

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA PERDA DE CARGA EM ESCOAMENTO GASOSO

Gabriela Tosi Pelisson¹, Jessica de Oliveira¹, Heitor de Freitas Valle², Matheus Fonseca Campanharo², Esly Ferreira da Costa Junior³

1. Discente do Curso de Engenharia Química da Universidade Federal do Espírito Santo (gabriela_tosip@hotmail.com).
2. Discente do Curso Técnico em Agropecuária integrado com o ensino médio do Instituto Federal do Espírito Santo.
3. Docente do Curso de Engenharia Química. Universidade Federal do Espírito Santo (CCA), Campus de Alegre, Alto. Universitário, s/n, Caixa Postal 16, Guararema, Alegre, ES, BRASIL.CEP: 29500.000

Recebido em: 12/04/2014 – Aprovado em: 27/05/2014 – Publicado em: 01/07/2014

RESUMO

Este trabalho é fruto de um projeto de pesquisa realizado por alunos da graduação em Engenharia Química em parceria com alunos do ensino médio e teve o enfoque na exploração da Perda de Carga. Esta é um fator cuja análise é inevitável em escoamento de fluidos. Neste trabalho são realizados experimentos que determinam a perda de carga, sendo os valores experimentais comparados com aqueles obtidos por correlações da bibliografia. Os materiais empregados são de baixo custo e de fácil acesso, à exceção de compressores. Os experimentos envolveram tubulações de diferentes diâmetros e comprimentos, além de uma conexão na forma de joelho, sendo os valores experimentais muito próximos dos calculados pelas correlações da literatura. Além disso, montou-se um Tubo de Pitot para a determinação da velocidade de escoamento, cujos valores são muito próximos daqueles obtidos por um anemômetro de fio quente.

PALAVRAS-CHAVES: Manômetro; Perda de carga; Tubo de Pitot.

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF HEAD LOSS GASEOUS FLOW

ABSTRACT

This work is the result of a research project conducted by graduate students in Chemical Engineering in partnership with high school students and had a focus on the exploration of Head Loss. This is a factor whose analysis is inevitable in fluid flow. In this work, it has been done experiments which determine the head loss, and the experimental values are compared with those obtained from literature correlations. The materials used are inexpensive and easily accessible, except compressors. The experiments involved pipes of different diameters and lengths, as well as a knee pipe, and the obtained experimental values are very close of those obtained through correlations from literature. Moreover, it has been assembled a Pitot tube for determining the flow velocity, which values are very close to those obtained by a hot wire anemometer.

KEYWORDS: Manometer; Head Loss; Pitot Tube.

INTRODUÇÃO

Atualmente, com a utilização em larga escala de equipamentos industriais que envolvem escoamento de fluidos em sistemas abertos ou fechados, há a necessidade de se estudar conceitos da Mecânica dos Fluidos para que não existam confusões entre os termos dessa área, como expõem BRUNETTI (2008).

Conceitos como dimensionamento de tubulações, vazão, velocidade de escoamento, pressão e perda de carga, são de tamanha importância, que seu uso não se restringe às áreas industriais e das engenharias (ROTAVA, 2012), tendo, por exemplo, uso no meio agrícola, especialmente nos trabalhos de irrigação (NETO et al., 2013; RETTORE et al. 2009) e de transporte pneumático de grãos (BORTOLAIA et al., 2008, MELO, 2008).

A maioria dos sistemas reais apresenta perdas por atrito e nas tubulações isso também acontece. O deslocamento do fluido no interior de uma tubulação provoca um atrito deste fluido com as paredes internas desta tubulação, atrelado a isto gera-se uma turbulência do fluido com ele mesmo. Esses processos ocasionam uma diminuição gradual da pressão que existe no interior da tubulação à medida que o fluido se desloca. A este fenômeno dá-se o nome de Perda de Carga (h_L) (GERNER, 2013).

Como na prática não existem somente tubulações retilíneas, pode-se dizer então que há dois tipos de Perda de Carga, a Distribuída e a Localizada. A Distribuída se dá quando a pressão vai diminuindo de forma decrescente ao longo do tubo. Já a Localizada é causada pelos acessórios de canalização uma vez que os mesmos causam variações bruscas na velocidade, em módulo e direção. Para obter-se a perda de carga total somam-se todas as perdas sofridas ao longo da tubulação (BARRAL, 2013).

Ressalta-se ainda que este trabalho é um dos resultados de um projeto aprovado na chamada CNPq/VALE S.A. nº 05/2012, cuja equipe é composta de alunas da graduação em Engenharia Química, por alunos e um docente do ensino médio, sob orientação de um professor da UFES. O objetivo da chamada foi o estímulo da formação de engenheiros, tendo em vista a carência de profissionais desta área em países em desenvolvimento como o Brasil.

Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho é o desenvolvimento de aparatos experimentais para a análise de perda de carga em tubulações e em conexão na forma de joelho. Além da determinação dos valores experimentais de perda de carga, almeja-se compará-los com os valores obtidos por correlações empíricas da literatura. Mais além, propõem-se o desenvolvimento de práticas que permitam a fixação pelos alunos de graduação e ensino médio de conceitos relacionados ao escoamento em tubulações.

MATERIAL E MÉTODOS

Para os experimentos de perda de carga realizados no LEQ 2, prédio do Reuni no campus do CCA – Ufes no segundo semestre de 2013, foram necessários um compressor radial de ar do modelo CRE-01, marca Mack Ven, tubulações e conexões de PVC, uma furadeira comum e dois tubos em U confeccionados artesanalmente. Para a construção dos tubos em U, e posterior medição neles, conforme COELHO (2011), utilizando-se madeiras, encapando-as com papel milimetrado, que já ofereceria a escala milimétrica, para então ser fixadas a elas mangueiras finas transparentes, conforme apresentado na Figura 1.

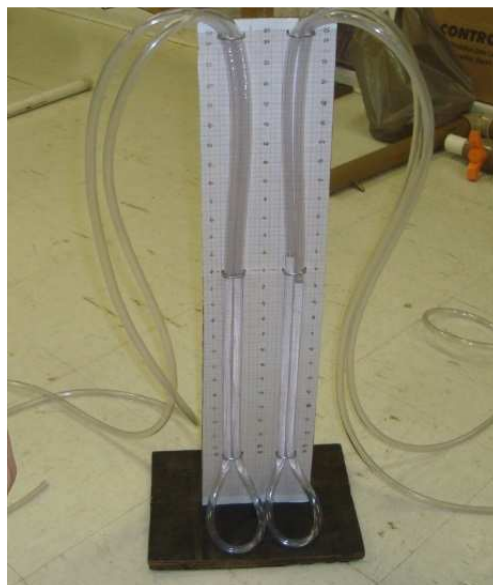


FIGURA 1 – Tubo em U construído de forma artesanal.

Fonte: Os autores.

Os furos para a inserção dos encaixes para as medições das perdas de carga foram realizados com furadeira, conforme apresentado na Figura 2. Nesta figura são apresentados: o encaixe para a simples medição de pressão e o encaixe na forma de cotovelo para o tubo de Pitot. Apresenta-se também o encaixe da mangueira do tubo em U. Para a medição da queda de pressão, são necessários dois encaixes simples, já no Pitot é utilizado um encaixe simples no primeiro furo e um cotovelo no segundo, como pode ser observado na Figura 2.



FIGURA 2 – Encaixes simples (medição da diferença de pressão), tipo cotovelo para o Tubo de Pitot e imagem de como é feita a conexão da mangueira do tubo em U.

Fonte: Os autores.

Todas as medidas de diferença de coluna d'água são feitas de forma direta, apenas somando-se o tamanho da coluna que se forma acima e abaixo do marco zero do tubo em U. Na Figura 3 apresenta-se uma diferença de pressão de aproximadamente 2 centímetros de coluna de água, $h \approx 2$ cmca, à esquerda e uma diferença nula de pressão à direita.



FIGURA 3 – Medições no tubo em U.
Fonte: Os autores.

1º experimento: Com o tubo de 0,5 m de comprimento e 2 cm de diâmetro interno, encaixou-se o tubo de Pitot e calculou-se a velocidade, através da fórmula (CREMASCO, 2012):

$$v_1^2 = \frac{2 \cdot g \cdot h \cdot (d_{H_2O} - d_{ar})}{d_{ar}} \quad (1)$$

onde h é a diferença de coluna d'água no Tubo em U e d_{ar} pode ser obtido através da lei dos gases ideais:

$$d_{ar} = \frac{m}{V} = \frac{n \cdot MM}{V} \quad \rightarrow \quad n = \frac{p \cdot V}{R \cdot T} \quad d_{ar} = \frac{p \cdot MM}{R \cdot T} \quad (2)$$

Baseada nas equações abordadas por FOX (2006) e BRUNETTI (2008) é possível ainda calcular outros fatores importantes, como expostas a seguir:

$$Q = \frac{V}{\Delta t}$$

Considerando uma tubulação em que o volume é dado através de área da seção transversal em um determinado espaço:

$$V = A \cdot \Delta x \quad Q = \frac{A \cdot \Delta x}{\Delta t} \quad \rightarrow \quad Q = A \cdot v \quad (3)$$

Logo após, mediu-se a perda de carga em cm de coluna d'água entre a proximidade da base e o final, totalizando uma distância de cerca de 0,4 m e comparou-se o resultado experimental com o teórico. Este cálculo é feito pela fórmula (CREMASCO, 2012):

$$h_{L_{ar}} = \frac{2f \cdot v^2 \cdot L}{g \cdot D} \quad (4)$$

Que dará um resultado em metros de coluna de ar (fluido do escoamento), o que não é interessante visto que o tubo de Pitot é em centímetros de coluna d'água (cmca). Desta forma a conversão para que o valor calculado também seja dado em cmca é feita da seguinte forma:

$$h_L = \frac{d_{ar} \cdot h_{L_{ar}}}{d_{H_2O}} \cdot 100 \quad (5)$$

Assim, para chegar-se no valor teórico é necessária a obtenção de f a partir da determinação do número de Reynolds e a rugosidade relativa da parede do duto, dados respectivamente por:

$$Re = \frac{d_{ar} \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (6)$$

e

$$k_r = \frac{\varepsilon}{D} \quad (7)$$

Como $\varepsilon = 5 \cdot 10^{-6}$ m para a tubulação de PVC, f é obtido através do diagrama de Moody modificado da Figura 4.

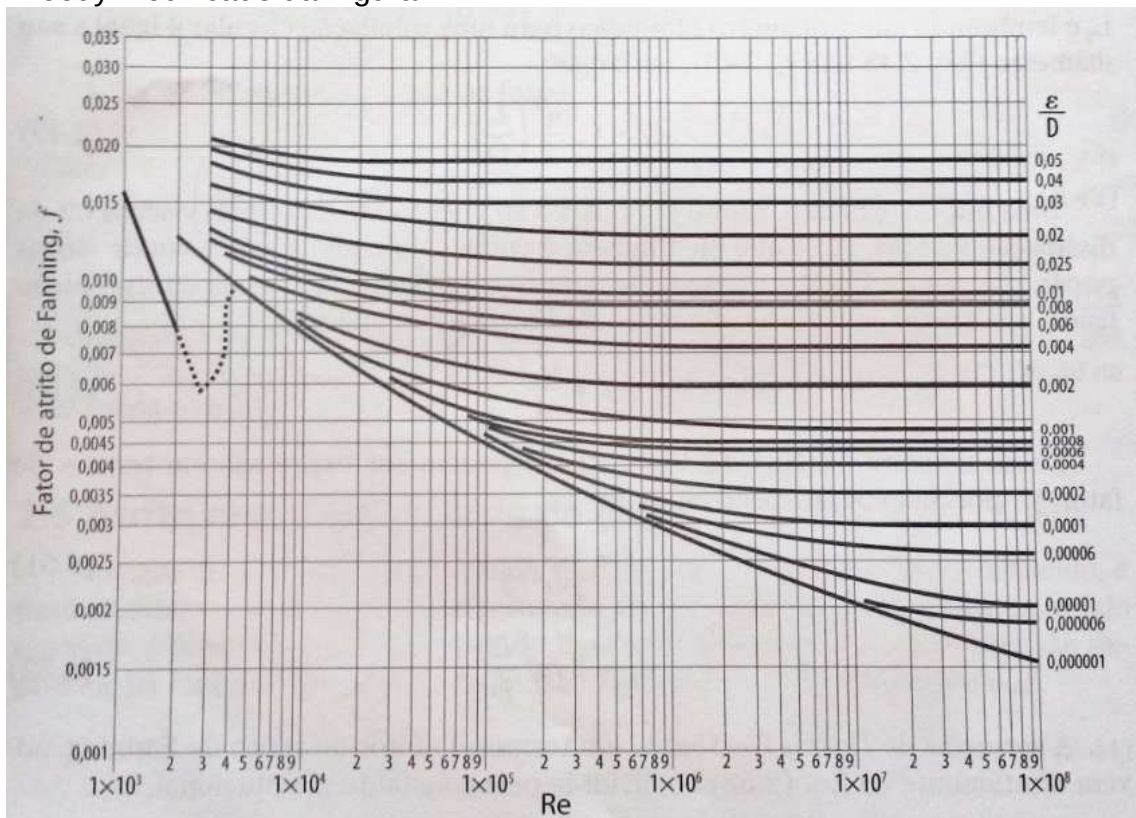


FIGURA 4 – Obtenção de “ f ” por método gráfico.

Fonte: CREMASCO (2012).

Assim, h_L pode ser calculado.

2º experimento: Repetiu-se o procedimento anterior para o tubo de 2,5 cm de diâmetro interno com 0,5 m de comprimento.

3º experimento: Com o tubo de mesmo diâmetro de último, porém com 3 m de comprimento calculou-se a velocidade e a perda de carga a uma distância de 0,9 m, 1,8 m e 2,7 m, como observado na Figura 5, a fim de observar o comportamento e a progressão da mesma variando a vazão de entrada, comparando-se com as obtidas no manômetro.



FIGURA 5 – Instalação para o tubo de 3 m de comprimento
Fonte: Os autores.

Este procedimento foi feito colocando-se um registro à entrada de ar do compressor e deixando sua abertura de início completamente aberta, permitindo a completa entrada de ar e logo após com 70 e 40% do registro aberto, dificultando gradualmente a entrada de ar, como mostrado na Figura 6. É importante ressaltar que não é recomendado o fechamento total do registro para o compressor não ser forçado.



FIGURA 6 – Registro completamente aberto, 70 e 40% aberto, respectivamente.
Fonte: Os autores.

4º experimento: Com o tubo mais grosso de 4,2 cm de diâmetro interno, fez-se uma instalação diferente. A partir da saída do compressor foi posto um Tê onde na direção de compressor havia um registro e perpendicular a ele ficava a tubulação,

Figura 7, assim os cálculos de velocidades com o Pitot foram feitos com o registro completamente fechado, 50% fechado e completamente aberto.



FIGURA 7 – Instalação para a tubulação mais grossa.
Fonte: Os autores.

Observando a fórmula da vazão é esperado que com uma tubulação mais grossa, a velocidade para uma mesma vazão seja menor assim é possível usar o anemômetro, já que este tem velocidade máxima de medição de 20 m/s, o que não condizia com os experimentos anteriores. O aparelho utilizado foi um Medidor de Pressão Volumétrica, modelo 188 da marca Homis, referência: H004-016. Desta forma compararam-se as velocidades no Tubo de Pitot com as do anemômetro a fim de observar a veracidade das medições com o Pitot.



FIGURA 8 – Medição da velocidade feita com o anemômetro.
Fonte: Os autores.

Como pode ser observado nas imagens acima, instalou-se um joelho no final desta tubulação para medir-se a perda de carga localizada com as mesmas aberturas de registro ditas acima através da fórmula (CREMASCO, 2012):

$$h_L = k_f \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (8)$$

Com $k_f = 1,16$ para a tubulação utilizada (valor estimado de acordo com os diâmetros tabelados). A conversão para o valor em cmca também é feita com a Equação (5). Compararam-se os resultados aos obtidos no manômetro.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Adotando-se a densidade da água como $d_{H_2O} = 1000 \text{ kg/m}^3$ e obtendo a densidade do ar no dia com $T = 25^\circ\text{C}$ como $d_{ar} = 1,17 \text{ kg/m}^3$ ($MM_{ar} = 0,02898 \text{ kg/mol}$), chegou-se aos valores da Tabela 1 de velocidade e vazão de todos os procedimentos, considerando o h obtido no tubo de Pitot e as fórmulas dadas acima.

TABELA 1 – Velocidade e vazão para cada tubulação.

	1º experimento	2º experimento	3º experimento			4º experimento		
			100%	70%	40%	0%	50%	100%
r (m)	0,01	0,012	0,012			0,021		
h (m)	0,165	0,105	0,067	0,045	0,035	0,017	0,010	0,002
v (m/s)	52,6	41,9	33,5	27,4	24,2	16,7	12,9	5,79
Q (m³/s)	0,017	0,020	0,016	0,013	0,012	0,023	0,018	0,008

As porcentagens apresentadas no 3º e 4º procedimento referem-se ao nível de abertura do registro. Lembrando que no 3º experimento o registro foi instalado na entrada do compressor, onde não é permitido o completo fechamento do mesmo (0% de abertura). Já no experimento 4 isso é possível, pois o mesmo foi instalado na saída do compressor, assim o completo fechamento dele diz apenas que toda vazão

é direcionada para a tubulação secundária.

Ainda sobre este experimento, observa-se que a instalação foi feita de forma que o direcionamento preferencial do ar seja na direção do registro que quanto mais aberto está, menos induz a passagem do ar para a instalação secundária. O que é facilmente observado pela diminuição da vazão nos resultados.

Ao ser utilizado o anemômetro para medição de velocidade no tubo mais largo, os resultados se mostraram muito parecidos com os obtidos no tubo de Pitot, sendo eles 18,7 m/s, 13,5m/s e 6,4 m/s equivalentes, respectivamente, aos 16,9 m/s, 12,9 m/s e 5,8 m/s do Pitot. Sendo assim, todas as velocidades calculadas são consideradas verídicas.

Conforme era esperado, tratando-se do mesmo compressor, apesar das perdas, a velocidade comprovadamente diminuiu com o aumento do raio da tubulação e a vazão máxima mantém-se parecida com a mudança de diâmetro, cerca de 18L de ar por segundo.

As perdas de carga distribuídas obtidas através das fórmulas e do manômetro são apresentadas na Tabela 2.

TABELA 2 – Perda de carga distribuída para cada tubulação.

	1°exper.	2°exper.	3°experimento								
			100%			70%			40%		
v (m/s)	52,6	41,9	33,5			27,4			24,2		
D (m)	0,021	0,025	0,025								
Re	6,638.10 ⁴	6,619.10 ⁴	5,287.10 ⁴			4,333.10 ⁴			3,81.10 ⁴		
k _r	2,842.10 ⁻³	2,273.10 ⁻³	2,273.10 ⁻³			2,273.10 ⁻³			2,273.10 ⁻³		
f	0,0072	0,0068	0,0069			0,0072			0,0073		
L ₁ (cm)	40,0	40,0	90,0	180,0	270,0	90,0	180,0	270,0	90,0	180,0	270,0
h _L (cmca)	9,5	4,3	6,6	13,3	19,9	4,7	9,3	14	3,7	7,3	11
h _L manômetro (cmca)	7,5	3,5	6,0	10,5	15	5,2	9,7	14,7	3,5	6,6	9,0

Fonte: Dados da pesquisa.

Os dois primeiro experimentos, onde os tubos têm o mesmo comprimento, mostraram que quanto menor o diâmetro do tubo, maior a perda de carga, isso pode ser explicado pelo fato de ter-se um espaço menor para a passagem do ar, logo haverá maior atrito nas paredes da tubulação e turbulência no fluido.

Para ser observado o comportamento da perda de carga em relação ao aumento do comprimento do tubo, do 3° experimento, os resultados obtidos são apresentados graficamente nas Figuras 9, 10 e 11.

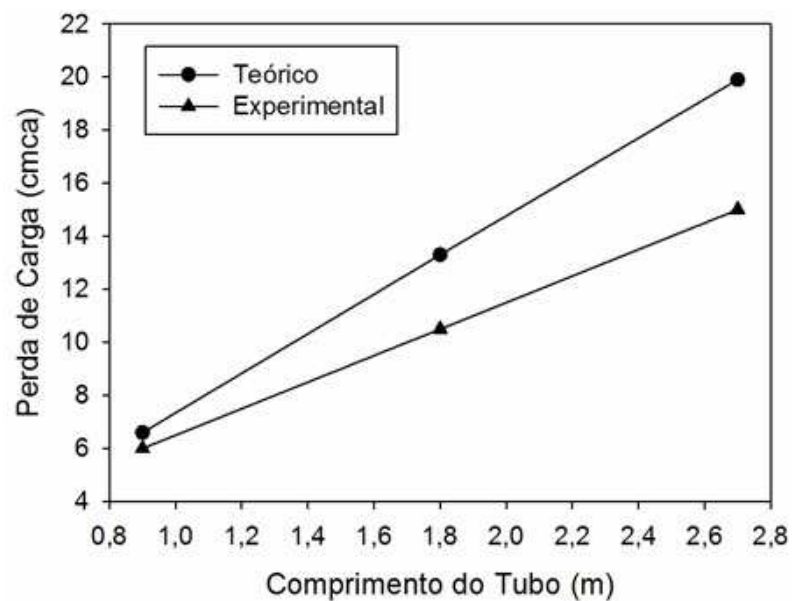


FIGURA 9 – Progressão da perda de carga com registro completamente aberto.

Fonte: Dados da pesquisa.

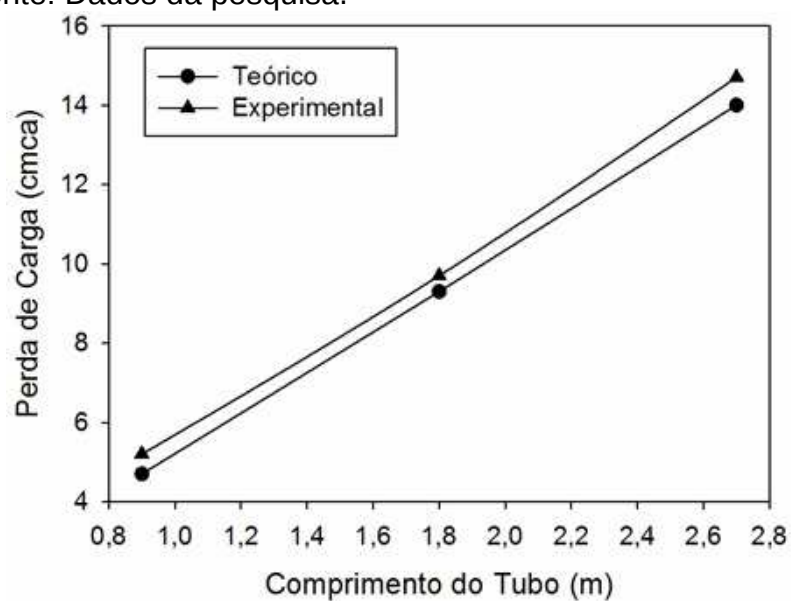


FIGURA 10 - Progressão da perda de carga com registro 70% aberto.

Fonte: Dados da pesquisa.

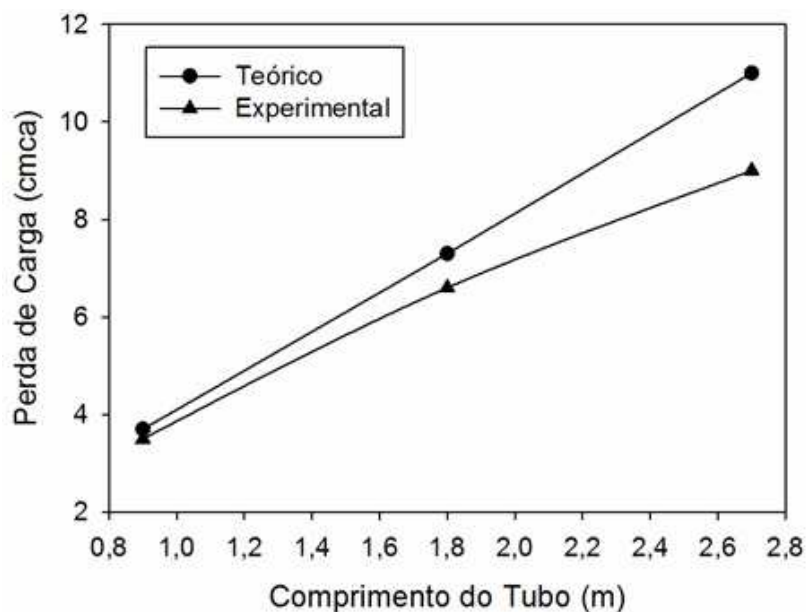


FIGURA 11 - Progressão da perda de carga com registro 40% aberto.
Fonte: Dados da pesquisa.

Nota-se que, nas três vazões testadas (registro aberto completamente, aberto em 70% e em 40%), o aumento do comprimento, que foi de 90 em 90 cm, provocou um aumento linear de perda de carga. Este comportamento já era esperado observando-se a Equação 4. Mais além, os valores teóricos se aproximam bastante dos obtidos experimentalmente, comprovando a veracidade dos dados

Quando se considera a diferença entre os valores calculados e experimentais da perda de carga, observa-se um comportamento interessante nas Figuras 9 a 11. Verifica-se que a Equação 4 superestima o valor da perda de carga experimental para valores mais altos de vazão, conforme Figura 9. Entretanto, esta Equação 4 subestima a perda de carga para valores menores de vazão, conforme Figura 11. Acredita-se que este resultado está relacionado ao aumento da turbulência no escoamento com o aumento da vazão (proporcional ao aumento da velocidade do ar).

A perda de carga total do 4º experimento é a soma da localizada, proporcionada pelo joelho instalado, e da distribuída, nos 45 cm de tubulação percorrida entre os dois encaixes da medição. Na Tabela 3 estão os resultados com o registro nas três posições adotadas no experimento (que corresponde a 3 valores diferentes de velocidade do ar):

TABELA 3 – Perdas de Carga obtidas com uso do joelho.

	Fechado	50% Fechado	Aberto
v (m/s)	16,9	12,9	5,9
$h_{L \text{ localizada}}$ (cmca)	2,0	1,2	0,232
$h_{L \text{ distribuída}}$ (cmca)	0,516	0,316	0,064
$h_{L \text{ total}}$ (cmca)	2,516	1,516	0,296
$h_{L \text{ manômetro}}$ (cmca)	2,0	1,1	0,1

Fonte: Os autores.

Para a observação mais clara do comportamento da perda de carga em relação à velocidade de escoamento do 4º experimento, os resultados são apresentados na forma gráfica na Figura 12.

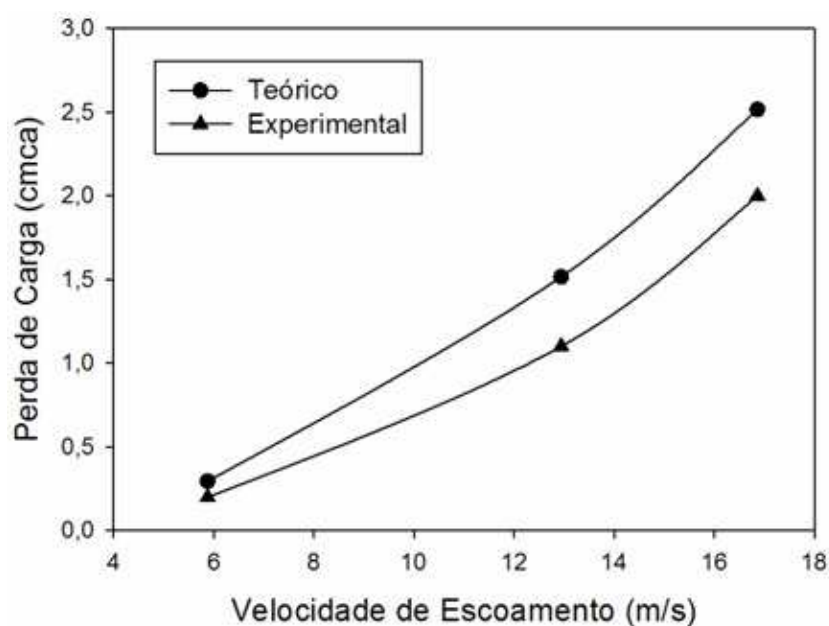


FIGURA 12 – Progressão da Perda de Carga na instalação com joelho.

Fonte: Os autores.

Como pode ser observada na Figura 12, essa progressão deu-se de forma não linear, gerando uma curva, o que já era esperado pelos dados apresentados por BEZERRA (2011), visto que a perda de carga está em função do quadrado da velocidade na Equação (8). Considera-se ainda que os resultados experimentais são muito próximos dos teóricos, tendo-se um retorno satisfatório do experimento, especialmente quando se compara o comportamento qualitativo das curvas.

CONCLUSÕES

No presente trabalho, foram apresentados aparatos experimentais para a exploração dos conceitos de vazão, velocidade de escoamento e perda de carga.

Os resultados obtidos para o tubo de Pitot montado indicam que a velocidade medida pelo mesmo pode ser adotada com razoável precisão como a velocidade de escoamento. Ressalta-se o baixo custo envolvido na montagem deste instrumento de medição de velocidade.

Para a perda de carga, os resultados obtidos experimentalmente empregando-se os manômetros tubo em U construídos e aqueles obtidos por correlações da literatura são muito próximos tanto para a perda de carga localizada, que é uma função não linear da velocidade, quanto para a perda de carga distribuída, que é uma função linear do comprimento.

Destaca-se que, à exceção dos compressores radiais, todo o material utilizado para a realização dos experimentos é de baixo custo e fácil acesso, sendo que a participação dos alunos de graduação e do ensino médio na montagem e execução dos experimentos permitiu aos mesmos explorar conceitos que em geral são obtidos apenas de maneira teórica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelas bolsas aos alunos envolvidos, pelo financiamento dos experimentos e pelas bolsas de produtividade DTI.

NOMENCLATURAS

v	Velocidade de escoamento	[m/s]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
h	Altura de coluna d'água	[m]
ρ_{H_2O}	Densidade da água	[kg/m ³]
ρ_{ar}	Densidade do ar	[Kg/m ³]
n	Número de mols	[-]
p	Pressão atmosférica	[atm]
V	Volume	[L]
R	Constante universal dos gases = 0,082	[atm.L/K.mol]
T	Temperatura	[K]
m	Massa	[kg]
MM	Massa molar	[kg/mol]
Q	Vazão	[m ³ /s]
Δt	Variação de tempo	[s]
A	Área da secção	[m ²]
Δx	Variação de espaço	[m]
r	Raio da tubulação	[m]
$h_{L\ ar}$	Perda de carga de ar	[m coluna de ar]
f	Fator de atrito	[-]
L	Comprimento da tubulação	[m]
D	Diâmetro da tubulação	[m]
h_L	Perda de carga em termos de coluna d'água	[cmca]
$h_{L\ manômetro}$	Perda de carga medida no manômetro	[cmca]
Re	Número de Reynolds	[-]
μ	Viscosidade dinâmica do ar = $1,853 \cdot 10^{-5}$	[Pa.s]
k_r	Rugosidade relativa do tubo	[-]
ε	Rugosidade média da tubulação	[-]
k_f	Coeficiente de perda de carga localizada	[-]

REFERÊNCIAS

- BARRAL, M. **Perda de carga.** Disponível em: http://www3.fsa.br/localuser/barral/Op_unit/Perda_de_carga.pdf. Acesso em: 23 de novembro de 2013.
- BEZERRA, H. M. A.; PORDEUS, R. V.; LIMA, V. I. A.; SILVA, S. S.; LIMA, J. A.. Influência da Concentração de Cloreto de Sódio no Coeficiente de Descarga em Orifícios. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer – Goiânia. V. 7. 2011.
- BORTOLAIA, L. A.; ANDRIGHETTO, P. L.; BENATTI, M.. Avaliação técnica de um transportador pneumático de grãos por aspiração. **Ciência Rural**, V.38, n.2, 2008
- BRUNETTI, F. **Mecânica dos fluidos**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, p. 38 – 46, 2008.
- COELHO, M. S. **Instrumentação de sistemas**. São Paulo, 2011. 252 p. Apostila do Curso Superior de Tecnologia em automação e controle de processos industriais contínuos – Ifes.
- CREMASCO, M. A. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos**. São Paulo: Blucher, p. 36-51, 2012.
- FOX, Robert W.; MCDONALD Alan T.; PRITCHARD Philip J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. Rio de Janeiro: LTC, p. 50-59, 2006.
- GERNER, V. R. **Perda de carga e comprimento equivalente**. Disponível em: <http://www.sp.senai.br/portal/refrigeracao/conteudo/perda%20de%20carga%20-valterv.1.pdf>. Acesso em: 20 de dezembro de 2013.
- MELO, F. A. O.. **Desenvolvimento e avaliação de um secador de fluxos concorrentes, com carga, revolvimento e descarga pneumáticos**, Tese de doutorado, Programa de Engenharia Agrícola da UFV, 2008.
- NETO, J. D.; LIMA, V. L. A.; SILVA, P. F.; SANTOS, C. S.; SILVA, L. F. D. Unidades Produtoras da Agricultura Familiar no Perímetro Irrigado de Sumé, PB. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer – Goiânia. V. 9. 2013.
- RETTORE NETO, Osvaldo; FRIZZONE, José A.; MIRANDA, Jarbas H.; BOTREL, Tarlei A.. Perda de carga localizada em emissores não coaxiais integrados a tubos de polietileno. **Eng. Agríc.**, v.29, n.1, 2009.
- ROTAVA, O. **Aplicações práticas em escoamento de fluidos**. Rio de Janeiro: LTC, p. 116 – 151, 2012.