fluidos da Universidade Paulista (UNIP). As alterações realizadas tiveram como objetivos otimizar a qualidade das aulas de laboratório, aumentando o tempo dedicado à análise crítica dos resultados e, conseqüente, o interesse dos alunos nos fenômenos físicos associados à cada experimento. Além disso, durante a aquisição e análise dos resultados, priorizou-se o trabalho em grupo, e os alunos foram questionados sobre os fatores que afetaram as medições e as possíveis incertezas associadas às grandezas estudadas.

Na bancada desenvolvida, foi possível analisar a perda de carga distribuída e singular, por meio de medições da variação de pressão em função da vazão volumétrica. Em tubulações, foi possível relacionar a perda de carga distribuída com a rugosidade da parede, decorrente do processo de envelhecimento da tubulação. Já na análise das perdas de carga singulares, como previsto teoricamente, na condição de passagem plena, a válvula globo apresentou maiores perdas por atrito do que os demais acessórios anali-

sados. Ademais, o comportamento dos coeficientes de perda de carga singular obtidos no trabalho esteve de acordo com a teoria.

A fim de melhor preparar os alunos para a vida profissional, durante a aula, devem ser salientados pontos relacionados com as diferenças técnicas dos itens analisados. Entre esses pontos, pode-se abordar o fato de a perda de carga distribuída estar relacionada com o diâmetro da tubulação e com a vazão empregada. Ainda, para os itens inseridos no sistema para alterar a direção de escoamento, como curva de 90° e cotovelo de 90°, os resultados obtidos evidenciam que o arredondamento das bordas ocasiona em uma redução significativa do coeficiente de perda de carga singular. Outro ponto que deve enfatizado na aula é a importância da escolha adequada de itens inseridos em uma tubulação, pois, uma inserção equivocada acarretará maiores gastos com energia e manutenção.

Vale destacar que o custo de aquisição do equipamento foi aproximadamente 20% inferior ao que era praticado anteriormente pela mesma universidade, mesmo com a utilização de materiais mais nobres e duráveis, instrumentação eletrônica e associação de bombas. O projeto do sistema hidráulico empregado nas aulas de Mecânica dos Fluidos foi elaborado pelos membros do GruPEFE e executado por uma ferramentaria, o que explica parte da redução dos custos de aquisição. Os custos de manutenção têm-se demonstrado baixos e os problemas operacionais com vazamentos, até o presente momento, não ocorreram mais.

REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, D. K.; KHAN, Q. M. A quantitative assessment of classroom teaching and learning in engineering education. *European Journal of Engineering Education*, v. 33, n. 1, p. 85-103, 2008.
- ASSAY, T. M. **Mecânica dos fluidos**. Rio de Janeiro: LTC, 2004.
- BRUNETTI, F. **Mecânica dos fluidos**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- BUCH, N. J.; WOLFF, T. F. Classroom teaching through inquiry. *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, v. 126, n. 3, p. 105-109, 2000.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos**. 3. ed. Porto Alegre: AMGH, 2015.

- FERREIRA, P. J. G.; CAVALHERI, T. **Estática dos fluidos**. 2 ed. São Paulo: Thais Cavalheri dos Santos, 2014. ISBN: 978-85-917144-0-7.
- FERREIRA, P. J. G. *et al.* Improving the quality of engineering education: using a Pitot tube system at fluid mechanics laboratories. In: 2015 INTERNATIONAL CONFERENCE ON OPERATIONS EXCELLENCE AND SERVICE ENGINEERING, **Proceedings...** Orlando-Florida, p. 126-133, 2015.
- FESTER, V. G. *et al.* Loss coefficients for flow of newtonian and non-newtonian fluids through diaphragm valves. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 85, n. 9, p. 1.314-1.324, 2007.
- FIESP; SENAI; MIPEL. **Manual para seleção, instalação, uso e manutenção de válvulas de bronze**. Disponível em: <<http://www.tegima.com.br/manuaisenaivalvulas.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2016.
- FOX, R. W.; McDONALD, A. T. **Introduction to Fluid Mechanics**, 8. ed. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2011.
- HELENE, O. A. M.; VANIN, V. R. **Tratamento estatístico de dados em Física Experimental**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1991.
- JONG, T.; LINN, M. C.; ZACHARIAS, Z. C. Physical and virtual laboratories in science and engineering education. **Science**, v. 340, p. 305-308, 2013.
- LIMA, I. B. *et al.* Theoretical and practical integrated: engaging engineering students in fluid Mechanics class. In: 2015 INTERNATIONAL CONFERENCE ON OPERATIONS EXCELLENCE AND SERVICE ENGINEERING, **Proceedings...** Orlando-Florida, p. 214-222, 2015.
- MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. **Fundamentos da Mecânica dos Fluidos**. São Paulo: Edgard Blücher, 1997.
- POLIZELLI, M. A. *et al.* Friction losses in valves and fittings for power-law fluids. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 20, n. 4, p. 455-463, 2003.
- RUSSELL, J. S.; STOUFFER, B.; WALSH, S. G. The first professional degree: a historic opportunity. **Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice**, v. 126, n. 2, p. 54-63, 2000.
- SANTOS, T. C.; FERREIRA, P. J. G. **Fenômenos de Transporte**. São Paulo: Thais Cavalheri dos Santos, 2015. ISBN: 978-85-917144-1-4.
- SANTOS, T. C. *et al.* Mecânica dos fluidos no ensino em engenharia: instrumentação para aprendizagem ativa na determinação da perda de carga. In: XLII COBENGE: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA, **Anais...** São Bernardo do Campo, SP, 2015.
- SHI-HE, L.; JIAO, X.; MIN, F. The calculation of mechanical energy loss for incompressible steady pipe flow of homogeneous fluid. **Journal of Hydrodynamics**, v. 25, n. 6, p. 912-918, 2013.
- TOTH, E. E.; MORROW, B. L.; LUDVICO, L. R. Designing blended inquiry learning in a laboratory context: a study of incorporating hands-on and virtual laboratories. **Innovative Higher Education**, v. 33, n. 5, p. 333, 2009.
- VERTCHENKO, L.; DICKMAN, A. G.; FERREIRA, J. R. F. Transferência de fluido por meio de um sifão *vs.* aplicação da equação de Bernoulli. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 31, n. 3, p. 1-15, 2009.
- WHITE, Frank. M. **Fluid mechanics**. New York, USA: McGraw-Hill, 7. ed., 2010.

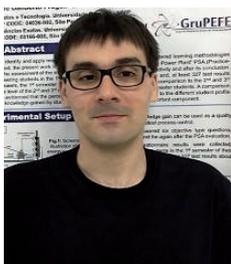
DADOS DOS AUTORES



Thais Cavalheri dos Santos é, atualmente, coordenadora do curso Técnico de Edificações (PRONATEC), professora titular do curso de Engenharia na Universidade Paulista – UNIP e professora adjunta do curso de Engenharia na Universidade São Judas Tadeu. É bacharel em Física Médica pela Universidade de São Paulo – USP, concluído em 2005. Possui mestrado em Ciências, no Programa de Física Aplicada em Medicina e Biologia, pela USP, em 2007. Simultaneamente com o mestrado, cursou o MBA em Gerenciamento de Hospitais e Sistemas de Saúde pela Fundação Getúlio Vargas. Em 2012, concluiu o doutorado em Ciências – Tecnologia Nuclear – Aplicações – USP, pertencente ao Programa de Tecnologia Nuclear do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN. Após a conclusão do doutorado, permaneceu como pesquisadora no IPEN até 2014, quando finalizou seu pós-doutorado. É autora de dois livros didáticos na área de mecânica dos fluidos.



Pedro José Gabriel Ferreira é coordenador de curso de Engenharia, professor, coordenador de laboratórios e membro do GruPEFE na Universidade Paulista – UNIP. Concluiu o curso de Engenharia em Controle e Automação na Universidade Paulista, em 2004. Entre 2006 e 2007, cursou a especialização de Formação de Professores para o Ensino Superior, na UNIP. Em 2011, concluiu o mestrado em Engenharia de Produção, pela UNIP. De 2004 a 2009, trabalhou como engenheiro na Cia. Ultragaz. As principais atividades desenvolvidas foram nas áreas de produção, manutenção, projetos de engenharia, processos de pintura industriais, inspeção de vasos de pressão e testes técnicos. É autor de dois livros didáticos na área de mecânica dos fluidos.



Túlio Cearamicoli Vivaldini é professor do curso de Engenharia, membro do GruPEFE na Universidade Paulista – UNIP. Concluiu o curso de bacharel em Física em 2008, pela Pontifícia Universidade Católica de São Paulo – PUC-SP; mestrado em Ciências em 2010 e doutorado em Ciências em 2014 – Tecnologia Nuclear – Aplicações – pela Universidade de São Paulo – USP, pertencente ao Programa de Tecnologia Nuclear do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN. Tem interesse em métodos de pesquisa experimentais e instrumentação para partículas elementares, física nuclear e atividades práticas aplicadas ao curso de engenharia.



Iara Batista de Lima é professora do curso de Engenharia, membro do GruPEFE na Universidade Paulista – UNIP. Concluiu o curso de bacharel em Física em 2008, pela Pontifícia Universidade Católica de São Paulo – PUC-SP, mestrado em Ciências em 2010 e doutorado em Ciências em 2014 – Tecnologia Nuclear – Aplicações – pela Universidade de São Paulo – USP, pertencente ao Programa de Tecnologia Nuclear do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN. Tem interesse em métodos de pesquisa experimentais e instrumentação para partículas elementares, física nuclear e atividades práticas aplicadas ao Curso de Engenharia.



Alexandre Daliberto Frugoli é assessor da vice-reitoria de Planejamento, Administração e Finanças e da direção do Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia – ICET, coordenador do curso de Engenharia Mecânica, professor (Física e Fluidos) e membro do GruPEFE. Concluiu o curso de Engenharia Mecânica pela Universidade Paulista – UNIP, em 1996. Concluiu o mestrado (2000) e o doutorado (2013) em Engenharia de Produção, pela UNIP.



Pedro Américo Frugoli é diretor do Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia – ICET, coordenador do curso de Engenharia, professor de Física e membro do GruPEFE na Universidade Paulista – UNIP. Possui bacharelado em Física pela Universidade de São Paulo – USP, concluído em 1973. Em 1981, concluiu o mestrado em Física pela USP, e, em 2012, o doutorado em Engenharia de Produção, pela UNIP.