

PERDA DE CARGA EM TUBULAÇÕES: UMA ANÁLISE ENTRE MODELOS TEÓRICOS E DADOS EXPERIMENTAIS

HEAD LOSS IN PIPE: AN ANALYSIS OF THEORETICAL MODELS AND EXPERIMENTAL DATA

VICTORIA LUIZA RABELO COTRIM

IF Goiano - Instituto Federal Goiano, Trindade (GO)

eng.victorialuiza@gmail.com

VINÍCIUS OTTO DE AGUIAR RITZMANN MARZALL

IF Goiano - Instituto Federal Goiano, Trindade (GO)

vinicius.marzall@ifgoiano.edu.br

Resumo: Este estudo investiga a perda de carga contínua e localizada em tubulações de cobre de pequeno diâmetro, comparando resultados experimentais a diferentes formulações teóricas. Ensaios em bancada foram realizados em tubo de 13,9 mm de diâmetro sob distintas vazões e acessórios hidráulicos, permitindo a determinação da perda de carga distribuída e dos coeficientes de perda localizada. Os resultados experimentais foram confrontados com as equações de Darcy-Weisbach (Fórmula Universal), Fair-Whipple-Hsiao, Flamant, Hazen-Williams e Manning, além de valores de coeficientes K e comprimentos equivalentes da literatura. A equação de Fair-Whipple-Hsiao apresentou os resultados mais próximos aos ensaios, com erro médio de 3,15%, seguida de Flamant (6,87%), Manning (8,44%) e Darcy-Weisbach (8,47%). Já a Hazen-Williams superestimou em média 117,76% a perda de carga. Para a perda localizada, os coeficientes K e comprimentos equivalentes foram, em geral, inferiores aos valores de referência, indicando superdimensionamento das tabelas normativas. Conclui-se que a adequação das formulações depende do diâmetro e da condição de escoamento, e que dados experimentais são fundamentais para projetos hidráulicos mais precisos e econômicos.

Palavras-chave: Perda de carga; Sistemas hidráulicos; Dimensionamento de tubulações; Métodos de cálculo; Ensaios experimentais.

Abstract: This study investigates continuous and localized head loss in small-diameter copper pipes, comparing experimental results with different theoretical formulations. Bench tests were carried out on a 13.9 mm diameter pipe under various flow rates and hydraulic fittings, enabling the determination of distributed head loss and localized loss coefficients. The experimental results were compared with the Darcy-Weisbach (Universal Formula), Fair-Whipple-Hsiao, Flamant, Hazen-Williams, and Manning equations, as well as K coefficients and equivalent lengths from the literature. The Fair-Whipple-Hsiao equation yielded the closest results to the experiments, with an average error of 3.15%, followed by Flamant (6.87%), Manning (8.44%), and Darcy-Weisbach (8.47%). In contrast, Hazen-Williams overestimated head loss by an average of 117.76%. For localized losses, the experimental K coefficients and equivalent lengths were generally lower than the reference values, indicating that normative tables tend to oversize designs. The study concludes that the suitability of the formulations depends on pipe diameter and flow conditions, and that experimental data are essential for achieving more accurate and cost-effective hydraulic designs.

Keywords: Head loss; Hydraulic systems; Pipeline design; Calculation methods; Experimental tests.

Introdução

O fluido perde energia ao escoar ao longo de uma tubulação e ao passar por acessórios hidráulicos, ocasionando o fenômeno perda de carga (MACINTYRE, 1990). Este, é dividido em perda de carga contínua ou distribuída, que ocorre ao longo da tubulação, e perda de carga localizada, oriunda da presença de acessórios hidráulicos tais como joelhos, curvas, tês, reduções, alargamentos, válvulas entre outros (AZEVEDO NETTO, 1998). O estudo da perda de carga se faz notório, visto que, o mau dimensionamento ou a desconsideração de tal grandeza pode ocasionar problemas como: ruídos na tubulação, vazamentos, pressão negativa no sistema, e até ineficiência dos pontos de utilização, implicando em custos financeiros adicionais (SANTOS, 2022). Além disso, o dimensionamento de qualquer tubulação prevê a necessidade do cálculo da grandeza perda de carga (MACINTYRE, 1990, p. 16). E, segundo aborda Silva (2016), para tubulações de pequenos diâmetros a perda de carga é considerada significativa.

Existem diversas equações para o cálculo da perda de carga contínua, dentre as quais estão a formulação teórica proposta por Darcy-Weisbach, denominada Fórmula Universal, e as equações semiempíricas de Fair-Whipple-Hsiao, Flamant, Hazen-Williams e Manning (SANTOS, 2022). Cada equação possui diferentes parâmetros e limitações, que demandam constantes estudos afim de identificar a adequabilidade de cada uma as variadas situações de projeto, como demonstram este e os estudos de Matheus (2023), Silva (2021), Sousa (2018), Silva (2016) e Tagliaferre et. al (2006). Azevedo Netto (1998) enfatiza que essas limitações não tem significado absoluto. Geralmente os diâmetros mínimos e máximos são fixados para a aplicação de cada fórmula, como é o caso da formulação de Fair- Whipple-Hsiao e Flamant, indicadas para diâmetros pequenos de $\frac{1}{2}$ a 2" (12,7 mm a 50,8 mm), Hazen-Williams para diâmetros de 50 mm a 35000 mm, enquanto a Fórmula Universal é aplicável a qualquer faixa de escoamento (AZEVEDO NETTO, 1998). De forma geral, as formulações de perda de carga consideram parâmetros geométricos do escoamento, propriedades do fluido, e os princípios básicos da equação da energia, além de aspectos empíricos em alguns casos (MACINTYRE, 1990, p. 18).

A existência de acessórios hidráulicos nas tubulações, ocasionam um acréscimo de turbulência no escoamento (PORTO, 2006, p. 69). Tal condição, resulta em perda de

carga adicional na região na qual são empregados tais dispositivos, denominada como perda de carga localizada. Dentre os métodos empregados no cálculo da perda de carga nestas situações estão o método dos comprimentos equivalentes, que dispõe de valores tabelados, e a equação geral da perda de carga localizada, que utiliza o coeficiente K (PORTO, 2006, p. 70-84).

Dada a existência de diversas formulações para obtenção da perda de carga, surge a dúvida de qual oferece o dimensionamento mais preciso e adequado a cada situação de projeto (SAMPAIO, PESSI; SUSZEK, 2010). Além disso, a NBR5626/2020 propõe a fórmula universal para o dimensionamento predial de água fria e quente, comumente utilizada, nacionalmente, para o cálculo da perda de carga distribuída (FURUSAWA, 2011). Além disso, a NBR5626/1998 propunha uma tabela de valores de comprimento equivalente a ser utilizada, a qual já não está mais presente na nova atualização da norma, porém serve de parâmetro comparativo. Portanto, justifica-se a análise comparativa entre a Fórmula Universal e as demais formulações aplicadas a situação de perda de carga contínua ensaiada, assim como a análise da aplicação dos coeficientes K e dos comprimentos equivalentes tabelados para as conexões do ensaio.

Experimentalmente, a perda de carga pode ser obtida através de ensaios em bancada de mecânica dos fluidos, onde podem ser realizadas simulações de sistemas hidráulicos com tubulações e conexões de diâmetros pré-determinados, e feita a aferição da pressão inicial e final desses sistemas (SILVA, 2021). Com os dados obtidos em ensaio, é possível calcular a perda de carga do sistema hidráulico, realizar uma análise comparativa e validar com demais estudos e literaturas consolidadas.

Foram realizados ensaios para estimar a perda de carga distribuída a diferentes vazões em tubulação de cobre, comparando os resultados obtidos com os calculados pelas equações da Fórmula Universal, Fair-Whipple-Hsiao, Flamant, Hazen-Williams e Manning. De maneira similar, foram realizados ensaios de perda de carga localizada em diferentes acessórios, e obtidos resultados de coeficientes K, da equação geral da perda de carga localizada, e comprimentos equivalentes, para posterior comparação com os propostos pela literatura. Após essa análise, foi possível relacionar quais das formulações apresentam os resultados mais compatíveis com a situação ensaiada, e inferir coeficientes de perda de carga localizada para cada conexão na situação analisada.

Pesquisas anteriores têm explorado esse tema em diferentes contextos, como nos trabalhos de Sousa (2018), que comparou equações empíricas com a Fórmula Universal em projetos de irrigação pressurizada; Sampaio, Pessi e Suszek (2007), que analisaram equações em tubulações de PVC em laboratório; e Barros et al. (2018), que investigaram computacionalmente a perda de carga localizada em curvas de 90°. Entretanto, ainda são limitadas as investigações experimentais voltadas especificamente para tubulações de cobre de pequeno diâmetro, amplamente utilizadas em instalações prediais. Dessa forma, a contribuição inovadora deste estudo consiste em fornecer resultados experimentais que permitam validar e indicar as formulações mais adequadas para essa aplicação, além de estimar coeficientes de perda de carga localizada, suprimindo uma lacuna relevante na literatura atualizada.

Materiais e métodos

O presente tópico visa apresentar os procedimentos metodológicos utilizados para determinação da perda de carga distribuída e localizada, sendo descrito os métodos de cálculo por meio de formulações teórico empíricas e o procedimento experimental em bancada de mecânica dos fluidos.

Equacionamento da perda de carga

A partir do diâmetro interno da tubulação, material empregado e vazões, foram estimados os valores de perda de carga distribuída através de formulações teórico empíricas. As formulações foram Fair-Whipple-Hsiao, Flamant, Fórmula Universal, Hazen-Williams e Manning.

Para a perda de carga localizada, foi equacionado o coeficiente K e obtidos os valores de comprimentos equivalentes a partir da perda de carga ensaiada. Além disso, foi calculada a perda de carga localizada teórica (analítico) através de valores de coeficientes K e comprimentos equivalentes disponíveis na literatura, para efeito de comparação dos resultados analíticos com os experimentais. Assim, foram empregadas a equação geral para perda de carga localizada, a tabela de coeficientes K (PORTO, 2006)

e a tabela de comprimento equivalente da NBR5626/1998, usada exclusivamente como referencial comparativo.

Fórmula Universal

A Fórmula Universal de perda de carga distribuída, formulação de Darcy-Weisbach, é descrita pela Equação 1 (AZEVEDO NETTO, 1998).

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

em que: hf é a perda de carga (m), f é o coeficiente de atrito (adimensional), L é o comprimento da tubulação (m), V é a velocidade do escoamento (m/s), D é o diâmetro da tubulação (m), e g é a aceleração gravitacional (m/s²), utilizada 9,81m/s².

O fator de atrito f pode ser calculado pela equação iterativa de Colebrook e White, 1939, Equação 2 (PORTO, 2006).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left(\frac{\varepsilon}{3,71 \cdot D} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) \quad (2)$$

onde: Re é o número de Reynolds do material (adimensional) e ε é a rugosidade absoluta da parede interna da tubulação. A rugosidade absoluta da tubulação de cobre adotada foi 0,010, extremo superior na faixa de rugosidade em que esse material se enquadra, entre 0,0015 a 0,010 (AZEVEDO NETTO, 1998).

Para a determinação do número de Reynolds, foi utilizada a Equação 3 (NETTO, 1998).

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (3)$$

onde: ν é a viscosidade cinemática. Para a água em temperatura ambiente de 20°C, a viscosidade cinemática adotada foi de $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (AZEVEDO NETTO, 1998).

Para o cálculo da velocidade média do escoamento foi aplicada a equação da continuidade, segundo a qual a vazão volumétrica é igual ao produto da velocidade média do fluido pela área da seção transversal da tubulação (MACINTYRE, 1990; AZEVEDO NETTO, 1998). Dessa forma, a velocidade pode ser obtida pela razão entre a vazão e a área, sendo esta determinada pela geometria da tubulação circular. Assim, a Equação 4 expressa a formulação utilizada:

$$V = \frac{Q}{\left(\frac{\pi \cdot D^2}{4}\right)} \quad (4)$$

em que: Q é a vazão do escoamento (m^3/s).

Fair-Whipple-Hsiao

A formulação empírica proposta por Fair-Whipple-Hsiao para tubos poliméricos, de cobre ou de liga de cobre é descrita segundo a Equação 5 (MACINTYRE, 1990).

$$hf = 0,000859 \cdot \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} \cdot L \quad (5)$$

em que: Q é a vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}$);

Flamant

A equação desenvolvida por Flamant (1892) é descrita pela Equação 6 (AZEVEDO NETTO, 1998).

$$hf = 4b \cdot V^{1,75} \cdot D^{-1,25} \cdot L \quad (6)$$

onde: b é o coeficiente de Flamant (adimensional). Para o coeficiente b foi adotado o valor de 0,000130 para tubo de cobre (AZEVEDO NETTO, 1998).

Hazen-Willians

A equação de perda de carga contínua de Hazen-Willians é descrita pela Equação 7 (PORTO, 2006).

$$hf = 10,65 \frac{L \cdot Q^{1,85}}{C^{1,85} \cdot D^{4,87}} \quad (7)$$

em que: C é o coeficiente de rugosidade interna do tubo (adimensional). Para o material cobre admitiu-se como coeficiente de rugosidade $C=130$ (PORTO, 2006).

Manning

A formulação de Manning (1889) é descrita pela Equação 8 (AZEVEDO NETTO, 1998).

$$hf = 6,36 \cdot \frac{n^2 \cdot V^2}{D^{1,33}} \cdot L \quad (8)$$

onde: n é o coeficiente de Manning (adimensional). O coeficiente n adotado para o tubo de cobre foi 0,011, obtido da documentação técnica do Bentley Systems (HAMMER Technical Documentation).

Erro Percentual

Como adotado por Sousa (2018), para apresentação e comparação dos resultados foi calculado o erro percentual dos valores de perda de carga empíricos em relação aos valores equacionados. A formulação do erro percentual é descrita pela Equação 9 (SOUSA, 2018).

$$E = \frac{|V_t - V_e|}{V_e} \quad (9)$$

em que: E é o erro percentual (%), V_t é o valor teórico (obtido por meio das equações empíricas), e V_e é o valor experimental (obtido através do ensaio).

Perda de carga localizada

A perda de carga localizada foi equacionada pela Expressão Geral das Perdas Localizadas, segundo Porto (2006, p. 70), expressa na Equação 10:

$$hf = K \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (10)$$

em que: K é o coeficiente de perda de carga localizada (adimensional).

Com os valores de perda de carga ensaiados para cada conexão hidráulica, foi estimado o coeficiente K através da Expressão Geral das Perdas Localizadas.

Os valores do coeficiente de perda de carga localizada K , analítico, para diferentes acessórios hidráulicos foram retirados da Tabela 1 (PORTO, 2006, p. 77).

Tabela 1 – Valores de coeficiente K para diferentes acessórios hidráulicos

Acessório	K	Acessório	K
Joelho 90° raio (r) curto	0,9	Válvula de gaveta aberta	0,2
Joelho 90° raio (r) longo	0,6	Válvula de ângulo aberta	5,0
Joelho 45°	0,4	Válvula de globo aberta	10,0
Curva 90°, r/D=1	0,4	Válvula pé de crivo	10,0
Tê de passagem direta	0,9	Curva retorno	2,2
Tê de saída lateral	2,0	Válvula de boia	6,0

Fonte - adaptado de Porto (2006)

O cálculo do comprimento equivalente é dado segundo a Equação 11 (PORTO, 2006).

$$Leq = \frac{K \cdot D}{f} \quad (11)$$

em que: Leq é o comprimento equivalente correspondente da conexão hidráulica (m).

Empregando os valores de perda de carga e coeficiente K ensaiados para cada conexão hidráulica, foram determinados os comprimentos equivalentes do sistema empregando a Equação 10. Analiticamente, foram adotados os comprimentos equivalentes de cada junção hidráulica especificado na Tabela A.3 da NBR 5626/1998, Tabela 2 deste documento, tomando como referência os valores para a tubulação de 15 mm, diâmetro mais próximo ao analisado neste trabalho.

Tabela 2 - Tabela de comprimento equivalente para tubo liso de cobre.

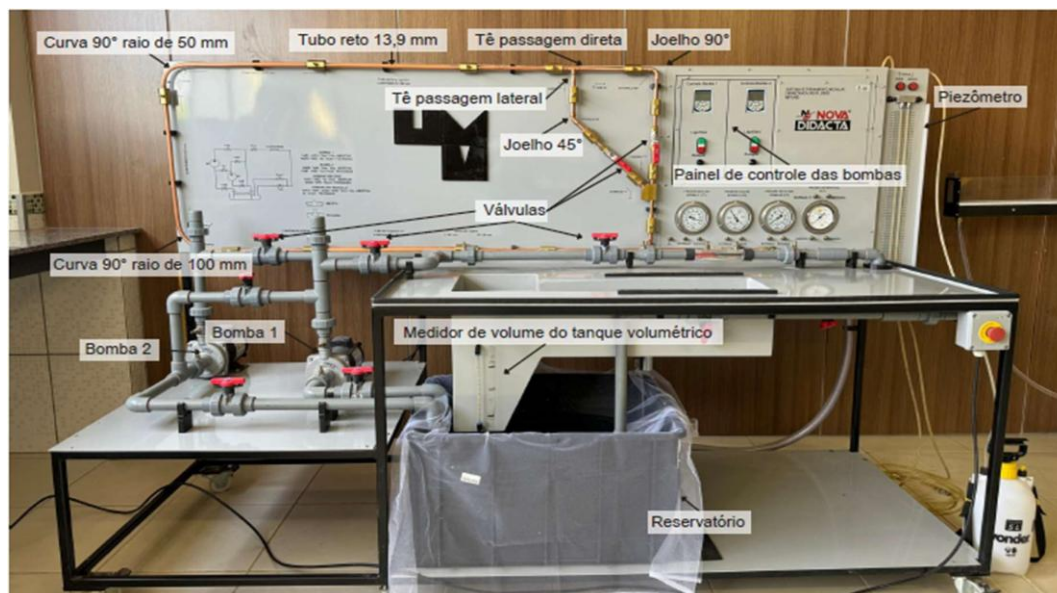
Diâmetro nominal	Tipo de conexão					
	Cotovelo 90°	Cotovelo 45°	Curva 90°	Curva 45°	Tê passagem direta	Tê saída lateral
15	1,1	0,4	0,4	0,2	0,7	2,3
20	1,2	0,5	0,5	0,3	0,8	2,4
25	1,5	0,7	0,6	0,4	0,9	3,1
32	2,0	1,0	0,7	0,5	1,5	4,6
40	3,2	1,0	1,2	0,6	2,2	7,3
50	3,4	1,3	1,3	0,7	2,3	7,6
65	3,7	1,7	1,4	0,8	2,4	7,8
80	3,9	1,8	1,5	0,9	2,5	8,0
100	4,3	1,9	1,6	1,0	2,6	8,3
125	4,9	2,4	1,9	1,1	3,3	10,0
150	5,4	2,6	2,1	1,2	3,8	11,1

Fonte – adaptado Tabela A.3 NBR5626, 1998.

Ensaio de perda de carga em laboratório

Foram realizadas medições de perda de carga através da bancada de mecânica dos fluidos do Laboratório de Hidráulica do Instituto Federal Goiano, localizado em Trindade, Goiás. O equipamento, modelo MF1000, dispõe de um sistema de com duas bombas centrífugas da marca Dancor, de ½ Cavalo Vapor (CV) de potência cada, tubulação de cobre de 13,9 mm e 26,6 mm e conexões e acessórios hidráulicos (Figura 1).

Figura 1- Bancada Hidráulica modelo M1000.



Fonte: Autores, 2024

A tubulação de cobre utilizada no ensaio possui diâmetro interno de 13,9 mm, sendo esta a tubulação conectada aos acessórios hidráulicos utilizados. As medições de perda de carga foram realizadas em um trecho retilíneo de comprimento de 500 mm, para aferição da perda de carga contínua, e, nas seguintes conexões para se obter a perda de carga localizada: curva longa raio de 100 mm, curva curta raio (r) de 50 mm, conexão tipo tê de saída lateral, conexão tipo tê de passagem direta, joelho 90° e joelho 45°.

A variação da vazão foi realizada com o acionamento isolado de uma única bomba do sistema da bancada, controlada por inversor de frequência com ajuste das Rotações Por Minuto (rpm), enquanto as medições foram efetuadas por meio do medidor de vazão do tanque volumétrico, adotando rotações de 700 rpm, 1.000 rpm, 1.500 rpm, 2.000 rpm e 2.300 rpm. Para cada valor de rotação, com variação de ± 10 rpm, devido à precisão do equipamento, foram realizadas três medições de vazão para determinação do seu valor médio correspondente, sendo essa a vazão considerada para os demais cálculos deste trabalho. Dado que o trecho de perda de carga do sistema da bancada possui três configurações distintas das válvulas de registro de esfera (Figura 2), as medições de vazão

foram repetidas para cada uma das configurações: Configuração 1 - válvulas Vp1 e Vp2 abertas; Configuração 2 - Vp1 fechada e Vp2 aberta; e Configuração 3 - Vp1 aberta e Vp2 fechada.

Figura 2 – Configurações 1, 2 e 3 de abertura das válvulas.



a) Configuração 1 - válvulas Vp1 e Vp2 abertas; b) Configuração 2 - Vp1 fechada e Vp2 aberta; c) Configuração 3 - Vp1 aberta e Vp2 fechada.

Fonte: Autores, 2024.

Para cada segmento de tubulação ensaiado, foi adotada uma configuração específica de válvulas para garantir a adequada análise de cada conexão. O Quadro 1 apresenta as conexões utilizadas nos ensaios e a configuração das válvulas adotadas para esta.

Quadro 1 - Configuração das válvulas nos segmentos de tubulação

Configuração 1 (Vp1 aberta e Vp2 aberta)	Configuração 2 (Vp1 fechada e Vp2 aberta)	Configuração 3 (Vp1 aberta e Vp2 fechada)
Curva Raio 100 mm	Tê de saída lateral	Tê de passagem direta
Curva Raio 50 mm	Joelho 45°	Joelho 90°
Tubo reto 13,9 mm	-	-

Fonte – Autores, 2024.

Com as vazões determinadas, foram realizadas medições de perda de carga em cada segmento, a montante a jusante do trecho, da tubulação por meio da utilização do piezômetro, ilustrado na Figura 1, que se encontra acoplado à bancada. Para cada vazão calculada foi realizada uma leitura piezométrica, sendo conferida em repetição dos parâmetros utilizados em uma segunda realização do ensaio.

Resultados e discussão

De acordo com as vazões aplicadas, os ensaios foram realizados com a variação do número de Reynolds descrita conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Valores de número de Reynolds para cada configuração de válvulas.

Número de Reynolds		
Configuração 1	Configuração 2	Configuração 3
4.472,80	-	-
14.213,79	17.738,41	13.589,83
24.981,81	31.011,24	23.785,20
36.386,55	44.901,94	33.891,99
40.565,70	48.998,71	38.662,32

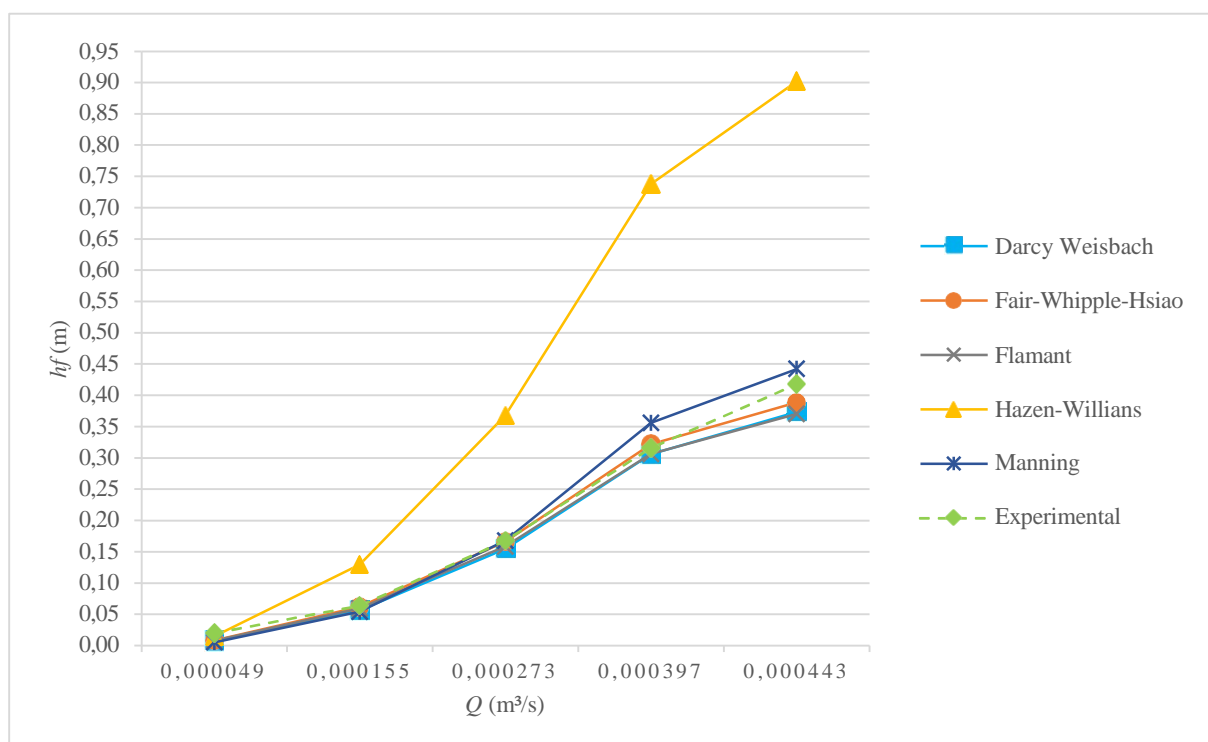
Fonte – Autores, 2024.

Assim, todos os cinco ensaios foram realizados no regime de escoamento turbulento. As situações usuais de dimensionamentos na engenharia ocorrem majoritariamente no escoamento turbulento (PORTO, 2006, p.3). A variação observada no número de Reynolds entre as diferentes configurações decorre de sua dependência direta da velocidade média do fluido, conforme a relação demonstrada na Equação 3 (AZEVEDO NETTO, 1998). Como a velocidade está associada à razão entre a vazão e a área da seção da tubulação, mudanças na vazão aplicada em cada configuração resultaram em diferentes valores de velocidade e, conseqüentemente, em diferentes números de Reynolds.

Perda de carga contínua

A Figura 3 apresenta o comparativo dos resultados da perda de carga contínua experimental e calculada pelas equações de Darcy-Weisbach (Fórmula Universal), Fair-Whipple-Hsiao, Flamant, Hazen-Willians e Manning.

Figura 3 – Comparativo de perda de carga contínua empregando diferentes formulações em comparação com o resultado experimental.



Fonte: Autores, 2024.

Para a tubulação de diâmetro de 13,9 mm, foi observado que a Fórmula Universal, de Fair Whipple Hsiao, de Flamant e Manning apresentaram resultados próximos aos obtidos experimentalmente, com erro percentual médio menor que 10%. Para uma vazão referência de 0,000273m³/s, por exemplo, a Fórmula Universal e as equações de Fair Whipple Hsiao, Flamant e Manning obtiveram como perda de carga hidráulica da tubulação (h_f), respectivamente, os valores de 0,155 m.c.a., 0,167 m.c.a., 0,159 m.c.a. e 0,168 m.c.a., em comparação ao obtido experimentalmente de 0,168 m.c.a. Por sua vez, os resultados de perda de carga obtidos pela equação de Hazen-Willians apresentaram

erro percentual médio de 118%, valores maiores do que os obtidos no ensaio realizado.

Todos os valores de perda de carga hidráulica calculado pelas cinco equações, para vazão inicial de 0,000049 m³/s, apresentaram erro percentual de 23% a 82%, com valores abaixo do obtido experimentalmente. Esse desvio no padrão dos resultados de perda de carga a baixa vazão pode ser objeto de análise para estudos vindouros.

Em análise geral das demais vazões, o erro percentual médio dos resultados obtidos pela equação de Fair Whipple Hsiao foi de 3,15%, sendo a formulação que apresentou os valores mais próximos ao empírico. Tal resultado teve amparo na literatura, uma vez que, a equação de Fair Whipple Hsiao é adequada para diâmetros pequenos e tubulações curtas (PORTO, 2006). Além disso, a equação de Fair Whipple Hsiao, juntamente com a fórmula universal eram as indicadas na NBR5626/1998 para o cálculo da perda de carga contínua. Um diferencial desta equação, que torna os cálculos mais simplificados e com menos erros, é sua dependência direta somente do diâmetro da tubulação, comprimento do tubo e vazão, não necessitando de coeficientes adicionais.

O resultado do ensaio com valores próximos aos da Fórmula Universal, era esperado, afinal, esta é composta pelas variáveis que mais influenciam na perda de carga, sendo também adequada para todas as faixas de escoamento (FURUSAWA, 2011). De forma geral, para as faixas de vazão, o erro percentual médio dos resultados obtidos pela Fórmula Universal foi de 8,47%. Essa variação de resultados pode ser explicada, uma vez que, o cálculo do fator de atrito da equação utiliza um parâmetro de difícil obtenção: a rugosidade absoluta. De acordo Porto (2006), a rugosidade absoluta depende do processo de fabricação do material, do acabamento da superfície, da idade da tubulação, entre outros fatores. E para o cálculo deste estudo, foi adotada rugosidade absoluta de 0,010m/m, indicada por Porto (2006) como um valor médio, podendo assim ter acarretado imprecisão ao resultado.

Tanto a Fórmula Universal quanto a equação de Fair Whipple Hsiao eram indicadas na NBR5626/1998 para o cálculo da perda de carga contínua, e, em sua atualização (NBR 5626/2020) é sugerido o uso da Fórmula Universal. Além disso, ainda segundo a NBR 5626/2020, pode-se utilizar fórmulas empíricas de perda de carga contínua adequadas a situação analisada, como foi o caso das equações de Fair Whipple Hsiao e Flamant para este estudo.

A formulação de Flamant, por sua vez, é indicada para tubulações de diâmetro de até 75 mm (SOUSA, 2018). Na análise, esta formulação apresentou erro percentual médio de 6,87% para o cálculo da perda de carga. Azevedo Netto (1998), também afirma a adequabilidade da formulação de Flamant para pequenos diâmetros, em concordância com os resultados obtidos neste estudo. Para a obtenção de uma melhor precisão de resultado com a equação de Flamant é necessário o aprimoramento de seu coeficiente b por meio de novos experimentos (SILVA, 2021).

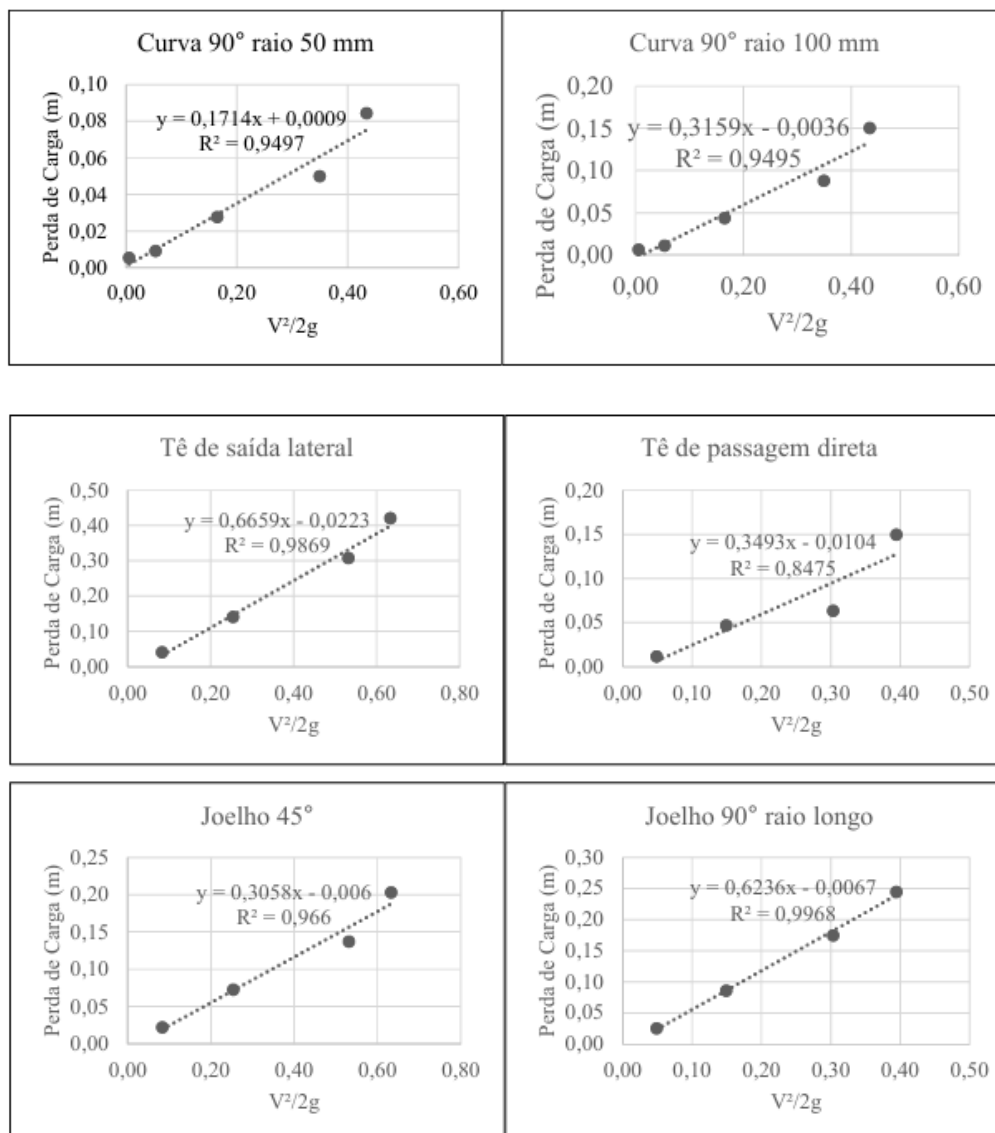
Os resultados obtidos a partir da equação de Manning apresentaram erro percentual médio de 8,44%. A partir da vazão de 0,000397 m³/s, os resultados calculados apresentaram valores maiores do que os obtidos experimentalmente. Portanto, em acordo com o exposto por Sampaio, Pessi e Suszek (2010), que demonstram que a equação de Manning pode resultar em valores superestimados de perda de carga para tubulações de diâmetro pequeno.

A equação de Hazen-Williams, apresentou valores de perda de carga maiores que as demais equações à medida que houve aumento da vazão hidráulica (com, por exemplo, $h_f=0,368$ m.c.a., para a vazão de 0,000273 m³/s). Com erro percentual médio de 117,76%, apresentou valores maiores do que os obtidos experimentalmente. Contudo, a formulação de Hazen-Williams é recomendada para tubulações de diâmetro maior ou igual a 4" (101,6 mm), o que justifica a divergência desta comparada ao resultado experimental de diâmetro consideravelmente inferior (PORTO, 2006). Além disso, o coeficiente C da equação de Hazen-Williams apresenta grande variabilidade e não possui uniformidade com a variação de velocidade para acessórios hidráulicos de diâmetros pequenos (SOUSA, 2018).

Perda de carga localizada

A perda de carga localizada obtida experimentalmente para os diferentes acessórios hidráulicos, juntamente com a equação da reta utilizada para a obtenção do coeficiente K experimental, é apresentada na Figura 4.

Figura 4 – Perda de carga localizada em diferentes acessórios hidráulicos.



Fonte: Compilação do autor, 2024

Para a curva de raio de 50 mm, o coeficiente de perda de carga localizada K médio obtido foi de 0,1714, enquanto para a curva de raio de 100 mm, $K=0,3424$. Na literatura, para curva de 90° diâmetro de 15 mm, K é igual a 0,4 (PORTO, 2006). A curva de raio de 50 mm apresentou o valor de K abaixo do referenciado na literatura, de 0,4 (PORTO, 2006). Porém, a curva de raio de 100 mm, apresenta um resultado mais próximo do teórico. Contudo, o valor tabelado pela literatura é aplicado para curvas de 90° com a relação de $r/D = 1$, o que não corresponde exatamente a situação analisada neste trabalho.

Outra fonte bibliográfica que relaciona o coeficiente K ao raio da curva apresenta valores aproximados de K igual a 0,12 para a curva de raio de 50 mm e K igual a 0,09 para a curva de raio de 100 mm, valores abaixo do ensaiado (MUNSON; YOUNG; OKIISHI, 2004, p. 437).

O valor de coeficiente K para a conexão tê de saída lateral apresentou resultado maior que a conexão tê com passagem direta, como esperado, devido o aumento de turbulência gerado pela curva que a água precisa realizar na primeira situação. Porém, em comparação aos valores tabelados (PORTO, 2006), os valores obtidos experimentalmente foram consideravelmente menores do que os de referência, de K igual a 2,0 para tê de saída lateral e de K igual a 0,9 para tê com passagem direta. Porém, os joelhos de 45° e 90°, apresentaram valores do coeficiente K mais compatíveis aos da literatura, com K igual a 0,31 para o joelho de 45° e K igual a 0,62 para o joelho de 90°, comparando com o valor tabelado de K igual a 0,4 e 0,60. Além disso, o joelho de 90° obteve uma perda de carga maior, e consequentemente um coeficiente K maior do que o joelho de 45°, como esperado. A perda de carga acentuada nas regiões de curva dos acessórios é comprovada por software de modelagem do escoamento, apresentando pontos de maior velocidade, consequentemente menor pressão, nestas regiões (BARROS et al, 2018).

Os valores médios de coeficiente K e comprimento equivalentes (*Leq*) para cada conexão ensaiada são informados na Tabela 4, além disso são apresentados os valores do *Leq* recomendados na NBR5626/1998.

Tabela 4 – Coeficientes K e comprimentos equivalentes para tubos e conexões de 0,0139 m de diâmetro.

Conexão	<i>f</i>	K	<i>Leq.</i> (m)	<i>Leq.</i> (m) NBR 5626/1998 D = 15mm
Curva 90° raio 50 mm	0,03	0,17	0,09	0,4
Curva 90° raio 100 mm	0,03	0,32	0,17	0,4
Tê saída lateral	0,03	0,67	0,37	2,3
Tê passagem direta	0,03	0,35	0,18	0,7
Joelho 45°	0,03	0,31	0,17	0,4
Joelho 90° raio longo	0,03	0,62	0,33	1,1

Fonte: Autores, 2024.

Para todos os acessórios hidráulicos ensaiados, o valor de comprimento equivalente obtido se mostrou menor do que os indicados pela NBR2656/1998, informados na tabela 4. Além disso, por meio da realização de ensaio com joelho de 90° de tubo de PVC rígido com diâmetro de 32 mm, Silva (2016) apresentou valores de comprimento equivalente menores do que os indicados pela tabela da norma, assim como os resultados obtidos neste estudo.

Assim, o uso dos valores teóricos sugeridos neste trabalho proporciona um dimensionamento a favor da segurança. Além disso, a escassez de dados na literatura de coeficientes K e comprimentos equivalentes específicos para a tubulação ensaiada não permite a validação quantitativa dos dados. Contudo, Porto (2006) enfatiza que a determinação destes coeficientes de perda de carga localizada e comprimentos equivalentes é um campo eminentemente experimental devido as diversas variáveis que influenciam na sua determinação.

Conclusões

Este trabalho aborda a realização de ensaios de perda de carga contínua e localizada em tubulação de cobre de 13,9 mm e a comparação com dados de formulações teóricas. Para a perda de carga contínua, as formulações de Fair-Whipple-Hsiao e Flamant apresentaram os resultados mais próximos dos dados experimentais, com erro percentual médio menor que 7%. Em relação a perda de carga localizada, a maior parte dos acessórios hidráulicos analisados obtiveram valores de coeficiente de perda de carga localizada K e comprimentos equivalentes menores do que os propostos na literatura. Demonstrando que, para a situação analisada, os valores da literatura utilizada sugerem um superdimensionamento (a favor da segurança e, entretanto, de maior custo) do projeto hidráulico quando empregados.

Além disso, foi observado que as formulações de perda de carga distribuída apresentaram distinções em seus resultados. A equação de Hazen-Williams obteve valores superestimados para a condição analisada, com erro percentual médio de 117,76%, portanto, não sendo adequada para diâmetros pequenos. Por sua vez, a formulação de Manning, apesar de superestimar os resultados com o aumento da vazão, apresentou

resultados condizentes aos experimentais. A equação de Fair Whipple Hsiao, por sua vez, apresentou os resultados mais satisfatórios dentre as formulações analisadas, seguida pela equação de Flamant. A Fórmula Universal apresentou resultados condizentes com o ensaio, porém, com um erro percentual de cerca de 10%. A variação dos resultados demonstra a dificuldade em obter valores precisos de rugosidade para a Fórmula Universal e de coeficientes para as demais formulações, além de evidenciar as diferentes aplicações de cada equação.

Em relação a perda de carga localizada, há escassos valores apresentados pela literatura para coeficiente K e comprimentos equivalentes aplicáveis a tubulação de cobre com diâmetro pequeno. A tabela de perda de carga da NBR 5626/1998 apresenta valores superdimensionados em comparação aos obtidos empiricamente. A maioria dos valores de coeficiente K obtidos na literatura também se apresentaram superdimensionados. Isso demonstra, que os valores apresentados não são aplicáveis a todos os casos, sendo necessário novos ensaios para aprimoramento destes. Assim, por meio do estudo foi possível demonstrar os valores de coeficientes K e comprimentos equivalentes adequados para a situação simulada.

Por fim, o presente estudo demonstrou a eficiência da Fórmula Universal no cálculo da perda de carga contínua, assim como a situação adequada de aplicação das demais formulações. Além disso, evidenciou a necessidade da realização de ensaios de perda de carga localizada para a determinação de coeficientes K e dos comprimentos equivalentes. Assim, com a nova atualização da NBR5626/2022, que exclui as tabelas de perda de carga e flexibiliza o cálculo desta grandeza, fica a cargo dos pesquisadores realizarem ensaios de perda de carga utilizando tubulações de diferentes materiais, diâmetros e acessórios, com o intuito de proporcionar aos projetistas valores e formulações mais assertivas para os futuros dimensionamentos hidráulicos.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5626: Instalação predial de água fria – Procedimento**. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5626: Instalação**

predial de

água fria – **Projeto, execução, operação e manutenção**. Rio de Janeiro, 2020.

AZEVEDO NETTO, J. M. de. **Manual de Hidráulica**. 8ª edição. São Paulo-SP: Ed. Edgard Blücher Ltda, 1998.

BARROS, Marcos Joselem da Silva; COUTINHO, Alcides Gabriel Prudêncio; ARAÚJO FILHO, Márcio Roberto de Andrade; COSTA JÚNIOR, Marcos Antônio. **Estudo da perda de carga em tubulação curva utilizando fluidodinâmica computacional**. III Congresso Nacional de Engenharia de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Salvador-Bahia, 2018.

BENTLEY SYSTEMS. *Typical Roughness Values for Pressure Pipes*. In: **Bentley HAMMER CONNECT Edition Help – Typical Roughness Values for Pressure Pipes**. [s.l.]: Bentley Systems, [s.d.]. Disponível em: *Bentley HAMMER CONNECT Edition Help (Typical Roughness Values for Pressure Pipes)*. Acesso em: 11 ago. 2025.

FURUSAWA, R. T. **Contribuição ao dimensionamento de rede de distribuição de água por critério de custo global**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

MACINTYRE, A. J. **Manual de Instalações Hidráulicas e Sanitárias**. Rio de Janeiro-RJ: Editora Guanabara, 1990.

MUNSON, B. R; YOUNG, D. F; OKIISHI, H. T. **Fundamentos da Mecânica dos Fluidos**.

4ªed. São Paulo-SP: Ed. Edgard Blücher Ltda, 2004.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 4ªed. São Carlos-SP:EESC/UPS, 2006.

SAMPAIO, S. C., PESSI, E., SUSZEK, M. **Análise comparativa de perda de carga contínua observada em laboratório e estimada por meio de equações**. Revista Varia Scientia Agrárias. v.01, n. 01, p.75-79. 2010.

SANTOS, J. C. **Uma revisão sobre a avaliação da perda de carga em condutos forçados**. 2022. f.43. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2022.

SILVA, A. F. **Quantificação da perda de carga em conexões de PVC soldável: determinação dos coeficientes K e comprimentos equivalentes**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2016.

SILVA, J. **Análise de coeficientes em fórmulas empíricas de perda de carga contínua**

em tubos de PVC. 2021.66 f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2021.

SOUSA, J. S. C. de. **Equações de perda de carga para dimensionamentos hidráulicos em projetos de irrigação pressurizada.** Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, Fortaleza, v. 12, n. 7, p. 3159-3168, 2018. Disponível em: <http://www.inovagri.org.br>. DOI: 10.7127/rbai.v12n7001041. Acesso em: [02/07].