

Análise comparativa da perda de carga em cavalete simples e duplo com eliminador de ar em ligações prediais de água

Eduardo Fidelis de Araujo¹; Dieimys Santos Ribeiro², Walker Matheus Ferreira da Silva³, Marcia Viana Lisboa Martins⁴ e Carlos Barreira Martinez⁵

Resumo: Este artigo apresenta um estudo comparativo do desempenho hidráulico de cavaletes simples e duplos equipados com eliminadores de ar, ambos aplicados a ligações prediais de água com diâmetro nominal de ½". Os ensaios foram realizados em bancada hidráulica sob regime permanente, com medição de vazão por medidor eletromagnético e de perda de carga por manômetros diferenciais do tipo "U" invertido e Bourdon. Foram avaliados três cenários: cavalete simples com hidrômetro, cavalete simples com eliminador de ar e hidrômetro, e cavalete duplo com eliminador de ar e hidrômetro. Os resultados mostraram uma relação aproximadamente quadrática entre a perda de carga e a vazão, com desempenho consistentemente superior do cavalete simples. Para vazões próximas de 1,0 m³/h, observaram-se perdas de carga de cerca de 2.300 mmH₂O no arranjo simples e de 6.100 mmH₂O no arranjo duplo. De modo geral, o cavalete simples apresentou menor resistência hidráulica, reforçando sua adequação para sistemas residenciais, especialmente onde a pressão disponível é limitada.

Abstract: This article presents a comparative study of the hydraulic performance of single and double service connection assemblies equipped with air eliminators, both applied to residential water connections with nominal diameter of ½". Tests were carried out on a hydraulic bench under steady-flow conditions, with flow rate measured by an electromagnetic flowmeter and head loss by inverted U-tube and Bourdon differential manometers. Three scenarios were evaluated: single assembly with water meter, single assembly with air eliminator and water meter, and double assembly with air eliminator and water meter. The results showed an approximately quadratic relationship between head loss and flow rate, with consistently better performance for the single assembly. At flow rates near 1.0 m³/h, head losses were about 2,300 mmH₂O for the single arrangement and 6,100 mmH₂O for the double one. Overall, the single assembly showed lower hydraulic resistance, reinforcing its suitability for residential systems, especially where available pressure is limited.

Palavras-Chave: perda de carga; eliminador de ar; cavalete simples; cavalete duplo; ligação predial.

Keywords: head loss; air eliminator; single service assembly; double service assembly; water service connection.

1 MPEH / UNIFEI, Av. BPS, 1303. Itajubá / MG. e-mail: eduardo.fidelis@unifei.edu.br.

2 PPG-EEL / UNIFEI & MPEH / UNIFEI, Av. BPS, 1303. Itajubá / MG. e-mail: dieimys@unifei.edu.br.

3 PPG-EME / UNIFEI, Av. BPS, 1303. Itajubá / MG. e-mail: d2026101217@unifei.edu.br.

4 MPEH / UNIFEI, Av. BPS, 1303. Itajubá / MG. e-mail: marciaviana@unifei.edu.br.

5 PPG-EME / MPEH / UNIFEI & PPGMEC / UFMG. Av. BPS, 1303. Itajubá / MG. e-mail: cmartinez@unifei.edu.br; martinez@cce.ufmg.br.

INTRODUÇÃO

A instalação de eliminadores de ar em ligações prediais de água tem sido objeto de interesse técnico e regulatório, não apenas pelos aspectos associados à medição do consumo, mas também pelos efeitos hidráulicos que esses dispositivos e seus arranjos construtivos podem produzir no escoamento. No plano regulatório, a discussão se relaciona com as exigências de desempenho e conformidade aplicáveis aos hidrômetros de água fria, inserindo o tema em um contexto que envolve simultaneamente questões metrológicas e operacionais (INMETRO, 2000).

Do ponto de vista da mecânica dos fluidos aplicada às instalações hidráulicas, a configuração do arranjo exerce papel decisivo na dissipação de energia. Em escoamentos sob pressão, perdas localizadas associadas a singularidades, mudanças de direção, acessórios e descontinuidades geométricas podem assumir papel relevante no balanço energético do sistema, (PORTO, 2006; FOX; McDONALD; PRITCHARD, 2018; WHITE, 2018) sobretudo em instalações de pequeno diâmetro e baixa margem de pressão disponível (QUINTELA, 1985; LENCASTRE; HOLMES, 1987). Assim, a comparação entre diferentes configurações de cavalete constitui tema de interesse prático, especialmente quando se pretende avaliar a adequação hidráulica de soluções aplicadas a ligações prediais de pequeno diâmetro e sua compatibilidade com condições usuais de operação de sistemas de distribuição de água (ABNT, 2017).

Neste trabalho, apresenta-se um estudo experimental comparativo entre duas configurações usuais de instalação em ligações prediais de água com diâmetro nominal de ½”: o cavalete simples e o cavalete duplo, ambos associados ao uso de eliminador de ar e hidrômetro. O objetivo é quantificar e comparar as perdas de carga desses arranjos em diferentes condições de vazão, buscando identificar a influência da geometria do conjunto sobre o desempenho hidráulico da instalação. Para isso, foram realizados ensaios em bancada hidráulica sob regime permanente, com instrumentação adequada para medição de vazão e pressão diferencial, em continuidade a procedimentos experimentais já sistematizados para esse tipo de avaliação (UNIFEI, 2025).

O foco da análise é estritamente hidráulico. Desse modo, o estudo concentra-se na avaliação da resistência ao escoamento imposta por cada arranjo e em suas implicações operacionais para ligações prediais de água, sem substituir os procedimentos específicos exigidos para a verificação formal do desempenho metrológico dos hidrômetros (INMETRO, 2000).

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Aplicando a equação (1) de Bernoulli entre duas seções do sistema:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + \Delta H \quad (1)$$

Onde: (P) pressão estática do fluido (Pa); (γ) peso específico da água (N/m³); (V) velocidade média do escoamento (m/s); (g) aceleração da gravidade (m/s²); (z) cota geométrica em relação a um plano de referência (m); (ΔH) perda de carga total entre as seções analisadas (m).

Como os diâmetros são constantes e as diferenças de nível são desprezíveis, vide equação 2:

$$\Delta H = h_f + \sum h_L \quad (2)$$

onde: (ΔH) perda de carga total (m); (h_f) perda de carga distribuída ao longo da tubulação (m); ($\sum h_L$) somatório das perdas de carga localizadas (m).

Aplicando a equação de perdas distribuídas (Darcy-Weisbach), vide equação 3:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (3)$$

onde: (f) fator de atrito de Darcy-Weisbach; (L) comprimento da tubulação (m); (D) diâmetro interno da tubulação (m); (V) velocidade média do escoamento (m/s); (g) aceleração da gravidade (m/s²).

E aplicando a equação de perdas localizadas, vide equação 4:

$$h_L = K \frac{V^2}{2g} \quad (4)$$

onde: (K) coeficiente de perda localizada (adimensional); (V) velocidade média do escoamento (m/s); (g) aceleração da gravidade (m/s²).

Seguindo essa premissa a aplicação no estudo utiliza a equação 5:

$$\Delta H = \left(f \frac{L}{D} + \sum K \right) \frac{V^2}{2g} \quad (5)$$

Onde: (ΔH) perda de carga total (m); ($f * L/D$) contribuição das perdas distribuídas; ($\sum K$) contribuição total das perdas localizadas; (V) velocidade média do escoamento (m/s); (g) aceleração da gravidade (m/s²).

Como a vazão volumétrica é dividida pela área da seção, utilizamos a equação 6, para obtermos enfim:

$$V = \frac{Q}{A} \quad (6)$$

onde: (Q) vazão volumétrica (m³/s); (A) área da seção transversal da tubulação (m²);

Obtém-se, então:

$\Delta H \propto Q^2$, o que justifica o comportamento aproximadamente quadrático observado experimentalmente. O cavalete duplo apresenta maiores valores de $\sum K$ e comprimento equivalente superior ao do cavalete simples, resultando em maiores perdas de carga para a mesma vazão.

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Os ensaios foram realizados em bancada hidráulica instalada no Laboratório Thermo-Hydroelectro (LTHE/UNIFEI), utilizando cavaletes com diâmetro nominal de $\frac{1}{2}$ ", conforme arranjo experimental descrito por UNIFEI (2025). O sistema de ensaio era composto por bomba centrífuga multiestágio com controle de velocidade, trecho principal de recalque, derivação em $\frac{1}{2}$ ", ramal predial e conjunto instrumental para medição de vazão e pressão diferencial. A vazão foi monitorada por medidor eletromagnético KROHNE® IFC 010 D (KROHNE, 2006), enquanto as perdas de carga foram obtidas com manômetro diferencial do tipo "U" invertido e, nas faixas de maior perda, com manômetro diferencial tipo Bourdon, em conformidade com as especificações de exatidão apresentadas pelo fabricante (FAMABRAS, 2013). Os hidrômetros empregados nos ensaios atendiam aos requisitos metrológicos estabelecidos pela Portaria Inmetro nº 246/2000 (INMETRO, 2000). As temperaturas de ensaio variaram entre 20 e 22 °C (Figura 1).



A)



B)

Figura 1 – A) Medidor de vazão eletromagnético; B) Manômetro diferencial tipo Bourdon.

Os arranjos hidráulicos adotados nos ensaios comparativos de perda de carga em ligações prediais de água com diâmetro nominal de $\frac{1}{2}$ ". Foram avaliados três cenários experimentais. No arranjo A, correspondente à condição de referência, foi ensaiado o cavalete simples contendo apenas o hidrômetro, com tomadas de pressão em P1 e P2, de modo que a perda de carga medida representasse a contribuição do hidrômetro e dos cotovelos de entrada e saída. No arranjo B, manteve-se o cavalete simples, porém com a inclusão do eliminador de ar a montante do hidrômetro, permanecendo a medição diferencial entre P1 e P2. Já no arranjo C, foi montado o cavalete duplo com eliminador de ar e hidrômetro em ramos interligados, com tomadas em P1, P3, P4 e P2, permitindo medir tanto a perda de carga total do conjunto quanto as perdas parciais associadas ao trecho do eliminador e ao trecho do hidrômetro. Esse procedimento possibilitou comparar diretamente os dois tipos de instalação e isolar, por diferença, a contribuição hidráulica dos componentes e das interligações do arranjo duplo (UNIFEI, 2025). A bancada foi instrumentada com hidrômetro, eliminador de ar, válvulas gaveta, válvulas de retenção, medidor eletromagnético de vazão e dispositivos de medição de pressão diferencial, permitindo a determinação da perda de carga em regime permanente sob condições controladas de ensaio, conforme a (Figura 2) apresenta.

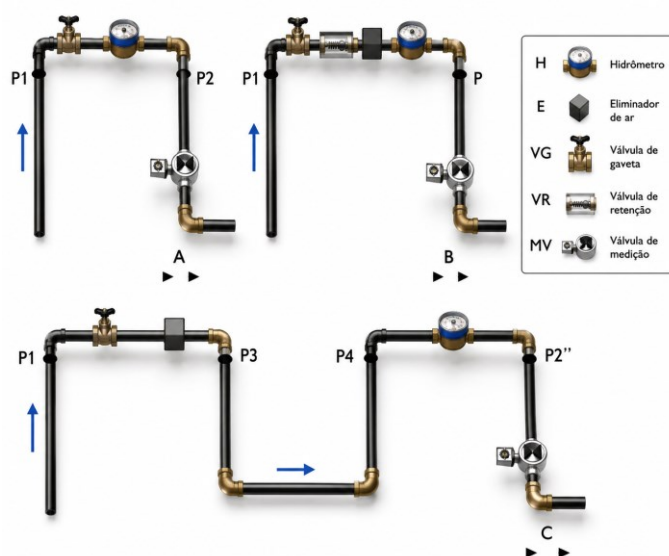


Figura 2 – Arranjos hidráulicos utilizados nos ensaios de perda de carga: A) cavalete simples com hidrômetro; B) cavalete simples com eliminador de ar e hidrômetro; C) cavalete duplo com eliminador de ar e hidrômetro, com tomadas de pressão em P1, P2, P3 e P4 para avaliação das perdas totais e parciais do sistema.

Os ensaios foram executados em regime permanente, com matriz de pontos representativos de operação, incluindo vazões típicas da faixa de consumo residencial e condições compatíveis com parâmetros usuais de redes de distribuição de água (ABNT, 2017). Para cada ponto, após a estabilização do escoamento, registraram-se três leituras independentes de pressão diferencial, com intervalo mínimo entre medições, permitindo o cálculo da média e do desvio-padrão. O procedimento adotado preservou a mesma configuração geral de entrada e saída entre os arranjos, de modo que a comparação se concentrasse no efeito hidráulico da geometria de cada cavalete (UNIFEI, 2025).

O tratamento dos dados foi realizado por meio da conversão das leituras de desnível em perda de carga expressa em milímetros de coluna d'água. Em seguida, ajustaram-se curvas de ΔH em função da vazão Q para cada arranjo. No caso do cavalete duplo, a perda do ramo do eliminador foi obtida a partir de leituras parciais entre pontos intermediários, o que permitiu avaliar a contribuição relativa desse ramo para a perda total do sistema. A Tabela 1 apresenta a síntese dos cenários analisados (UNIFEI, 2025).

Tabela 1 – Síntese dos cenários experimentais avaliados

Cenário	Trecho monitorado	Objetivo
Cavalete simples com hidrômetro	P1–P2	Estabelecer a linha de base hidráulica do sistema.
Cavalete simples com eliminador e hidrômetro	P1–P2	Quantificar a perda de carga do arranjo compacto com eliminador.
Cavalete duplo com eliminador e hidrômetro	P1–P2 e P1–P3	Comparar a perda total do arranjo duplo e isolar a participação do ramo do eliminador.

Fonte: Próprio autor, 2026.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta os resultados da campanha experimental em bancada, evidenciando a execução experimental do estudo e as condições sob as quais foram obtidas as medições de vazão e perda de carga. Essa documentação visual complementa a descrição metodológica e reforça que os resultados discutidos a seguir foram produzidos em campanha experimental controlada, com instrumentação apropriada e repetição das leituras para verificação da consistência dos dados.

As medições apresentaram boa repetibilidade, com desvios geralmente inferiores a 2% na faixa principal de vazões analisadas, o que indica consistência experimental e estabilidade do escoamento. Em ambos os arranjos, a perda de carga cresceu de forma aproximadamente quadrática com a vazão, em consonância com o comportamento esperado para perdas localizadas em regime turbulento plenamente desenvolvido.

Para o cavalete simples com eliminador de ar, o ajuste experimental obtido foi $\Delta H = 2779,2Q^2 - 519,76Q + 43,447$, com $R^2 = 0,9936$. Para o cavalete duplo, o ajuste correspondente foi $\Delta H = 6325,0Q^2 - 225,35Q + 3,5723$, com $R^2 = 0,9879$. As curvas ajustadas mostram que a superioridade hidráulica do cavalete simples se mantém ao longo de toda a faixa comparativa considerada, com afastamento crescente entre os arranjos à medida que a vazão aumenta (Figura 4).

Na faixa operacional típica de comparação, o cavalete duplo apresentou perdas de carga sistematicamente superiores às do simples. Para vazões próximas de $0,1 \text{ m}^3/\text{h}$, a perda no duplo foi cerca de 1,3 vez maior; para vazões próximas de $1,0 \text{ m}^3/\text{h}$, a diferença chegou a aproximadamente 2,6 vezes, com ΔH da ordem de $6.100 \text{ mmH}_2\text{O}$ no arranjo duplo e $2.300 \text{ mmH}_2\text{O}$ no arranjo simples. Considerando-se toda a matriz de ensaio, a média global ponderada foi de $552 \text{ mmH}_2\text{O}$ para o cavalete duplo e de $147 \text{ mmH}_2\text{O}$ para o simples, o que corresponde a redução aproximada de 73% quando se adota a configuração mais compacta.

A análise parcial do ramo do eliminador no cavalete duplo indicou participação limitada, entre 10% e 15% da perda total medida entre P1 e P2. Esse resultado é importante porque sugere que a principal responsável pela dissipação adicional de energia não é o eliminador isoladamente, mas o conjunto geométrico do cavalete duplo, com suas interligações e acessórios. Em termos práticos, isso significa que simplificar o percurso hidráulico tende a produzir ganho mais relevante do que apenas alterar o dispositivo instalado.

Sob o ponto de vista operacional, a diferença entre os arranjos pode ser particularmente relevante em redes residenciais de baixa pressão. Embora as perdas observadas permaneçam em faixa compatível com condições usuais de operação de sistemas de distribuição de água e não indiquem, por si, incompatibilidade com os critérios gerais de projeto associados à ABNT NBR 12218:2017, a comparação aqui apresentada tem natureza estritamente hidráulica. Assim, eventuais conclusões sobre a exatidão do hidrômetro dependem de ensaios específicos de conformidade, conduzidos segundo os procedimentos próprios da regulamentação metrológica aplicável.

Tabela 2 – Indicadores comparativos dos arranjos estudados

Indicador	Cavalete simples	Cavalete duplo
Equação ajustada	$\Delta H = 2779,2Q^2 - 519,76Q + 43,447$	$\Delta H = 6325,0Q^2 - 225,35Q + 3,5723$
Coefficiente de ajuste	$R^2 = 0,9936$	$R^2 = 0,9879$
ΔH para $Q \approx 1,0 \text{ m}^3/\text{h}$	$\approx 2\,300 \text{ mmH}_2\text{O}$	$\approx 6\,100 \text{ mmH}_2\text{O}$
Média global ponderada	147 mmH ₂ O	552 mmH ₂ O
Interpretação	Menor perda de carga e menor complexidade construtiva	Maior dissipação associada à geometria e às interligações

Fonte: Próprio autor, 2026.

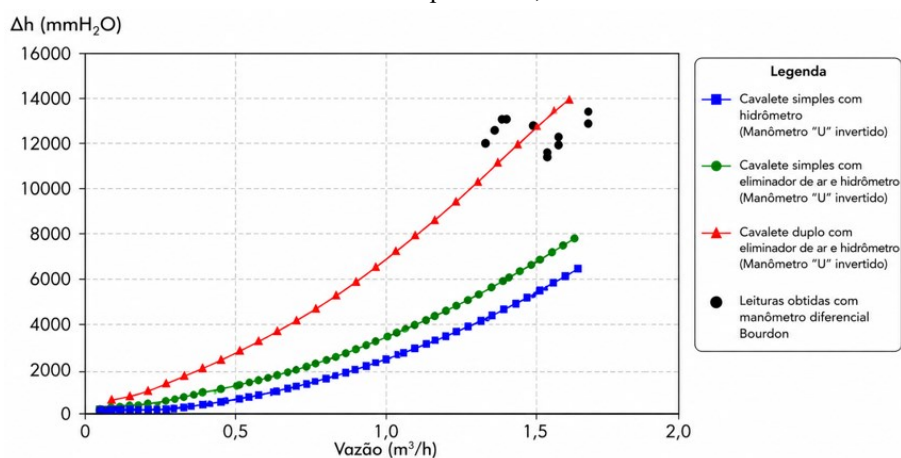


Figura 3 – Gráfico da campanha experimental em bancada hidráulica.

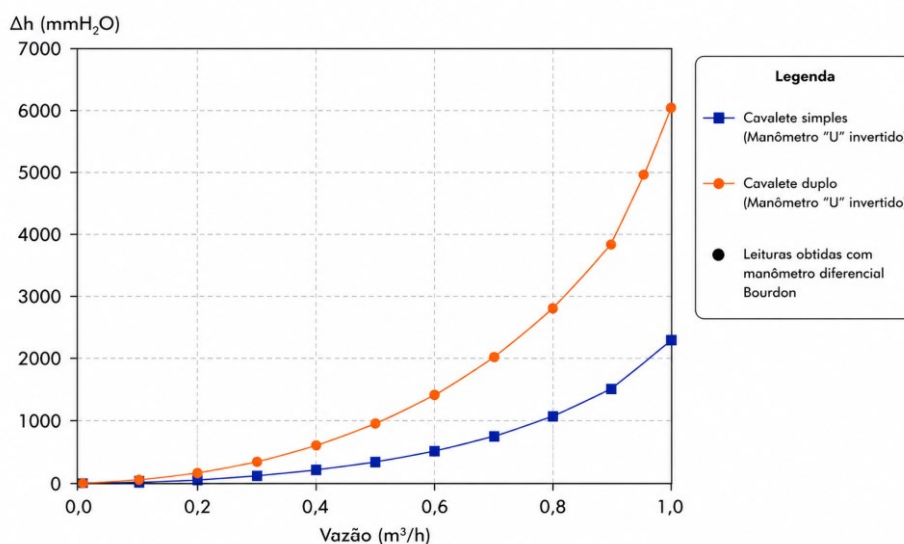


Figura 4 – Curvas ajustadas de perda de carga para os arranjos estudados

CONCLUSÃO

Os resultados experimentais permitem concluir que o cavalete simples com eliminador de ar apresenta desempenho hidráulico claramente mais favorável do que o cavalete duplo nas condições ensaiadas. A diferença não se restringe a um ponto isolado de operação, mas se mantém ao longo

de toda a faixa de vazões comparada, com crescimento da vantagem relativa do arranjo simples à medida que a vazão aumenta.

A redução média aproximada de 73% na perda de carga, associada ao menor número de conexões e à maior linearidade geométrica do cavalete simples, indica que o desenho do arranjo tem papel decisivo no comportamento hidráulico da ligação predial. Os dados também mostram que, no cavalete duplo, o ramo do eliminador contribui com parcela relativamente pequena da perda total, reforçando que a penalização hidráulica decorre principalmente do próprio layout do conjunto.

Do ponto de vista aplicado, os resultados recomendam a preferência pelo cavalete simples quando o critério dominante for a eficiência hidráulica do sistema, especialmente em contextos de baixa pressão disponível. Como desdobramento, trabalhos futuros podem ampliar a investigação para outras bitolas, outros tipos de hidrômetro e ensaios específicos de natureza metrológica, permitindo integrar a análise hidráulica com a avaliação normativa de desempenho e com os critérios gerais de projeto adotados em sistemas de distribuição de água, conforme a ABNT NBR 12218:2017.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 12218:2017 – *Projeto de redes de distribuição de água para abastecimento público*. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

FAMABRAS – Indústria de Aparelhos de Medição Ltda. *Catálogo de pressão: classes de exatidão dos manômetros (CP6)*. Edição 03, Revisão 00. São Paulo: Famabras, 2013.

FOX, R. W.; McDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

INMETRO. Portaria nº 246, de 17 de outubro de 2000. *Regulamento de avaliação da conformidade para hidrômetros de água fria*. Brasília: Diário Oficial da União, 18 out. 2000.

KROHNE Messtechnik GmbH & Co. KG. IFC 010 – *Electromagnetic Flow Converter: Technical Datasheet*. Duisburg: KROHNE Messtechnik GmbH & Co. KG, 2006.

LENCASTRE, A.; HOLMES, P. *Handbook of Hydraulic Engineering*. Chichester: Ellis Horwood, 1987.

PORTO, R. M. *Hidráulica Básica*. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006.
QUINTELA, A. C. *Hidráulica*. Lisboa: Fundação. Calouste Gulbenkian, 1985.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ. *Laudo ensaio comparativo – cavalete simples e duplo: ensaio de perda de carga em eliminador de ar instalado em cavalete simples e duplo*. Itajubá: UNIFEI, 2025.

WHITE, F. M. *Mecânica dos Fluidos*. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2018.