



SHEILLA MAIDA SÉRGIO NHAMÚSSUA

**COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE REGISTROS DE
GAVETA, ESFERA E PRESSÃO**

**LAVRAS- MG
2022**

SHEILLA MAIDA SÉRGIO NHAMÚSSUA

**COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE REGISTROS DE GAVETA, ESFERA E
PRESSÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Michael Silveira Thebaldi
Orientador

**LAVRAS- MG
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Nhamússua, Sheilla Maida Sérgio.

Comportamento hidráulico de registros de gaveta, esfera e
pressão / Sheilla Maida Sérgio Nhamússua. - 2022.

82 p. : il.

Orientador(a): Michael Silveira Thebaldi.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2022.

Bibliografia.

1. Acessórios de tubulações. 2. Dimensionamento hidráulico. 3.
Número de Reynolds. I. Thebaldi, Michael Silveira. II. Título.

SHEILLA MAIDA SÉRGIO NHAMÚSSUA

COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE REGISTROS DE GAVETA, ESFERA E PRESSÃO

HYDRAULIC BEHAVIOR OF GATE, BALL AND PRESSURE VALVES

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 18 de fevereiro de 2022.

Dr. Michael Silveira Thebaldi UFLA

Dr. Fábio Ponciano de Deus UFLA

Dr. Lessandro Coll Faria UFPel

Dr. Victor Buono da Silva Baptista UFLA



Prof. Dr. Michael Silveira Thebaldi
Orientador

**LAVRAS- MG
2022**

*Ao meu pai, Sérgio, e à minha mãe, Georgina,
que me deram educação, apoio, carinho e ensinamentos que me ajudaram a enfrentar todas
as dificuldades ao longo desta formação.*

Dedico

AGRADECIMENTO

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus, pelo dom da vida, pela oportunidade ímpar de chegar a este patamar, e pelo privilégio de conhecer pessoas tão especiais, que de algum modo contribuíram para realização do trabalho.

Aos meus pais, Sérgio e Georgina, por me apoiarem sempre, tanto financeiramente quanto emocionalmente, e mesmo com todas as dificuldades que apareceram possibilitaram com que eu alcançasse meu sonho.

Aos meus irmãos, Isabel, Rosa, Samuel e Estefânia, que sempre me deram aquela palavra de conforto nas horas de desespero.

Ao meu namorado Marcial Macome, que me apoiou e incentivou com palavras e emocionalmente para a realização desta formação e trabalho.

À Nasma Cossa e Fidel Tambo, que sempre me apoiaram e incentivaram com as suas palavras para que eu tivesse mais confiança em mim no desempenho do meu trabalho.

Ao meu orientador, Michael Thebaldi, pela confiança, disponibilidade, dedicação e apoio em todos os momentos, dando o seu suporte e compreensão durante a elaboração do meu trabalho. Foram preciosas as suas orientações, crítica e sugestões, o meu sincero agradecimento!

Agradeço especialmente à UFLA, primeiro por me aceitar na instituição para o acréscimo do meu desenvolvimento profissional, e por tudo que me proporcionou na realização desta formação.

Agradeço ainda a todos os docentes do curso da Pós-graduação em Recursos Hídricos e as secretárias do Departamento.

Aos técnicos do Laboratório de Hidráulica, Elvis e Jean, por toda a ajuda e suporte em relação aos ensaios e ideias para solucionar os meus problemas, que não foram poucos.

A todos que de alguma forma direta ou indiretamente, contribuíram na realização deste trabalho.

Muito obrigada!

RESUMO

Os registros são acessórios que estabelecem, controlam e interrompem o fluxo em uma tubulação; por isso devem ser escolhidos criteriosamente, tanto devido às suas características físicas, como também de operação e hidráulicas, incluindo sua localização. O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento hidráulico de registros de gaveta, esfera e pressão. Foram feitas avaliações das vazões nos registros ensaiados com quatro aberturas de 25%, 50%, 75% e 100% em cinco repetições. Para a estimativa da perda de carga contínua utilizou-se um manômetro diferencial de mercúrio "U", sem a presença de registro. O cálculo da perda de carga localizada (hf_L) foi realizado por meio da medição dos valores da perda de carga total (hf_T) no trecho onde estava localizado o registro, a partir da subtração da perda de carga contínua (hf_C) e outras perdas acidentais, nos demais acessórios utilizados. Foram estimados valores médios do coeficiente "K" de perda de carga localizada para a utilização do Método Direto bem como Comprimento Equivalente (Leq) nas situações de avaliação. Além disso, foram ajustados modelos matemáticos para a determinação dos coeficientes de perda de carga (K e Leq), utilizando o número de Reynolds (Re) e velocidade média de escoamento na seção da tubulação como variáveis independentes. Na estimativa dos coeficientes (hf_L , K e Leq) dos registros ensaiados foram obtidos maiores valores destes nas aberturas 25% devido a menor área de seção e à menor velocidade de escoamento. Já nas aberturas 100% e 75% obtiveram-se os menos valores. Ao analisar-se os modelos para estimativa das variáveis relativas à perda de carga localizada, a variável independente velocidade de escoamento, em geral, levou a uma melhor estimativa em comparação ao número de Reynolds.

Palavras-chaves: Acessórios das Tubulações. Conduitos Forçados. Dimensionamento Hidráulico. Instalações Hidráulicas. Número de Reynolds. Velocidade Média de Escoamento.

ABSTRACT

Valves are accessories that establish, control and block the flow at a pipeline; therefore, they must be chosen carefully, not only due to their physical characteristics, but also because of their operational and hydraulic behavior. Thus, the objective of this work was to evaluate the hydraulic behavior of gate, ball and pressure valves. Flowrate evaluations were carried out with four openings (25%, 50%, 75% and 100%) of the tested valves, with five replications. To estimate the major head losses, a differential "U" tube mercury manometer was used, without the presence of a valve. The calculation of the minor head loss (hf_L) was performed by measuring the values of the total head loss (hf_T) in the section where the valve was located, from the subtraction of the major head loss (hf_C) and other accidental losses, by the presence of other accessories. Average values of the coefficient "K" of minor head loss were estimated, as well as the Equivalent Length (Leq). In addition, mathematical models were fitted to determine the head loss coefficients (K and Leq), using the Reynolds number (Re) and average flow velocity in the pipe section as independent variables. For the estimative of the tested valves coefficients, higher values were obtained in the 25% openings due to the smaller section area and the lower flow velocity. For 100% and 75% openings, the lowest values were obtained. When analyzing the models for estimating the variables related to the minor head loss, the independent variable flow velocity, in general, led to a better estimate compared to the Reynolds number.

Keywords: Pipeline Accessories. Pressurized Pipes. Hydraulic Design. Water Supply Systems. Reynolds number. Average Flow Velocity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Representação gráfica dos regimes de escoamento em relação à trajetória.....	16
Figura 2 –	Escoamento permanente em reservatório a nível constante.	18
Figura 3 –	Escoamento não-permanente (esvaziamento de um reservatório).....	18
Figura 4 –	Tipos de corrente de fluxo em escoamento variados	19
Figura 5 –	Vazões em massa em um tubo de corrente em regime permanente.	19
Figura 6 –	Diagrama energético.	21
Figura 7 –	Detalhes do módulo experimental construído para avaliação da perda de carga localizada em registros.....	33
Figura 8 –	Detalhes das singularidades utilizadas nos trechos da tubulação no módulo experimental: ligação entre luva, registro e adaptador (A); adaptador, união, bucha de redução e adaptador (B); união e adaptador (C); adaptador, registro e adaptador (D); e adaptador e registro (E).	34
Figura 9 –	Registros estudados com aberturas relativas ao passo de seu volante ou alavanca, a depender do tipo de registro.	37
Figura 10 –	Temperatura (a.), massa específica (b.) e viscosidade cinemática (c.) da água nos ensaios realizados.	39
Figura 11 –	Velocidade de escoamento (a.) e número de Reynolds (b.) nos registros ensaios realizados.	41
Figura 12 –	Perda de carga localizada nos registros avaliados para as aberturas relativas ao passo de seu volante ou alavanca, de 100% (a.), 75% (b.), 50% (c.), 25% (d.).	47
Figura 13 –	Coefficiente de perda de carga localizada nos registros avaliados para as aberturas relativas ao passo de seu volante ou alavanca, de 100% (a.); 75% (b.); 50% (c.) e 25% (d.).....	51
Figura 14 –	Comprimento equivalente nos registros avaliados para as aberturas relativas ao passo de seu volante ou alavanca, de 100% (a.); 75% (b.); 50% (c.); 25% (d.).....	53
Figura 15 –	Dendrograma para análise de Agrupamentos Hierárquicos para os registros estudados e as porcentagens de abertura avaliadas.....	59
Figura 16 –	Distância Euclidiana em cada um dos passos do processo de almagamação da análise de grupamento hierárquico das combinações entre registros e aberturas estudadas.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Classificação dos regimes de escoamento em relação à trajetória e respectivos números de Reynolds.....	17
Tabela 2 –	Valores aproximados de K (perdas localizadas).....	26
Tabela 3 –	Caraterísticas técnicas de registros utilizados em tubulações.....	28
Tabela 4 –	Caraterísticas dos registros ensaiados.....	36
Tabela 5 –	Matriz de correlação entre as variáveis independentes (Q, V e Re) e variáveis dependentes (hfL, K, Leq).	56
Tabela 6 –	Equações de perda de carga localizada, coeficiente de perda de carga e comprimento equivalente em função da velocidade de escoamento para os registros avaliados	62
Tabela 7 –	Equações de perda de carga localizada, coeficiente de perda de carga e comprimento equivalente em função do Número de Reynolds para os registros avaliados	67

LISTA DE SÍMBOLOS

R_e	número de Reynolds (adimensional);
V	velocidade média do escoamento ($m.s^{-1}$);
D_h	dimensão geométrica característica;
ρ	massa específica ($kg. m^{-3}$);
μ	viscosidade dinâmica ($Ns. m^{-2}$);
ν	viscosidade cinemática ($m^2.s^{-1}$);
$\partial\vec{V}$	vetor velocidade ($m. s^{-1}$)
∂s	deslocamento (m)
A	área da seção transversal do escoamento (m^2);
Q	vazão do escoamento ($m^3.s^{-1}$);
g	aceleração da gravidade ($m. s^{-2}$);
$\frac{p}{\gamma}$	energia de pressão ou piezométrica (m);
Z	energia de posição ou potencial (m);
H_m	energia aplicada ou retirada por alguma máquina (m);
Δh	perda de energia mecânica ou perda de carga (m);
J	perda de carga unitária ($m. m^{-1}$);
h_f	perda de carga contínua (m);
L	comprimento do conduto (m);
D	diâmetro interno do tubo (m);
L	comprimento do tubo (m);
ϵ	altura das rugosidades do tubo (m);
f	fator de atrito (adimensional);
m e c	coeficientes constantes da equação de Blasius;
h_l	perda de carga localizada ($m. m^{-1}$);
K	coeficiente que depende da geometria da singularidade e do número de Reynolds (adimensional);
m	massa (kg);
V	volume (m^3);
t	tempo (s);
N_d	número de pares de dados;

- E_i valor do coeficiente de perda de carga estimado pelo modelo matemático ajustado (mm);
- O_i valor do coeficiente de perda de carga observada (mm);
- EQM erro quadrado médio (mm²);
- \bar{O} média dos valores O_i (mm);
- C índice de precisão;
- d índice de concordância;
- r coeficiente de correlação.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Hidrodinâmica	15
2.2	Regime de escoamentos	16
2.2.1	Em relação à direção da trajetória	16
2.2.2	Em relação à variação no tempo	17
2.2.3	Em relação ao espaço	18
2.3	Equação de continuidade	19
2.4	Equação de Bernoulli	20
2.5	Perda de carga contínua	22
2.6	Perda de carga localizada	24
2.7	Tipos de registros	27
2.7.1	Registro de gaveta	29
2.7.2	Registro de esfera	29
2.7.3	Registro de pressão	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1	Determinação da vazão e perda de carga	38
3.2	Determinação dos coeficientes perda de carga	42
3.3	Matriz de correlação	44
3.4	Análise de Agrupamentos Hierárquicos	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5	CONCLUSÃO	72
	REFERÊNCIAS	74
	APÊNDICES	78

1 INTRODUÇÃO

A perda de carga é um dos fenômenos mais importantes na hidráulica de condutos forçados e que promove grande influência no escoamento de fluidos (BAPTISTA *et al.*, 2014). Existem duas classificações da perda de carga: contínuas e localizadas.

A perda de carga contínua ocorre em trechos retilíneos da tubulação enquanto a perda de carga localizada ocorre em trechos singulares dos condutos, quando o fluido sofre alguma turbulência extra em seu escoamento, devido a algum elemento inserido na tubulação, como junções, conexões, curvas, válvulas, entradas, saídas, registros e outros (PORTO, 2004; GOMES, 2010).

A perda de carga em registros é influenciada pelas características do escoamento, envelhecimento do material, variação da vazão, diâmetro das tubulações e características individuais de cada tipo de registro, de caráter geométrico, construtivo e do elemento de controle de fluxo. Existem diferentes tipos de registros, como os de gaveta, pressão e esfera, que podem ser utilizados em instalações hidráulicas. Os registros de gaveta normalmente apresentam uma menor perda de carga em relação aos registros de pressão e esfera, devido suas características individuais.

Deste modo, estes acessórios registros possuem uma grande influência na perda de carga que ocorre de forma localizada e, então, no funcionamento de instalações hidráulicas, mesmo estando totalmente abertos, quer seja em tubulações longas ou curtas, mas, principalmente, nestas últimas.

A estimativa da perda de carga desenvolvida em conexões, além de depender de diversas variáveis hidráulicas relativas ao escoamento, depende também da forma de sua quantificação. Assim, o método a ser usado para esta estimativa trata-se de um campo experimental. Comumente dois métodos são utilizados: o direto e o comprimento equivalente.

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar o comportamento hidráulico dos registros de gaveta, esfera e pressão. Os objetivos específicos da pesquisa foram:

- a) Determinar a perda de carga localizada em diferentes registros, para porcentagens de abertura relativa de 100%, 75%, 50% e 25%, definidas a partir da manobra total ou parcial de seus volantes ou alavancas;
- b) Calcular, a partir da perda de carga localizada, os coeficientes de perda de carga localizada “K”, do método direto, comprimento equivalente “Leq” e correlacioná-los com as variáveis obtidas relacionadas ao escoamento;

- c) Ajustar, quando possível, equações que relacionem a perda de carga localizada, K e Leq com as variáveis hidráulicas, relativas ao escoamento, velocidade e número de Reynolds;
- d) Agrupar os registros, por meio de dendrograma, de forma a determinar semelhanças em seus comportamentos hidráulicos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Hidrodinâmica

A Hidrodinâmica tem como objeto de estudo o movimento de fluidos, sendo sua base a Mecânica dos Fluidos, que estuda o comportamento físico dos fluidos, assim como as leis que regem esse comportamento (BRUNETTI, 2008).

Fluido é uma substância que não tem forma própria, assume o formato do recipiente (BRUNETTI, 2008). Os fluidos podem ser classificados em líquidos ou gases, sendo que os gases ocupam todo recipiente, enquanto os líquidos apresentam uma superfície livre. Bistafa (2018) acrescenta que diante dessa classificação é necessário distinguir que a mecânica dos fluidos compressíveis (gases) é considerada como fluxo compressível se a massa específica do fluido muda em relação à pressão. A variação da massa específica do fluido incompressível com a pressão é desprezível e a mecânica dos fluidos incompressíveis (líquido) estuda somente os princípios e leis da mecânica clássica, que está subdividida em: cinemática, estática e dinâmica.

De acordo com Azevedo Netto e Fernández (2015), a hidrodinâmica apresenta muitas variáveis físicas, o que torna o seu equacionamento altamente complexo, derivando a adoção de certas simplificações tais como abstração do atrito interno, trabalhando com o denominado fluido perfeito.

Para a compreensão do movimento dos fluidos são necessárias cinco equações: três equações gerais do movimento relativas cada um dos três eixos X, Y, Z; uma equação de continuidade que exprime a lei de conservação das massas e; por fim, uma equação complementar que leva em conta a natureza do fluido (AZEVEDO NETTO; FÉRNANDEZ, 2015).

Ainda segundo os mesmos autores, existem dois métodos para o estudo do movimento de fluidos: no de Euler se faz o estudo das grandezas características do movimento ao longo do tempo, em pontos fixos, ou seja, verifica-se os valores tomando as grandezas (velocidade, massa específica, pressão e temperatura) das diferentes partículas que passam pelos pontos de referência, enquanto o método Lagrange estuda a mesma partícula e verifica-se os valores das grandezas ao longo da sua trajetória. Neste caso, essas grandezas são determinadas em função dos valores por elas assumidos no instante inicial t_0 .

2.2 Regime de escoamentos

De acordo com Carvalho (2014) e Baptista *et al.* (2014), nos condutos forçados o escoamento ocorre sob uma pressão diferente da atmosférica, sendo o conduto, neste caso, fechado, como no caso de tubulações de sucção, de recalque, redes de linhas laterais de irrigação, dentre outros. Podem ser de qualquer seção, embora a circular seja predominante. Já, nos condutos livres a pressão atmosférica atua diretamente sobre a superfície livre da água (como rios, córregos, canais, galerias de esgoto), e a seção transversal destes pode assumir diferentes formas. Para Porto (2004), os escoamentos de fluidos estão sujeitos às determinadas condições gerais, princípios e leis da dinâmica e à teoria da turbulência. Sabendo disso, a hidráulica possui várias maneiras de classificação dos escoamentos dos fluidos de acordo com suas características, sendo classificada em relação à direção da trajetória, variação tempo, variação na trajetória e movimento de rotação.

2.2.1 Em relação à direção da trajetória

Osborne Reynolds, em 1883, estudou a trajetória da partícula de fluido fazendo a injeção de um corante no meio da massa líquida em movimento, e classificou os escoamentos em laminar e turbulento, conforme a trajetória das partículas (CARVALHO, 2008). No escoamento laminar o corante forma um filete bem definido, sem se misturar com o líquido, uma vez que as várias camadas do líquido se movem sem perturbação. Já no escoamento turbulento, as partículas do líquido têm trajetórias irregulares, causando uma transferência da quantidade de movimento de uma parte a outra do fluido. Entre os regimes laminar e turbulento, há o escoamento de transição, como mostrado na Figura 1 (BAPTISTA *et al.*, 2014).

Figura 1 - Representação gráfica dos regimes de escoamento em relação à trajetória.



Fonte: Carvalho (2014).

Após várias observações, Reynolds apresentou um critério para se determinar o tipo de regime de escoamento, sendo o número de Reynolds (Re), o qual é dado por (BAPTISTA *et al.*, 2014). (EQUAÇÃO 1).

$$Re = \frac{\rho v D_H}{\mu} \quad \text{ou} \quad Re = \frac{v D_h}{\nu} \quad (1)$$

em que:

Re : número de Reynolds (adimensional);

v : velocidade média do escoamento ($m.s^{-1}$);

D_h : dimensão geométrica característica (mm);

ρ : massa específica ($kg.m^{-3}$);

μ : viscosidade dinâmica ($Ns.m^{-2}$); e

ν : viscosidade cinemática ($m^2.s^{-1}$).

Baptista *et al.* (2014) aponta que nos escoamentos livres adota-se o raio hidráulico (R_h) como a dimensão geométrica, e para os escoamentos em condutos forçados o diâmetro D , conforme mostrado na Tabela 1, que apresenta os números de Reynolds correspondentes aos limites dos regimes de escoamento verificados na experiência citada, conforme o tipo de conduto.

Tabela 1 - Classificação dos regimes de escoamento em relação à trajetória e respectivos números de Reynolds.

Regime de escoamento em relação à trajetória	Condutos livres $Re = \frac{v R_h}{\nu}$	Condutos forçados $Re = \frac{v D}{\nu}$
Laminar	$Re < 500$	$Re < 2000$
Transitório	$500 < Re < 1000$	$2000 < Re < 4000$
Turbulento	$Re > 1000$	$Re > 4000$

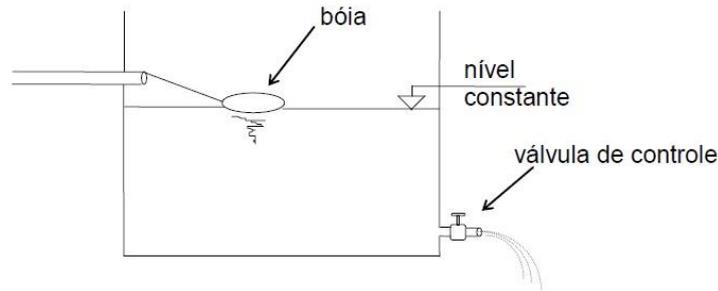
Fonte: Baptista *et al.* (2014).

2.2.2 Em relação à variação no tempo

Quanto a variação no tempo, os escoamentos podem ser classificados em permanentes e não-permanentes (transitórios). O escoamento é permanente quando a velocidade e a pressão, em um determinado ponto não variam com o tempo (CARVALHO, 2014).

Ainda de acordo com este autor, tendo um reservatório um nível constante, ao fundo do qual se instala uma válvula de controle para saída da água (FIGURA 2), após a abertura da válvula, aguarda-se um tempo para normalização do fluxo, ou seja, para ocorrência do regime permanente já que há nível constante, ou seja, uma carga hidráulica constante atuante sobre a válvula de controle.

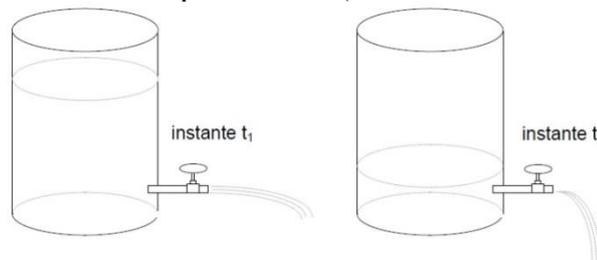
Figura 2 - Escoamento permanente em reservatório a nível constante.



Fonte: Carvalho (2014).

No escoamento não permanente a velocidade e a pressão, em determinado ponto, variam com o tempo, também variam de um ponto a outro, como mostra a Figura 3 (CARVALHO, 2014).

Figura 3 - Escoamento não-permanente (esvaziamento de um reservatório).



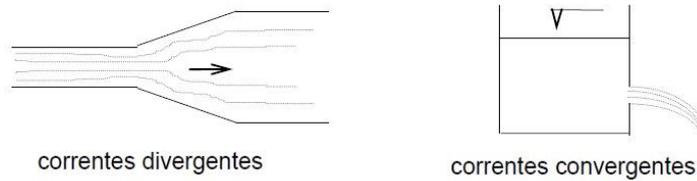
Fonte: Carvalho (2014).

2.2.3 Em relação ao espaço

Porto (2004) apresenta a classificação do escoamento em relação ao espaço, podendo este ser uniforme e variado. No escoamento uniforme todos os pontos de uma mesma trajetória têm a mesma velocidade, sendo um caso particular do regime permanente. A velocidade pode variar de uma trajetória para outra, mas, na mesma trajetória, todos os pontos têm a mesma velocidade, em módulo, direção e sentido. Baptista *et al.* (2014) acrescentam ainda, que os escoamentos uniformes são encontrados em condutos de seção constante e de grande extensão cuja lâmina de água é invariável para adutoras e canais prismáticos.

No escoamento variado, os pontos da mesma trajetória não apresentam velocidade constante no intervalo de tempo considerado. Há variação de escoamento e as correntes de fluxo são convergentes ou divergentes, como apresentado na Figura 4 (CARVALHO, 2014).

Figura 4 -Tipos de corrente de fluxo em escoamento variados.



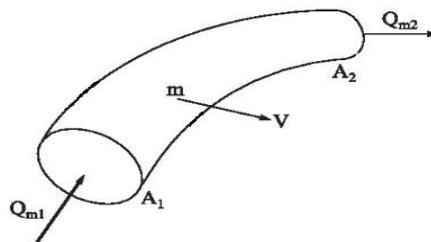
Fonte: Carvalho (2014).

2.3 Equação de continuidade

A equação de continuidade é decorrente da Lei de conservação de massa. Esta Lei da Física estabelece que a massa não pode ser criada ou destruída (massa que entra no tubo igual à massa que sai do tubo) (BAPTISTA *et al.*, 2014). A Figura 5 mostra duas seções de escoamento de um tubo de corrente, na seção A_1 entra a vazão em massa Q_{m1} , enquanto na seção A_2 sai a vazão em massa Q_{m2} . Por se tratar de um tubo de corrente em regime permanente, a superfície lateral não é atravessada pelo fluido, conforme Equação 2 (BISTAFA, 2018).

$$Q_{m1} = Q_{m2} = Q_m \quad (2)$$

Figura 5 - Vazões em massa em um tubo de corrente em regime permanente.



Fonte: Brunetti (2008, p. 75).

De acordo com Brunetti (2008), em um escoamento de um fluido num tubo de corrente não pode haver fluxo lateral de massa. Para que o regime seja permanente, é necessário que não haja variação de propriedades do fluido com o tempo. Se houver uma diferença entre Q_{m1} e Q_{m2} , então, em algum ponto interno do tubo de corrente existirá redução ou acúmulo de massa. Dessa forma, a massa específica varia com o tempo ao contrário do regime permanente. Tendo a Equação 3 Equação da Continuidade para um fluido qualquer em regime permanente.

$$\begin{aligned}
 Q_{m1} &= Q_{m2} \text{ ou } \rho_1 Q_1 = \rho_2 Q_2 \\
 \rho_1 v_1 A_1 &= \rho_2 v_2 A_2
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

em que:

A: área da seção transversal do escoamento (m²).

De acordo com Brunetti (2008), quando o fluido for incompressível, a massa específica na entrada e na saída do volume (V) é a mesma. Dessa forma, obtém-se a Equação 4.

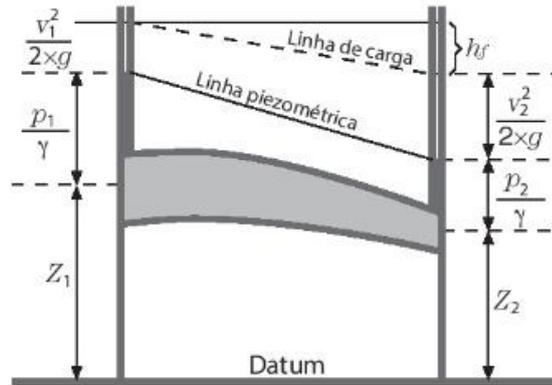
$$\begin{aligned}
 Q &= v_1 A_1 = v_2 A_2 = \text{constante} \\
 Q &= A v
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Sendo assim, a vazão em volume de um fluido incompressível é a mesma em qualquer seção do escoamento. Pela equação da continuidade pode-se afirmar que a velocidade de escoamento é inversamente proporcional à área da seção transversal (AZEVEDO NETTO; FÉRNANDEZ, 2015). Essa equação é de suma importância em todos os problemas da hidrodinâmica.

2.4 Equação de Bernoulli

O princípio de Bernoulli ou Teorema de Bernoulli deriva da aplicação da equação de Euler aos fluidos sujeitos à ação da gravidade, em movimento permanente e irrotacional, ao longo de uma linha de corrente (AZEVEDO NETTO; FÉRNANDEZ, 2015). Neste caso, a Equação de Bernoulli, aplicada entre dois pontos de uma linha de corrente (FIGURA 6), obtendo a Equação 5.

Figura 6 - Diagrama energético.



Fonte: Azevedo Netto *et al.*, (2015, p. 66).

$$\left(Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} \right) - \left(Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} \right) = H_m + \Delta h \quad (5)$$

em que:

$\frac{v^2}{2g}$ = energia cinética (m);

$\frac{p}{\gamma}$ = energia de pressão ou piezométrica (m);

Z = energia de posição ou potencial (m).

H_m : energia aplicada ou retirada por alguma máquina (m);

Δh : perda de energia mecânica ou perda de carga (m).

O lado esquerdo da Equação 5 corresponde ao gasto médio de energia para o fluido ser transportado da seção 1 à seção 2, enquanto o lado direito representa o trabalho realizado por uma máquina desde o sistema ao exterior somado à perda de energia mecânica. Cada parcela da Equação 5 representa um tipo de energia do elemento fluido de peso unitário. Assim, estas parcelas têm dimensão linear e são denominadas de carga (BAPTISTA *et al.*, 2014).

A equação de Bernoulli é um exemplo de aplicação do Princípio da Conservação de Energia e um caso particular da Primeira Lei da Termodinâmica, onde a energia total (energia potencial gravitacional, energia de pressão e energia cinética) do fluido, permanece constante ao longo de seu movimento (BISTAFA, 2018; AZEVEDO NETTO *et al.* 2015).

A viscosidade e o atrito externo são os principais responsáveis pela diferença; em consequência das forças de atrito, o escoamento só ocorre com uma perda de energia: a perda de carga (a energia se dissipa sob a forma de calor) (AZEVEDO NETTO *et al.* 2015, p. 66).

Zitterell *et al.* (2009), estudaram a perda de carga contínua nos microtubos utilizando a equação de Bernoulli obtendo um ajuste nas equações que apresentaram uma variação na vazão e as perdas de carga foram proporcionais as potências da velocidade média.

De acordo com Bistafa (2018), a equação de Bernoulli é aplicada unicamente ao fluido fictício não viscoso chamado de fluido perfeito. Contudo, sabe-se que os fluidos de natureza e os fluidos sintéticos são chamados de fluidos reais e possuem viscosidade. Portanto, a perda de carga sempre existirá no escoamento do fluido real. Porém, há certos casos em que a perda de carga é pequena quando comparada às demais cargas ou pode ser até insignificante.

2.5 Perda de carga contínua

O líquido, ao escoar em uma canalização, sofre determinada resistência ao seu movimento em razão do efeito combinado da viscosidade e inércia. Essa resistência é vencida pelo líquido em movimento, mediante uma dissipação de parte de sua energia disponível ao que, comumente, se chama de perda de energia ou perda de carga (CAVALCANTI, 2009). Sempre que um líquido escoar no interior de uma tubulação de um ponto para outro, haverá perda de energia. Azevedo Netto e Fernández (2015) admitem que essa perda seja uniforme em qualquer trecho de uma canalização de dimensões constantes, independentemente da posição da canalização, por isso são chamadas de perdas contínuas.

O escoamento em tubos está sempre sujeito à resistência hidráulica e a dissipação de energia. A dissipação de energia representada pela perda de carga em escoamentos permanentes e turbulentos de fluidos reais, através de tubos de seção cilíndrica, pode ser calculada por diferentes equações (CARDOSO, 2007; GOMES, 2009). Dentre elas, a equação de Darcy-Weisbach que é a mais precisa para o cálculo da perda de carga em tubulações, já que envolve todas as variáveis pelo fenômeno (ZITTERELL *et al.*, 2009) e possui significado físico. Esta fórmula é apresentada na Equação 7.

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (7)$$

em que:

h_f : perda de carga (m);

L: comprimento do tubo (m);

D: diâmetro interno do tubo (m);

v: velocidade média do escoamento ($m.s^{-1}$);

g: aceleração da gravidade ($m.s^{-2}$); e

f: fator de atrito, dependente do número de Reynolds (Re) e da altura das asperezas (ε , em m) nas paredes internas do tubo.

Outra forma comum de expressar a perda de carga é pela razão entre a perda de carga contínua e o comprimento de tubo, representa o gradiente ou a inclinação da linha de carga e é denominada por perda de carga unitária, conforme a Equação 8 (BAPTISTA *et al.*, 2014):

$$J = \frac{h_f}{L} \quad (8)$$

em que:

J: perda de carga unitária ($m.m^{-1}$);

Na equação de Darcy-Weisbach, a estimativa do fator de atrito (f) é essencial para o cálculo da perda de carga contínua em redes de tubulações. Para escoamento laminar ($Re < 2000$), o cálculo do fator de atrito (f) é feito a partir da Equação 9, sendo apenas uma função do número de Reynolds (Re), o qual depende exclusivamente das propriedades do fluido, do diâmetro do tubo e da velocidade do escoamento. Porém, para escoamento permanente turbulento, a estimativa do fator de atrito é mais complexa, pois f é uma função da rugosidade relativa das paredes do tubo (ε/D) e do número de Reynolds (CARDOSO, 2007; RETTORE NETO *et al.*, 2013; ZITTERELL *et al.*, 2009).

$$f = \frac{64}{Re} \quad (9)$$

Para escoamento turbulento uniforme em tubos comerciais rugosos, a equação de Colebrook-White é mais utilizada para calcular o fator de atrito f (PORTO 2004), sendo

válida $2000 < Re < 10^8$ e $0 \leq \varepsilon/D < 0,05$. Esta equação relaciona o fator de atrito com a rugosidade relativa e com o número de Reynolds, conforme a Equação 10.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,71} + \frac{2,52}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (10)$$

em que:

ε : altura das rugosidades do tubo (m). Esta equação é válida também para o caso limite de tubos lisos ($\varepsilon = 0$) e escoamento completamente turbulento.

Para tubos lisos e $4000 \leq Re \leq 100.000$ o fator de atrito pode ser estimado por uma equação simples proposta por Blasius (RETTORE NETO *et al.*, 2013; ZITTERELL *et al.*, 2009). A equação de Blasius é uma função somente do número de Reynolds sendo apresentada pela Equação 11.

$$f = \frac{c}{Re^m} \quad (11)$$

em que, c e m são os coeficientes de Blasius, 0,316 e 0,25, respectivamente.

Quando o número de Reynolds é muito elevado, a precisão é reduzida, pois o fator de atrito se aproxima de zero. Zitterell *et al.* (2009) salientam que quando Re é inferior a 4000, em regime laminar ou zonas críticas, a equação de Blasius superestima o fator de atrito.

2.6 Perda de carga localizada

A perda de carga localizada ocorre quando o fluido sofre alguma turbulência em seu escoamento por algum elemento inserido no tubo. Essas turbulências localizadas ao longo das tubulações curtas ou longas, são causadas por singularidades, ou seja, descontinuidades nos trechos retilíneos, e provocam dissipação de energia (BAPTISTA *et al.*, 2014; GOMES, 2010). Isso ocorre sempre que um acessório é inserido na tubulação, seja para promover a junção de dois tubos, ou mudar a direção do escoamento, ou ainda para controlar a vazão (AZEVEDO NETTO, 2015), dentre outros objetivos. Em alguns casos, como acontece em instalações hidráulicas prediais, a perda de carga localizada é mais importante do que a perda

de carga contínua, devido ao seu número de conexões e aparelhos, proporcionalmente ao comprimento da tubulação (BAPTISTA *et al.*, 2014).

A perda de carga localizada é expressa classicamente pela variação da energia cinética multiplicada por um coeficiente K (AZEVEDO NETTO, 2015), por meio da Equação 12.

$$h_l = K \frac{v^2}{2g} \quad (12)$$

em que:

h_l : perda de carga localizada (m); e

K: coeficiente que depende da geometria da singularidade e do número de Reynolds (adimensional).

De acordo com Zitterell *et al.* (2009), o coeficiente K depende das características geométricas da peça, da rugosidade da parede, e, em alguns casos, das condições do escoamento e do número de Reynolds. Assim, reduzindo o aumento do número de Reynolds (Re) até certo limite a partir do qual se mantém constante. Para Azevedo Netto (2015), o valor de K pode ser considerado constante para peças especiais em que o escoamento seja turbulento, independentemente da velocidade, do diâmetro da tubulação e do tipo de fluido. Alguns desses valores indicativos dos coeficientes de perda de carga para diversos acessórios são apresentados na Tabela 2, observando que, pela natureza do problema, tais valores não são universais, mesmo porque, para determinados acessórios, o valor de K é em função do próprio diâmetro.

Tabela 2 - Valores aproximados de K (perdas localizadas).

Peça	K	Peça	K
Ampliação gradual	0,30	Junção	0,40
Bocais	2,75	Medidor Venturi	2,50
Comporta aberta	1,00	Redução gradual	0,25
Controlador de vazão	2,50	Saída de canalização	1,00
Cotovelo de 90°	0,90	Tê, passagem direta	0,60
Cotovelo de 45°	0,40	Tê, saída de lado	1,30
Crivo	0,75	Tê, saída bilateral	1,80
Curva de 90°	0,40	Válvula de ângulo aberta	5,00
Curva de 45°	0,20	Válvula de gaveta aberta	0,20
Curva de 22,5°	0,10	Válvula borboleta aberta	0,30
Entrada normal em canalização	0,50	Junção	0,40
Entrada de borda	1,00	Medidor Venturi	2,50
Existência de pequena derivação	0,03	Redução gradual	0,25

Fonte: Azevedo Netto (2015, p. 122).

Outra forma comum na determinação das perdas de cargas localizadas é a utilização do método dos comprimentos equivalentes (L_e). Este método consiste, basicamente, para fins de cálculos na substituição de acessórios de uma tubulação, por um eixo retilíneo, de igual diâmetro, nos quais a perda de carga provocada pelo acessório seja igual quando a vazão é a mesma. Assim, cada comprimento equivalente (L_e , em metro) é adicionado ao comprimento real da tubulação, transformando todo o cálculo em um problema simples da perda de carga contínua (PORTO, 2004). Com isso, a igualdade entre as Equações 12 e 7 de perda de carga localizada e contínua (Darcy-Weisbach), tem-se então a Equação 13.

$$f \frac{v^2}{2g} \frac{L_e}{D} = K \frac{v^2}{2g} \quad \text{ou} \quad L_e = \frac{K \cdot D}{f} \quad (13)$$

2.7 Tipos de registros

Os registros ou válvulas hidráulicas são componentes empregados nas instalações hidráulicas prediais, instalações de transporte e distribuição de fluidos por meios mecânicos ou por gravidade e em instalações industriais (COELHO, 2009; SOUSA, 2017).

Os registros ou válvulas são acessórios muito utilizados, que estabelecem, controlam e interrompem o fluxo em uma tubulação, por isso devem ser escolhidas criteriosamente, tanto em suas características físicas quanto em sua localização. Ao mesmo tempo em que tais acessórios são de suma importância para o fluxo em uma tubulação eles devem ser utilizados sempre com o menor número possível, pois além de possuírem um alto custo de aquisição, podem ocasionar vazamentos em suas juntas, além de introduzirem perdas de carga no escoamento (SANTOS JÚNIOR *et al.*, 2018).

Segundo Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2009), as principais características dos registros hidráulicos a serem observados são: diâmetro, que deve ser equivalente ao diâmetro da tubulação; temperatura de utilização (água fria e/ ou quente); tipo de acoplamento (roscável ou soldável); e tipo de instalação, que pode ser bruta ou com acabamento, que dependem de a instalação ser aparente ou embutida.

Existem diversos tipos de registros ou válvulas, com características próprias, de forma que cada um está voltado ao atendimento de alguma função, cada qual com as suas vantagens e desvantagens. Coelho (2009) classifica os registros de seguinte modo: gaveta, pressão e esfera, sendo os de esfera fabricados em materiais metálicos e plásticos.

As características técnicas dos registros utilizados nas tubulações são mostradas na Tabela 3.

Tabela 3 - Características técnicas de registros utilizados em tubulações.

Tipo de registro	Caraterísticas técnicas		
Registro de gaveta		Classe de pressão Temperatura máxima de trabalho Diâmetro Aplicação	Até 140 mca Até 120 °C ½ ", ¾ ", 1", 1 ¼ ", 2", 2 ½ ", 3", 4" Instalações hidráulicas prediais, residenciais, industriais, hidro sanitárias e saneamento.
Registro de esfera metálico		Classe de pressão Temperatura máxima de trabalho Diâmetro (polegada) Aplicação	25 kg/cm ² Entre -30°C e 120 °C ½ ", ¾ ", 1", 1 ¼ ", 1 ½ ", 2", 2 ½ ", 3", 4" Instalações de água quente ou fria, pneumática e de líquidos industriais.
Registro de esfera PVC monobloco		Classe de pressão Temperatura máxima de trabalho Diâmetro (polegada) Aplicação	16 kg/cm ² 25 °C ½ ", ¾ ", 1", 1 ¼ ", 1 ½ ", 2", 2 ½ ", 3", 4" Instalações de água fria, pneumática e de líquidos industriais.
Registro de esfera PVC roscável		Classe de pressão Temperatura máxima de trabalho Diâmetro (polegada) Aplicação	16 kg/cm ² 25 °C ½ ", ¾ ", 1", 1 ¼ ", 1 ½ ", 2", 2 ½ ", 3", 4" Instalações de água fria, pneumática e de líquidos industriais.
Registro de pressão		Classe de pressão Temperatura máxima de trabalho Diâmetro (polegada) Aplicação	De 2 a 60 mca com estanqueidade até 140 mca Até 70 °C ½ ", ¾ ", Instalações hidráulicas prediais, residenciais, instalações de transportes de fluidos, saneamento.

Fonte: Adaptado de Docol (2019); Amanco Wavin Brasil (2017) e Tigre (2016).

2.7.1 Registro de gaveta

O registro de gaveta tem a função de bloquear o fluxo de passagem de água e é instalado como registro geral nos trechos de alimentação dos ambientes. Por essa razão, ele funciona de dois modos: totalmente aberto ou totalmente fechado (COELHO, 2009).

Segundo Associação Brasileira de Normas Técnicas na norma NBR 15705 (ABNT, 2009), o registro de gaveta é uma válvula de fecho instalada em tubulações de instalações hidráulicas prediais, para a condução de água potável destinada à interrupção eventual da passagem de água. Consta de um corpo, no interior do qual se encontra uma cunha ou gaveta, que acionada por uma haste se desloca, fechando ou abrindo totalmente a passagem de água.

De acordo com Azevedo Netto e Fernández (2015), válvulas de gaveta são cunhas ou gavetas que, quando fechadas, atravessa a tubulação e, quando abertas, recolhem-se à campânula. Quando aberta, a passagem total do fluxo e a perda de carga que nelas ocorre é muito pequena, devido apenas às reentrâncias laterais que servem de guia e sede de vedação quando a gaveta se fecha.

De acordo com a norma NBR 15705 (ABNT, 2009) os registros de gaveta devem sempre ser usados como registro de manutenção, não sendo permitido o uso para controle de fluxo ou instalações em fim de redes. Este tipo de registro, ainda segundo a norma mencionada, é indicado para uso residencial ou predial em água quente ou fria.

São consideradas vantagens dos registros de gaveta, a passagem totalmente de fluidos quando aberta, o estanque de qualquer tipo de fluido, a construção em ampla gama de tamanhos e a aplicação em ampla faixa de pressão/temperatura o que permite o fluxo nos dois sentidos. Por outro lado, a NBR 15705 (ABNT, 2009) destaca como desvantagens deste tipo de registro o fato de não ser indicado para operações frequentes, não ser aplicável a regulagem e estrangulamento do fluxo, a impossibilidade de se usar estes registros como registro de controle nos pontos de utilização de água nas instalações e o fato destas ocuparem grande volume devido ao movimento de translação do obturador.

2.7.2 Registro de esfera

Os registros de esfera são indicados para processos com abertura rápida ou linear, também têm a mesma função da gaveta, ou seja, bloquear totalmente a saída de água. Comumente são fabricados em metal ou em material plástico (JEFFERSON, 2010).

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas em sua norma 14788 (ABNT, 2001), o registro de esfera caracteriza-se pela presença de um mecanismo envolta da alavanca, pela resistência a altas pressões, rosca ABNT NBR 14788 para os diâmetros, diâmetros de ½ "até 4" polegadas, corrosões e produtos químicos. São utilizadas para o bloqueio de qualquer fluido em linhas de uso geral, onde o fluido transportador e os materiais empregados na fabricação dos registros devem ser sempre compatíveis entre si.

São consideradas vantagens do registro de esfera, o fato de terem menor tamanho e peso, melhor vedação, maior facilidade de operação, menor perda de carga, possuir condições de prover uma adequada ação de controle modulado, possuir um curso total de 90° e, permitir ainda, uma total estanqueidade quando totalmente fechado. Por outro lado, a NBR 14788 (ABNT, 2001) destaca como desvantagens deste tipo de registro alta tendência de cavitação e atingir condições de fluxo crítico, em relativamente menores diferenciais de pressão; do ponto de vista da dinâmica as forças provenientes de fluido tende sempre a fechar o registro e, portanto, é um registro não balanceado, não recomendada a utilização de líquidos agressivos ou em temperaturas superiores a 60 °C.

2.7.3 Registro de pressão

O registro de pressão tem a função de controlar a vazão que passa pela tubulação, sendo, portanto, instalado no trecho da tubulação que alimenta um ponto de utilização (COELHO, 2019).

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas em sua norma (ABNT, 2016), o registro de pressão é uma válvula de pequeno porte, instalada em sub-ramal ou em ponto de utilização, destinada a regular a vazão de água, assim como sua abertura e seu fechamento, pela movimentação de um vedante elastomérico contra uma sede.

De acordo com Sousa (2017), as válvulas de pressão são dispositivos imprescindíveis às instalações de transporte e distribuição de fluidos por meios mecânicos ou por gravidade, são usadas como objetivo de proteger ou isolar bombas ou trechos de tubulações, aliviar e controlar as pressões, controlar vazões e níveis de reservatórios, direcionar o escoamento, drenar e ventilar.

O mesmo autor ainda destaca que este elemento é um grande dissipador de energia, portanto, só é recomendado seu uso quando nenhum outro meio possa substituí-lo. No setor de saneamento, sua utilização é muito difundida, objetivando reduzir as pressões à jusante, a fim de evitar um aumento de pressão em horas de menor demanda da rede de distribuição que

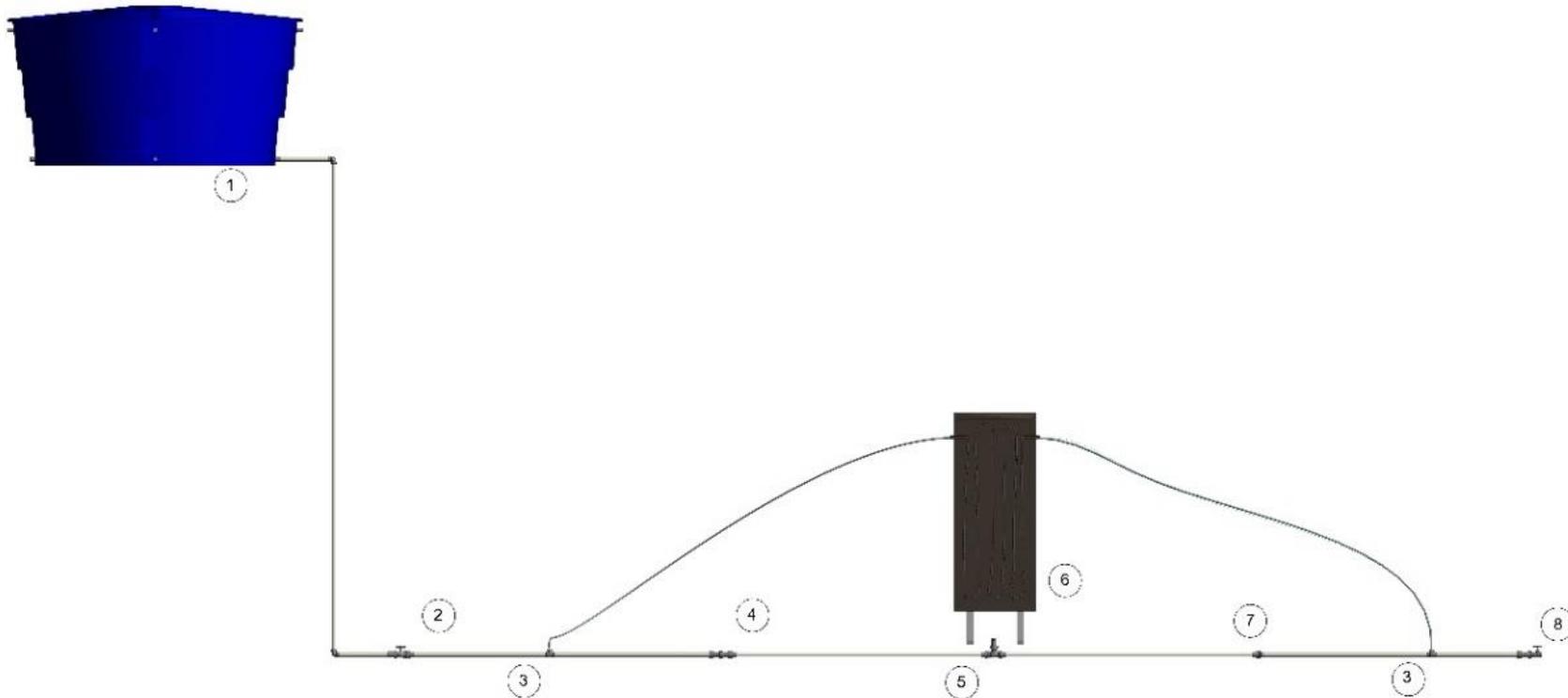
tem como consequência o aumento de vazamento e o consumo induzido. Embora a redução dos vazamentos permita a diminuição de perdas volumétricas na rede, a eficiência do bombeamento é prejudicada pelo aumento das perdas impostas pela válvula. Portanto, o número de válvulas no sistema deve ser o mínimo necessário para o equilíbrio energético e econômico do sistema.

A norma do registro de pressão para instalações prediais ABNT NBR 157041, rosca ABNT NBR 8133 (ISO 228/1), é destinada a interromper ou regular a vazão, tendo a função de reduzir ou aumentar a vazão.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi realizado no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Lavras – UFLA, Lavras, MG. Para os ensaios, foi montado um aparato hidráulico de ensaio de perda de carga em uma rede de tubulação que permite o controle, monitoramento e aquisição de dados. O módulo experimental é composto por um reservatório a nível constante, tubulações, registros, e colares de tomada de pressão. Para medição da diferença da perda de carga de entre duas seções na tubulação de ensaio, foram utilizados um manômetro de diferencial de tubo em “U”, com mercúrio (Hg) como fluido manométrico, para maiores diferenças de pressão; e um manômetro diferencial de água com ar comprimido, para menores diferenças de pressões. A Figura 7, representa, de maneira esquemática, uma vista geral da área experimental.

Figura 7 - Detalhes do módulo experimental construído para avaliação da perda de carga localizada em registros.

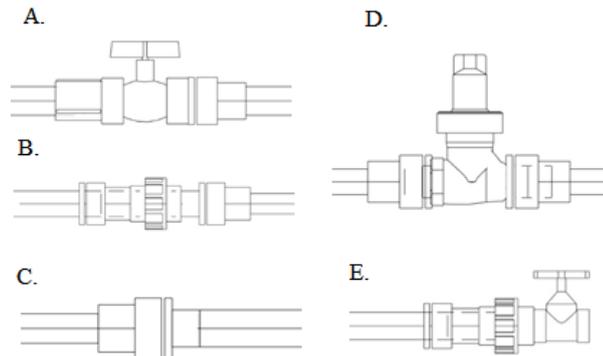


Em que: 1 - Reservatório a nível constante; 2 - Luva roscável – Registro de esfera – Adaptador soldável curto com bolsa e rosca para registro; 3 Colar de tomada de pressão; 4 - Adaptador soldável - União roscável - Bucha de redução roscável – Adaptador soldável curto; 5 - Adaptador soldável curto – Registro a ser ensaiado – Adaptador soldável curto; 6 – Manômetro de mercúrio; 7 - União roscável – Adaptador soldável curto; 8 - Adaptador soldável curto – Registro de gaveta.

Fonte: Da autora (2022).

Na Figura 8 estão representados os detalhamentos das singularidades utilizadas nos trechos da tubulação do módulo experimental.

Figura 8 - Detalhes das singularidades utilizadas nos trechos da tubulação no módulo experimental: ligação entre luva, registro e adaptador (A); adaptador, união, bucha de redução e adaptador (B); união e adaptador (C); adaptador, registro e adaptador (D); e adaptador e registro (E).



Fonte: Da autora (2022).

O fluxo de água se deu a partir de um reservatório com a capacidade de 1000 litros, elevado em estrutura de concreto armado, que possui seu nível de água controlado por uma torneira de boia e um extravasor.

A tubulação era de PVC rígido soldável, com diâmetros nominais 25 e 50 mm, e possuía dois registros nas extremidades (um monobloco de esfera e outro de gaveta de diâmetros nominais de $\frac{1}{2}$ e $\frac{3}{4}$, respectivamente), para o controle do fluxo. Para o ajuste das vazões de ensaio utilizou-se o registro de gaveta instalado na extremidade de jusante do aparato, no ponto 8 da Figura 7. Os registros ensaiados e suas características são apresentados na Tabela 4, com diâmetros diferentes, avaliando as quatro situações de aberturas relativas, ao passo de seu volante ou alavanca, dependendo do tipo de registros: 25%, 50%, 75%, 100%, com cinco repetições. Para os registros de esfera, que possuem maior tendência ao seu fechamento quando parcialmente abertos, as aberturas foram determinadas a partir do ângulo ao passo da alavanca sendo esta, ancorada, para que não houvesse movimentação. Os diâmetros internos de entrada e saída de cada um dos registros foram medidos com paquímetro digital.

A construção dos trechos de tubulação que foram ensaiados foi feita com o uso de dez tipos de registros (A, B, C, D, E, F, G, H, I e J) com diferentes diâmetros e materiais de fabricação (TABELA 4), além de trechos retílineos de tubulação de diâmetros nominais de 20 ou 25 mm para a inserção de acessórios compatíveis com cada tipo de registro. Estes trechos

de tubulação foram inseridos entre os pontos 4 e 7 da Figura 7, e eram constituídos de conjunto tubulação retilínea – registro ensaiado – tubulação retilínea, ou apenas de tubulação retilínea.

Tabela 4 - Características dos registros ensaiados.

Tipos de registro	Registro	Diâmetro nominal	Diâmetro entrada	Diâmetro saída	Comprimento	Material
Gaveta	A	½	20,14	20,14	26,45	Latão
	B	¾	26,10	26,10	43,15	Latão
Esfera metálico	C	½	21,90	21,90	47,26	Latão
	D	¾	27,30	26,69	54,40	Latão
Esfera monobloco roscável	E	½	22,00	20,45	73,34	PVC
	F	¾	27,46	27,00	86,18	PVC
Esfera monobloco PVC	G	½	21,45	21,55	62,80	PVC
	H	¾	27,50	27,00	71,80	PVC
Pressão	I	½	16,40	21,60	51,40	Liga de cobre, bronze e latão
	J	¾	20,90	26,28	60,30	Liga de cobre bronze e latão

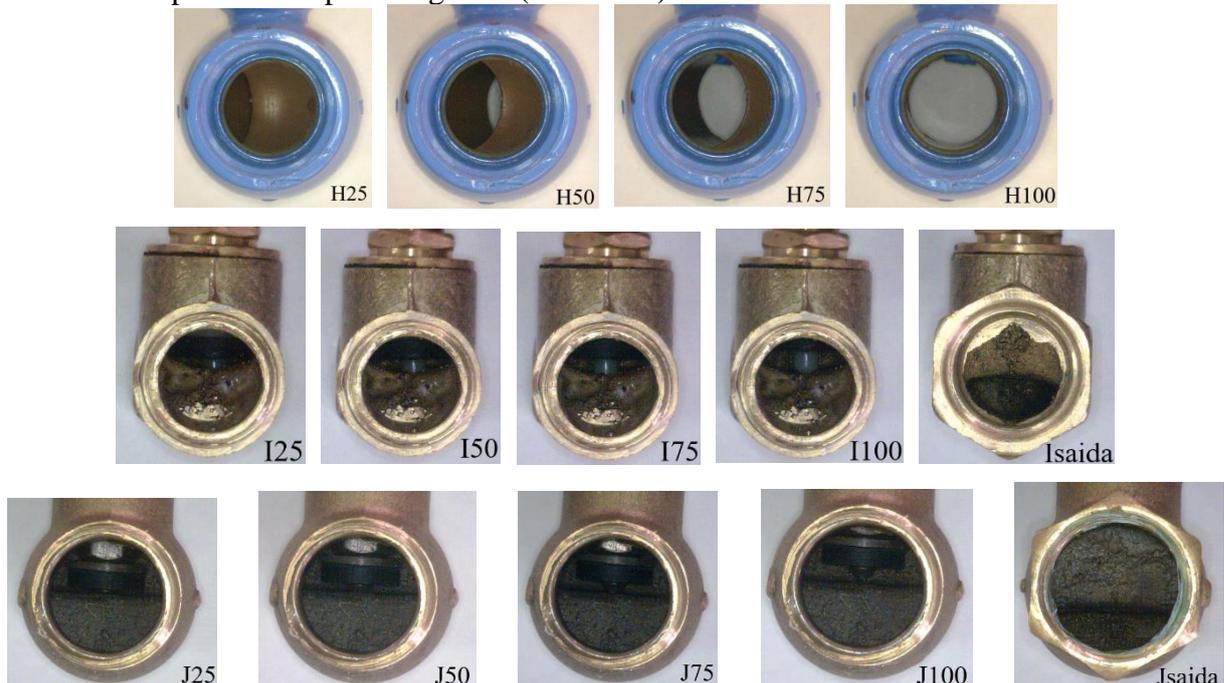
Fonte: Da autora (2022).

Na Figura 9 são apresentadas as imagens obtidas por meio do microscópio digital da marca Dino-Lite, que apresentam os registros estudados, e as áreas das seções transversais permissíveis à passagem de água, para cada abertura relativas ao passo de seu volante ou alavanca, a depender do tipo de registro.

Figura 9 - Registros estudados com aberturas relativas ao passo de seu volante ou alavanca, a depender do tipo de registro. (continua)



Figura 9 - Registros estudados com aberturas relativas ao passo de seu volante ou alavanca, a depender do tipo de registro. (conclusão)



Registro A – gaveta $\frac{1}{2}$ (25%), (50%), (75%), (100%); Registro B – gaveta $\frac{3}{4}$ (25%), (50%), (75%), (100%); Registro C - esfera metálico $\frac{1}{2}$ (25%), (50%), (75%), (100%); Registro D – esfera metálico $\frac{3}{4}$ (25%), (50%), (75%), (100%); Registro E – esfera roscável $\frac{1}{2}$ (25%), (50%), (75%), (100%); Registro F – esfera roscável $\frac{3}{4}$ (25%), (50%), (75%), (100%); Registro G – esfera PVC $\frac{1}{2}$ (25%), (50%), (75%), (100%); Registro H – esfera PVC $\frac{3}{4}$ (25%), (50%), (75%), (100%); Registro I – pressão $\frac{1}{2}$ (25%), (50%), (75%), (100%), vista montante; Registro J – pressão $\frac{3}{4}$ (25%), (50%), (75%), (100%); vista montante.

Fonte: Da autora (2022).

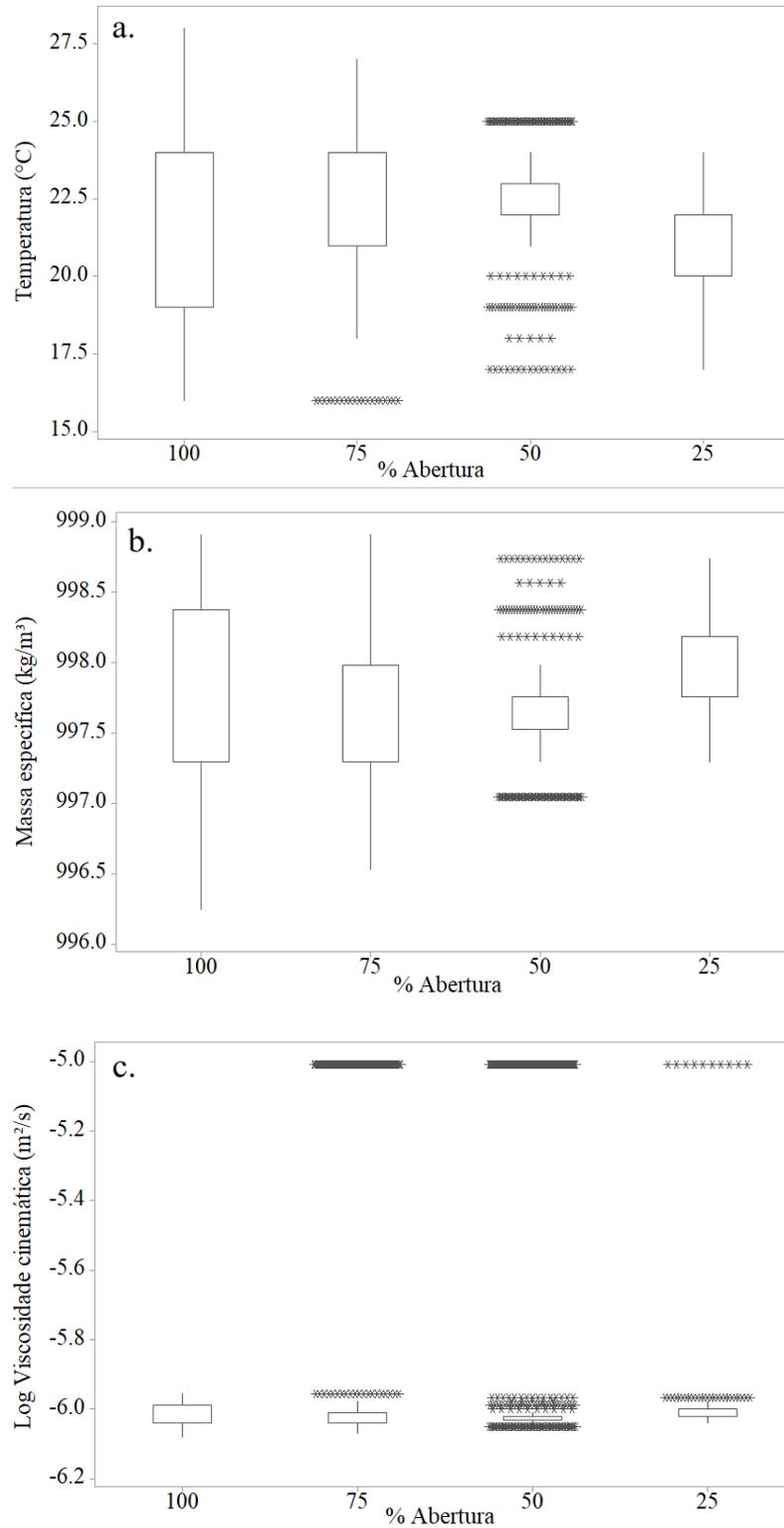
3.1 Determinação da vazão e perda de carga

Após o estabelecimento de regime permanente de escoamento, a vazão em cada ensaio foi estimada pela relação da massa água coletada no intervalo tempo. O recipiente de coleta possuía 20 litros de volume, sendo utilizada uma balança de com precisão de 0,01 kg. O intervalo de coleta foi de 30 s.

A partir da determinação da temperatura da água, com termômetro de mercúrio com resolução 0,2 °C, pode-se determinar sua massa específica e viscosidade cinemática por meio da temperatura da água (AZEVEDO NETTO; FERNÁNDEZ, 2015). Utilizou-se a massa específica para a obtenção do volume de água, a partir da medição da massa coletada em cada ensaio (EQUAÇÃO 14).

São apresentados na Figura 10, gráficos *box-plot* da temperatura da água, massa específica e viscosidade cinemática em cada um dos ensaios, organizados em função da porcentagem de abertura dos registros.

Figura 10 - Temperatura (a.), massa específica (b.) e viscosidade cinemática (c.) da água nos ensaios realizados.



* *Outliers*

Fonte: Da autora (2022).

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{\Delta m}{\rho \cdot \Delta t} \quad (14)$$

em que:

m: massa de água coletada por ensaio (kg);

ρ : massa específica da água (kg/m^3);

Q: vazão em volume (m^3/s);

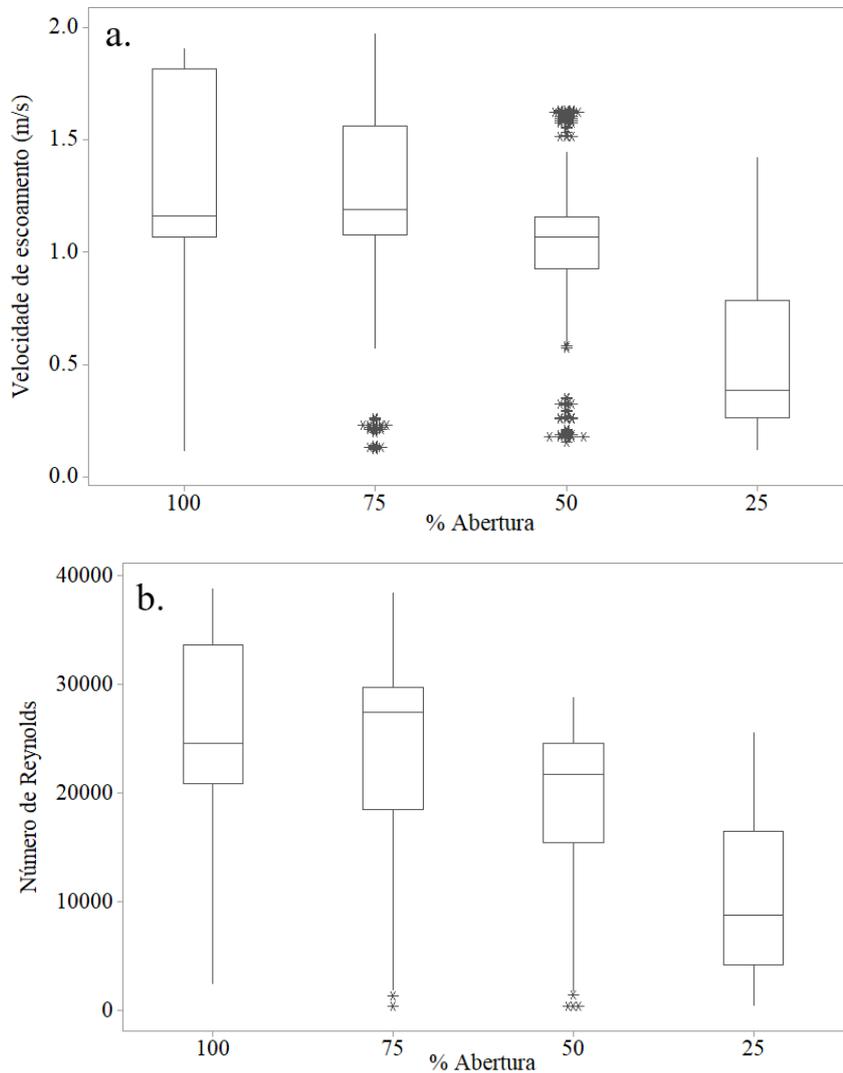
V: volume (m^3); e

t: tempo (s).

O trecho de ensaio poderia receber um conjunto tubulação retilínea – registro ensaiado – tubulação retilínea, ou apenas de tubulação retilínea. Assim, para cada ensaio em que foi utilizado o conjunto tubulação retilínea – registro ensaiado – tubulação retilínea, foi verificada a perda de carga nos trechos apenas com tubulação retilínea e conexões necessárias para a montagem do aparato hidráulico.

Com os valores da vazão já determinadas, foram calculadas as velocidades de escoamento para cada área de seção transversal dos trechos que possuíam os registros de ensaio. Assim, foram utilizados esses valores da velocidade média de escoamento e a viscosidade cinemática para a determinação do número de Reynolds. Gráficos *box-plot* da velocidade de escoamento e número de Reynolds dos registros ensaiados, em função da sua abertura, são mostrados na Figura 11.

Figura 11 - Velocidade de escoamento (a.) e número de Reynolds (b.) nos registros ensaios realizados.



* outliers

Fonte: Da autora (2022).

De posse dos dados observados de perda de carga no trecho retilíneo, foram calibrados, para cada ensaio, valores de rugosidade absoluta da tubulação (quando houve ocorrência de regime turbulento hidraulicamente misto ou plenamente desenvolvido) e de um coeficiente “K” de perda de carga localizada associado ao trecho retilíneo, sem registro (EQUAÇÃO 15), porém, que possuía outras conexões. Esta calibração foi realizada por meio da minimização dos erros ao quadrado, utilizando-se a ferramenta Solver do Excel e o Método GRG Linear.

$$\Delta H_{\text{residual}} = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} + \left(K \times \frac{v^2}{2g} \right) \quad (15)$$

Na Equação 15, o fator de atrito (f) foi calculado por meio da Equação 9 para o regime de escoamento em relação à trajetória laminar, Equação 11 (Blasius) para o regime de escoamento turbulento hidraulicamente liso e por meio da Equação 10 (Colebrook-White) para os demais.

Os valores calibrados da rugosidade absoluta “e” e coeficiente de perda de carga “K”, foram utilizados na estimativa da perda de carga contínua e localizada nas demais conexões, apenas para os ensaios em que se utilizou o conjunto tubulação retilínea – registro ensaiado – tubulação retilínea. Desta forma, a perda de carga localizada nos registros ensaiados pôde ser isolada, para cada abertura relativa avaliada, com a aplicação da Equação 16.

$$\Delta H_{\text{registro}} = \Delta H_{\text{total}} - \Delta H_{\text{residual}} \quad (16)$$

em que:

$\Delta H_{\text{registro}}$: perda de carga localizada estimada nos registros avaliados, em cada abertura relativa(m);

ΔH_{total} : perda de carga total, observada, no conjunto tubulação retilínea – registro ensaiado – tubulação retilínea (m); e

$\Delta H_{\text{residual}}$: perda de carga contínua e localizada, nas demais conexões, estimadas nos trechos ensaiados (m).

3.2 Determinação dos coeficientes perda de carga

O coeficiente de perda de carga (K) foi obtido por meio da Equação 17, tendo a perda de carga localizada estimada e a variável velocidade como a maior do trecho.

$$K = \frac{h_l \cdot 2g}{v^2} \quad (17)$$

Já o comprimento equivalente dos registros foi calculado por meio da Equação 18.

$$L_{\text{eq}} = \frac{h_l \cdot 2g \cdot D}{v^2 \cdot f} \quad (18)$$

em que:

L_{eq} : comprimento equivalente em metros de tubulação para a conexão (m);

Com os valores calculados de K e L_{eq} para cada cenário estudado, buscou-se ajustar modelos matemáticos que relacionassem a hf_L , K e L_{eq} com a velocidade de escoamento e número de Reynolds verificados durante os ensaios. Nos casos em que não foram encontrados modelos com ajuste significativo de todos seus parâmetros, teve-se então, variação não significativa a 5% de probabilidade estatística. Com isso, a hf_L , K e L_{eq} foram representados pelo valor médio obtido mais ou menos do desvio padrão.

Na avaliação do desempenho dos modelos matemáticos ajustados foram determinados os parâmetros estatísticos e indicadores: erro absoluto médio (EAM) - Equação 19; raiz quadrada do erro médio (REQM) - Equação 20; índice de concordância (d) – Equação 21; índice de confiança (C) – Equação 22; coeficiente de correlação (r); e determinação (R^2).

$$EAM = N_d^{-1} \sum_{i=1}^{N_d} |E_i - O_i| \quad (19)$$

$$REQM = \left[N_d^{-1} \sum_{i=1}^{N_d} (E_i - O_i)^2 \right]^{0,5} \quad (20)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{N_d} (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=0}^n (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (21)$$

$$C = d \times r \quad (22)$$

em que:

N_d : número de pares de dados;

E_i : valor do coeficiente de perda de carga estimado pelo modelo matemático ajustado (mm);

O_i : valor do coeficiente de perda de carga observada (mm);

EQM: erro quadrado médio (mm²);

\bar{O} : média dos valores O_i (mm).

O índice C foi obtido pelo produto do índice de precisão (coeficiente de correlação r) pelo índice de concordância (d), sendo o critério de interpretação do desempenho dos métodos de estimativa do coeficiente de perda de carga pelo índice "C".

3.3 Matriz de correlação

Para analisar a dependência linear entre as variáveis independentes vazão máxima, mínima e média; velocidade máxima, mínima e média; número de Reynolds máximo, mínimo e médio com as variáveis dependentes perda de carga máxima, mínima e média; K máximo, mínimo e médio; e Leq máximo, mínimo e médio foi feita uma Matriz de Correlação Linear de Pearson, em que o coeficiente de correlação de Pearson (r_{xy}) entre as variáveis X e Y, é calculado por meio da Equação 23, e tem como resultado um valor entre -1 e 1 (LOESCH; HIELTGEBAUM, 2012), considerando uma significância de $\alpha = 5\%$.

$$r_{x,y} = \frac{\sum_j x_j y_j}{\sqrt{\sum_j x_j^2} \sqrt{\sum_j y_j^2}}, \text{ onde } \begin{cases} x_j = X_j - \bar{X} \\ y_j = Y_j - \bar{Y} \end{cases} \quad (23)$$

Em que:

\bar{X} : média aritmética amostral da variável X; e

\bar{Y} : média aritmética amostral da variável Y.

De acordo com Vieira (2018), o coeficiente de correlação (r_{xy}) apresenta a seguinte classificação, considerando seu valor em módulo: “pequena ou nula” ($0 > r_{xy} \geq 0,25$), “fraca” ($0,25 > r_{xy} \geq 0,50$), “moderada” ($0,50 > r_{xy} \geq 0,75$), “forte” ($0,75 > r_{xy} > 1,00$) e “perfeita” ($r_{xy} = 1,00$), em que os valores menores que 0 representam uma correlação negativa e os maiores, positivas.

A padronização das variáveis em escores Z, foi realizada por meio da Equação 24, apresentando média nula e variância unitária, de forma a minimizar quaisquer interferências que as grandezas das variáveis poderiam causar nas análises (HAIR JÚNIOR *et al.*, 2009; SINGH *et al.*, 2004; VICINI *et al.*, 2018).

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}_j}{S_j} \quad (24)$$

em quem:

Z_{ij} : variável padronizada de X_{ij} ;

X_{ij} : variável de atributo j e objeto i ;

\bar{X}_j : média aritmética das variáveis j ; e

S_j : desvio padrão amostral das variáveis j .

3.4 Análise de Agrupamentos Hierárquicos

A Análise de Agrupamentos Hierárquicos, também conhecido como *Hierarchical cluster analysis*, ou ainda, análise Q, foi realizada utilizando-se das mesmas variáveis dependentes e independentes avaliadas por meio de matriz de correlação, porém, de forma a agrupar os tratamentos (casos) compostos pelas combinações de registros e aberturas relativas. Este agrupamento foi feito por meio da Distância Euclidiana, que é a medida mais comum de dissimilaridade, ou seja, quando menor o seu valor, mais próximos estão (HAIR JÚNIOR *et al.*, 2009; MELO JÚNIOR *et al.*, 2006; SEIDEL *et al.*, 2008), sendo seu valor calculado pela Equação 25 para a distância entre os indivíduos i e i' .

$$d_{ii'} = \sqrt{\sum (Z_{ij} - Z_{i'j})^2} \quad (25)$$

Em quem:

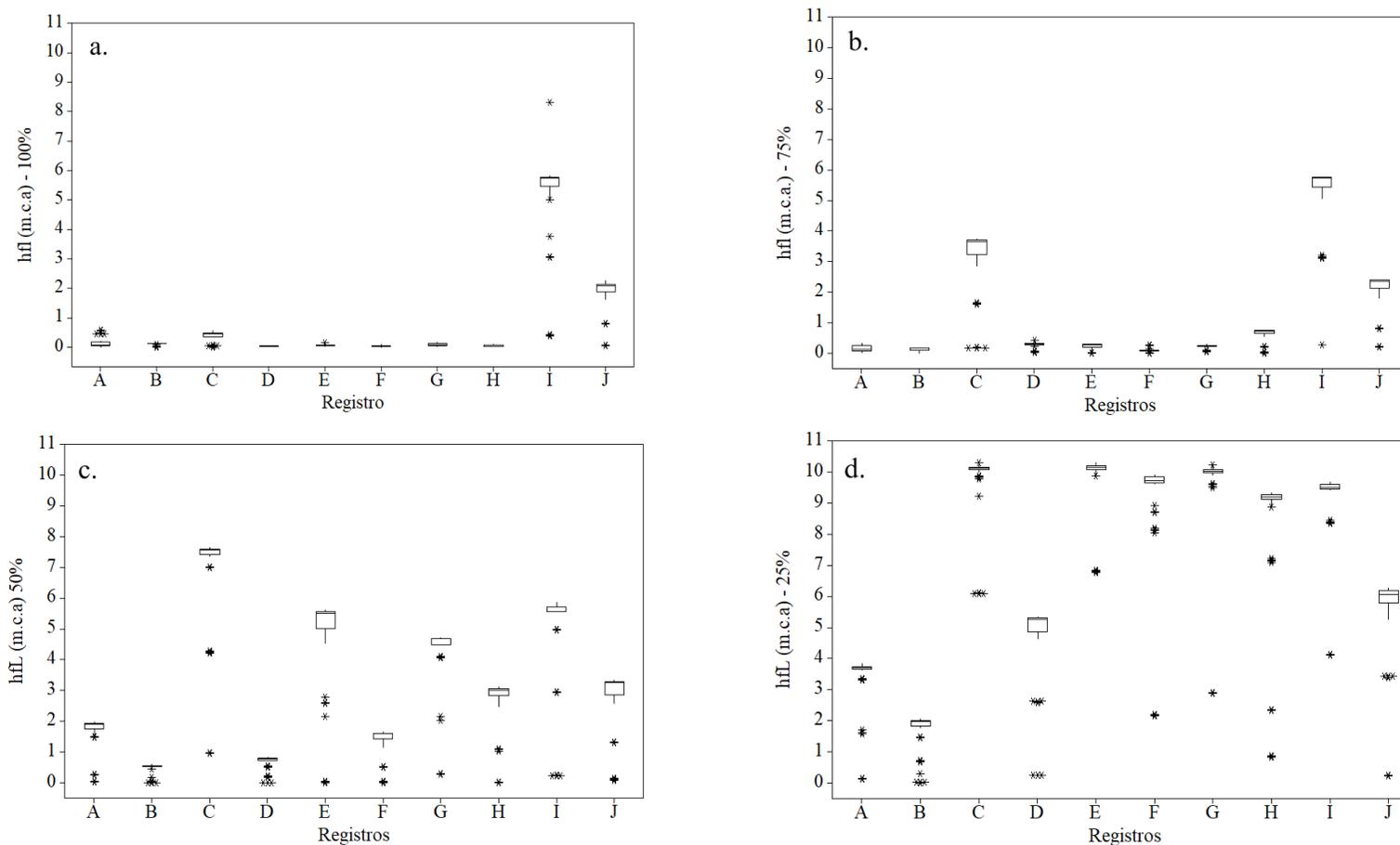
$d_{ii'}$: distância entre as variáveis padronizadas Z_{ij} e $Z_{i'j}$.

Já para o processo aglomerativo de ligação foi utilizado o método Ward (WARD, 1963), onde os agrupamentos são formados por meio da minimização da soma dos quadrados em cada passo, assim, eles possuem uma maior homogeneidade dentro dos grupos formados, sendo propenso a formarem clusters com menos observações (HAIR JÚNIOR *et al.*, 2009; MELO JÚNIOR *et al.*, 2006; MURTAGH; LEGENDRE, 2014; SINGH *et al.*, 2004). Tais processos resultaram em um dendrograma.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 12 são apresentados gráficos *box-plot* das perdas de cargas localizadas (hfL), dos registros ensaiados, em função da sua abertura.

Figura 12 - Perda de carga localizada nos registros avaliados para as aberturas relativas ao passo de seu volante ou alavanca, de 100% (a.), 75% (b.), 50% (c.), 25% (d.).



Em que: Registro A - gaveta (1/2"); Registro B - gaveta (3/4"); Registro C - esfera metálico (1/2"); Registro D - esfera metálico (3/4"); Registro E - esfera roscável (1/2"); Registro F - esfera roscável (3/4"); Registro G - esfera PVC (1/2"); Registro H - esfera PVC (3/4"); Registro I - pressão (1/2"); Registro J - pressão (3/4").

Fonte: Da autora (2022).

Observa-se na Figura 12a, que os registros I e J apresentam os maiores valores de hfL, enquanto o menor valor de hfL foi observado para o registro F. Verificou-se que, quando variou a vazão nos ensaios dos registros de A até H, a variação de perda de carga foi pequena, enquanto nos registros I e J obteve-se um grande intervalo de perda de carga, para as diferentes vazões. Isto denota uma maior sensibilidade dos registros I e J (de pressão) à variação da vazão, mesmo quando totalmente abertos.

Para os registros de A até H, verificou-se proporcionalmente, uma maior seção transversal disponível ao escoamento (FIGURA 9 A100, B100, C100, D100, E100, F100, G100, H100) em relação ao diâmetro externo do registro, diferentemente ao que se tem para o registro de pressão Figura 9 I100, Isaida, J100, Jsaida, em que o caminho interno disponível ao escoamento é restrito, em relação ao corpo do dispositivo, como um todo: para os registros I e J (pressão), o dispositivo obturador atua verticalmente, controlando a passagem de água em uma seção de dimensões reduzidas, o que implica em uma perda de carga, de forma geral, elevada, para a abertura de 100% em relação aos demais avaliados (gaveta e esfera); e que também alterou-se com a variação da vazão de ensaio para a abertura citada (FIGURA 12a).

Amaral *et al.* (2016) ao estudarem a análise dos fatores que influenciam as perdas de carga em tubulações e acessórios hidráulicos, salientaram que existem vários fatores para o surgimento da hfL: a natureza do fluido escoado, natureza das paredes dos tubos, seu diâmetro e, conseqüentemente seção disponível ao escoamento, seu envelhecimento, o regime de escoamento do fluido e a velocidade do escoamento. Desta forma, pode-se inferir que a geometria dos registros de pressão leva a perdas de carga maiores dependendo da vazão, mesmo estando 100% aberto.

Na Figura 12b, verificou-se que os registros A, B, D, E, F, G e H levaram a mudanças mínimas na hfL para as diferentes vazões, enquanto o comportamento dos registros I e J foi semelhante ao que se teve para a abertura 100% (FIGURA 12a). Para o registro C, observou-se que quando este foi fechado em 25%, relativamente ao passo da alavanca do registro (FIGURA 9 C75), a média da hfL aumentou em relação ao obtido para a abertura de 100% (FIGURA 12a), o que não ocorreu para os demais registros de esfera (D, E, F, G, H) e gaveta (A e B).

Visto isto, tem-se que o comportamento hidráulico do registro C (esfera metálico ½") foi mais sensível ao seu fechamento quanto à ocorrência da perda de carga

localizada. No modelo avaliado há um anel interno próximo às paredes do registro, que torna menor a área da seção transversal disponível ao escoamento neste dispositivo (FIGURA 9 C75), além de causar uma perda de carga adicional. Comparativamente, no registro semelhante a este (D - esfera metálico), porém, de maior DN, ou seja, $\frac{3}{4}$ ", mesmo com a redução da abertura, não se obteve comportamento semelhante (FIGURA 12b), por este ter diâmetro interno maior e não possuir este anel interno, de proporções relevantes. Silva *et al.* (2008), na quantificação experimental da hfL em acessórios com o uso de piezômetro, em registros de esfera, obteve maior hfL quando reduziu a seção transversal de escoamento, sendo esta particularmente desprezível quando encontrava-se aberto, como também verificado neste estudo.

Já na Figura 12c, para os registros de esfera (C, E, F, G e H), foi observada uma maior variação na hfL em relação ao que se teve para a abertura 75%, enquanto para os registros A, B, D e F a variação foi menor. Este fato pode ser explicado com a análise da Figura 9 – C50, E50, F50, G50 e H50, comparando estas ao que se obteve para a abertura 25% maior: para as aberturas de 50% nos registros de esfera há uma importante redução da seção disponível ao escoamento, além disso, diferentemente dos registros de gaveta, quando o registro de esfera se encontra parcialmente aberto, este cria duas regiões de turbulência extra ao fluido, na parte posterior e anterior da esfera.

Para os registros I e J o comportamento foi semelhante ao que foi obtido na abertura 75% devido a variação velocidade de escoamento e vazão. Haque *et al.* (2010) estudaram diferentes tipos de registros de esfera em várias aberturas (20%; 40%; 60%; 80%; 100%; 120%) e, para a abertura de 40%, obtiveram uma maior perda de carga com o aumento da velocidade de escoamento. Observa-se ainda, na Figura 12d, que os registros de esfera (C, E e G) obtiveram maior hfL, o que levou a baixas vazões e velocidades escoadas quando atingidas as condições de equilíbrio dinâmico.

Fato interessante é que para os registros A e B (gaveta) e D (esfera metálico de DN $\frac{3}{4}$ "), não se verificou maiores variações da perda de carga entre os tratamentos referentes à 50% e 25% de abertura relativa ao passo da alavanca. Isso se deve a uma variação da velocidade de escoamento nos registros de gaveta devido a pequenas circulações do fluido na área de seção transversal (FIGURA 9 A25, A50, B25, B50), o que era de se esperar já que a perda de carga é dada em parte pela área de passagem do fluido, que diminui à medida que o registro é fechado, no registro D (esfera metálico de

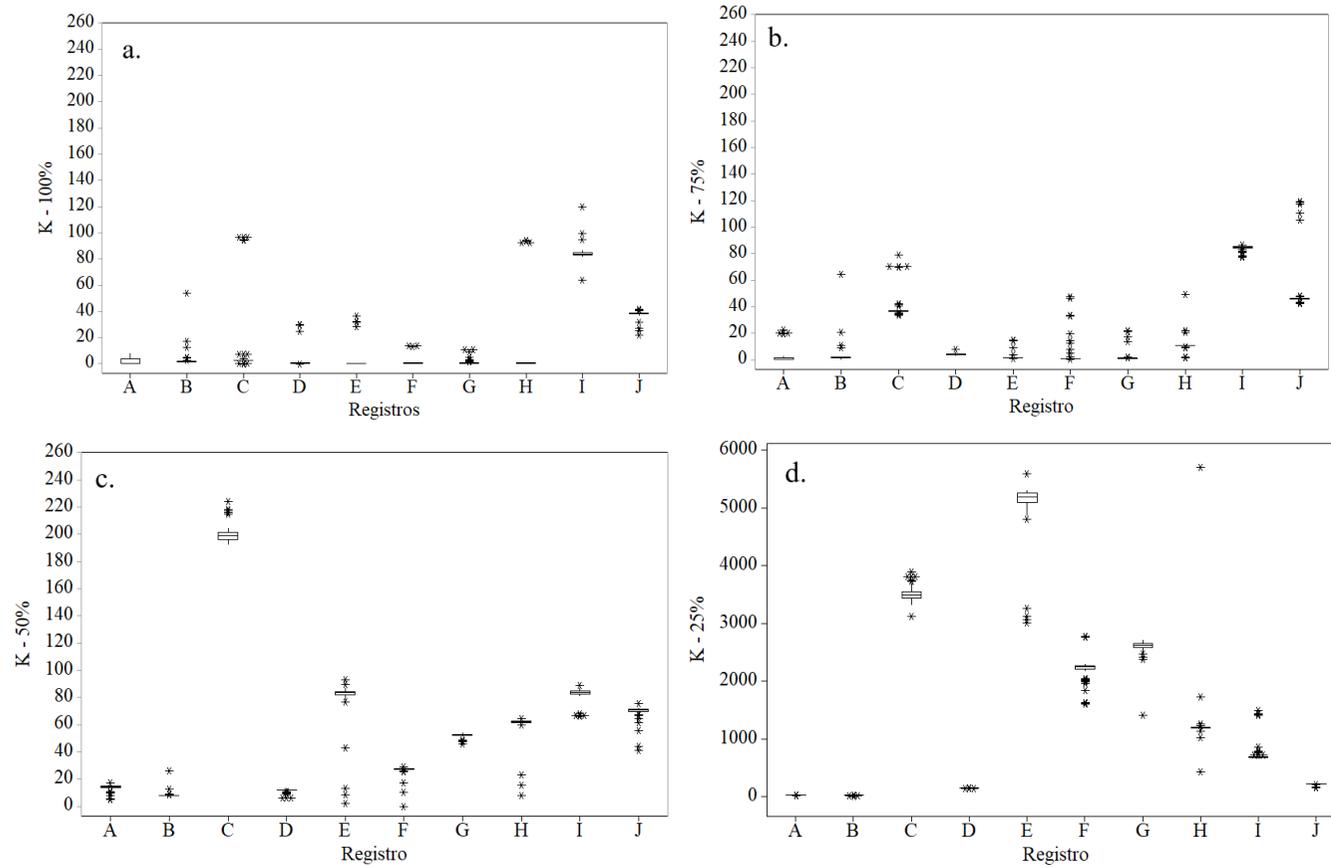
DN ¾") é possível verificar que a variação da velocidade de escoamento se dá devido às circulações do fluido que ocorrem na parte interna da esfera, já que o diâmetro interno do registro não apresenta um anel interno (FIGURA 9 D25 e D50). Costa (2015), ao estudar o escoamento em registro de gaveta utilizando métodos dos volumes finitos, obteve menor hfL quando o registro encontrava-se totalmente aberto, não tendo sido verificadas perturbações relevantes do escoamento.

Nos registros de esfera C, E, F, G e H (FIGURA 9 C25, E25, F25, G25 e H25) houve um aumento excessivo nos valores da hfL, que levaram a menores velocidades de escoamento e vazões em condição de regime permanente. A área de seção transversal do registro C (FIGURA 9 C25) apresenta um anel interno que proporciona uma perda de carga adicional, diferentemente ao que se tem nos registros de esfera roscável e PVC (FIGURA 9 E25, F25, G25 e H25) que não apresentam o anel interno. Percebe-se que nesses registros há uma rugosidade relativa baixa que proporciona altos valores de números de Reynolds, o que caracteriza uma turbulência mais relevante durante o escoamento do fluido. Porto (2004), explica que, com a presença de acessórios ou conexões utilizadas em instalações hidráulicas, há uma alteração no módulo ou direção das linhas de fluxo velocidade média, e conseqüentemente da pressão, isto se reflete no acréscimo da turbulência que produz perdas de carga.

Para os registros de pressão quando se procedeu ao fechamento de 25% (FIGURAS 9 I25 e J25) a média da hfL aumentou em relação à abertura anterior. Sousa (2017), utilizou registros de pressão na otimização de rede setorizada em um sistema real de abastecimento de água com um comprimento de 155 m, e obteve uma menor perda de carga quando o registro encontrava-se aberto o que, em condições de equilíbrio dinâmico, proporciona uma maior capacidade de escoamento pela rede, ou seja, maior vazão, em comparação a quando se reduziu a abertura da seção transversal, tendo-se uma maior hfL e uma menor vazão.

Na Figura 13, observa-se que os valores de coeficiente de perda de carga (K) nos registros avaliados, apresentam grande variação de valores observados, tanto devido à porcentagem de abertura, quanto às características particulares de cada registro avaliado.

Figura 13 - Coeficiente de perda de carga localizada nos registros avaliados para as aberturas relativas ao passo de seu volante ou alavanca, de 100% (a.); 75% (b.); 50% (c.) e 25% (d.)

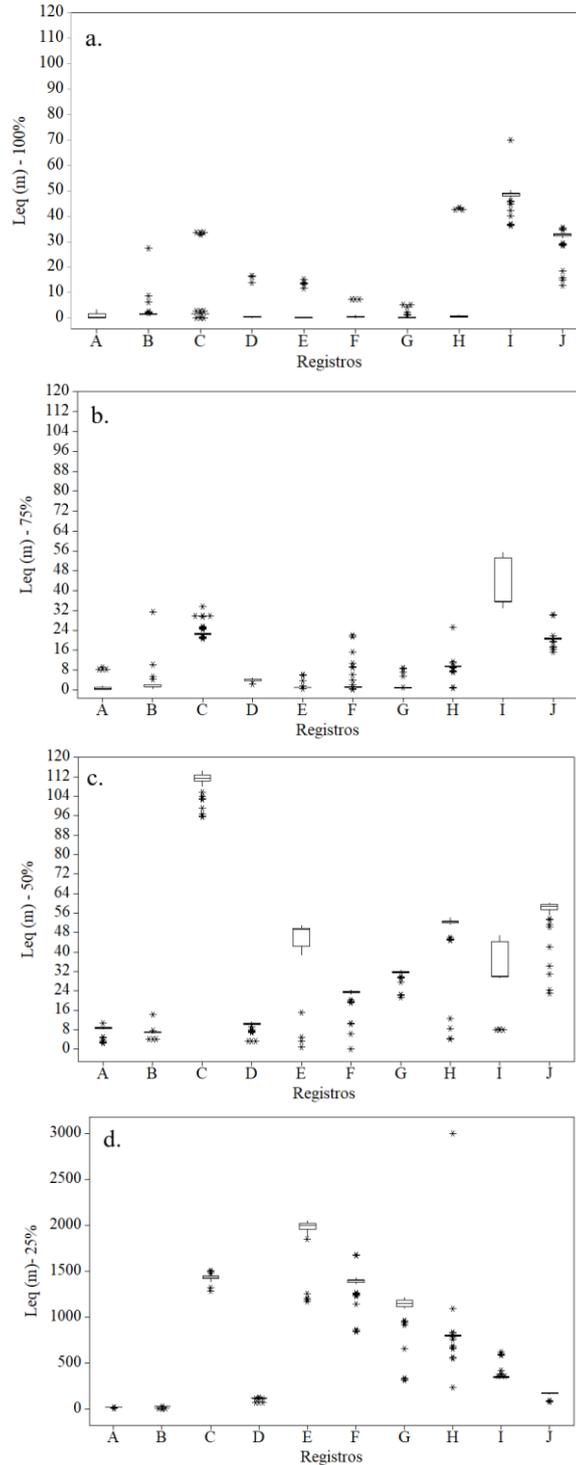


Em que: Registro A - gaveta (1/2); Registro B - gaveta (3/4); Registro C - esfera metálico (1/2); Registro D - esfera metálico (3/4); Registro E - esfera roscável (1/2); Registro F - esfera roscável (3/4); Registro G - esfera PVC (1/2); Registro H - esfera PVC (3/4); Registro I - pressão (1/2); Registro J - pressão (3/4).

Fonte: Da autora (2022).

Já na Figura 14 estão apresentados os gráficos de *box-plot* dos comprimentos equivalentes (Leq) em função das porcentagens de abertura e tipo e/ou modelo de registro ensaiado.

Figura 14 - Comprimento equivalente nos registros avaliados para as aberturas relativas ao passo de seu volante ou alavanca, de 100% (a.); 75% (b.); 50% (c.); 25% (d.)



Em que: Registro A - gaveta ($\frac{1}{2}$); Registro B - gaveta ($\frac{3}{4}$); Registro C - esfera metálico ($\frac{1}{2}$); Registro D - esfera metálico ($\frac{3}{4}$); Registro E - esfera roscável ($\frac{1}{2}$); Registro F - esfera roscável ($\frac{3}{4}$); Registro G - esfera PVC ($\frac{1}{2}$); Registro H - esfera PVC ($\frac{3}{4}$); Registro I - pressão ($\frac{1}{2}$); Registro J - pressão ($\frac{3}{4}$).

Fonte: Da autora (2022).

Observa-se nas Figuras 13a e 14a, que os registros I e J apresentam os maiores valores K e Leq observados. Já os menores valores foram determinados para o registro A. Para os registros I e J, os valores de K e Leq foram maiores devido aos seus maiores valores de hfL mesmo com menores vazões em regime permanente. Para os registros C e D, verificou-se que os valores de K e Leq foram menores, pois em regime permanente se conseguia maiores vazões e, conseqüentemente, maiores velocidades médias de escoamento, quando se abria o registro controlador de fluxo, de jusante. Como consequência, tinha-se um aumento no número de Reynolds e menor hfL. Haque *et al.* (2010) obtiveram menores valores de K com o aumento da porcentagem de abertura. Segundo os autores, à medida que aumentaram a área de seção transversal, o fluxo tornou-se uniforme e menos turbulento.

Observa-se nas Figuras 13b e 14b, que os registros C, I e J apresentam os maiores valores de K e Leq, e os menores valores foram ocorridos no registro A. Verificou-se ainda que, para os registros D, E, F, G e H, a variação do K e Leq foi menor, enquanto que os registros A, B, I e J tiveram um comportamento semelhante com o que se teve na abertura 100%. Já o registro C teve um aumento ligeiro nos valores de K e Leq já que, com altos valores de hfL (FIGURA 12b), se teve uma menor vazão e velocidade em condição permanente, quando já estabilizado o escoamento.

Já pela análise das Figura 13c e 14c, tem-se que os registros C, E, I e J apresentam valores máximos de K; e Leq nos registros C, E, H e J, tendo o menor valor ocorrido no registro B. Nos registros de esfera (C, E, F, G e H), conseguiu-se uma maior variação da velocidade de escoamento e, conseqüentemente Re, com a manobra do registro controlador de fluxo, de jusante, o que proporcionou altos valores de hfL. Para abertura relativa 50% dos registros, houve uma maior variação nos valores de K e Leq nos registros de esfera devido à variação da vazão e, como consequência, velocidade de escoamento, conseguida no registro de jusante, e hfL, porém, nos registros A, B, I e J a variação foi menor.

Nos registros B e I (gaveta e pressão com DN ½"), quando se reduziu 25% da abertura, verificou-se um aumento na hfL, conseqüentemente, se obteve um aumento nos valores de K e Leq. Comparativamente, em registros de gaveta e pressão, porém, de maior DN, ou seja, ¾", com a redução da abertura, não se obteve comportamento semelhante, por este terem uma menor hfL devido ao seu diâmetro maior.

Os registros C, E, F e G levaram aos maiores valores de K e Leq, e o menor valor foi verificado no registro B (FIGURAS 13d e 14d). Para a menor abertura foram

registradas as menores vazões em condição permanente de escoamento e, portanto, menor velocidade. Com isso e com uma maior perda de carga, tem-se maiores valores de K . Verificou-se ainda, uma grande variação nos valores de K e Leq nos registros de esfera (C, E, F, G e H). Já para o registro D esta foi pequena devido à pequena variação da velocidade de escoamento durante os ensaios. Há de salientar que dentre os registros de esfera, este último é o que possuía área da seção transversal mais livre ao escoamento (FIGURA 9). Com os registros E, F, G e H foi observado uma maior magnitude de K e Leq devido à menor velocidade de escoamento e aos altos valores obtidos de hfL .

Comportamento semelhante a este foi verificado para os registros I e J. Nestes, há uma grande restrição da seção disponível, graças à sua construção e seu fechamento por meio de êmbolo. Há que se ressaltar que os registros de pressão tem a função de aliviar e controlar a pressão, sendo assim, é de se esperar um valor de K elevado quando a hfL .

Nos registros A e B se teve os menores valores de K e Leq , mesmo que estes aumentassem consoante a redução da abertura. Nestes registros, alterações na carga de energia cinética do escoamento foram seguidas de variações quase proporcionais de hfL , assim, não se teve grandes mudanças nos valores de K e Leq mesmo com a redução das aberturas. Na Tabela 5 é apresentada a matriz de correlação, entre as variáveis independentes (Q , V e Re) e variáveis dependentes (hfL , K e Leq).

Na Tabela 5 é apresentada a matriz de correlação, entre as variáveis independentes (Q , V e Re) e variáveis dependentes (hfL , K e Leq) para os ensaios realizados.

Tabela 5 - Matriz de correlação entre as variáveis independentes (Q, V e Re) e variáveis dependentes (hfL, K, Leq).

Variáveis independentes	Variáveis dependentes								
	hfLmax	hfLmin	hfLme	Kmax	Kmin	Kme	Leqmax	Leqmin	Leqme
Qmax	-0.990	-0.743	-0.991	-0.763	-0.761	-0.768	-0.666	-0.756	-0.803
Qmin	-0.340	-0.334	-0.367	-0.476	-0.442	-0.472	-0.363	-0.402	-0.456
Qmed	-0.977	-0.763	-0.991	-0.791	-0.789	-0.799	-0.681	-0.779	-0.832
Vmax	-0.161 ^{NS}	-0.146 ^{NS}	-0.168 ^{NS}	-0.158 ^{NS}	-0.147 ^{NS}	-0.150 ^{NS}	-0.140 ^{NS}	-0.147 ^{NS}	-0.157 ^{NS}
Vmin	-0.085 ^{NS}	-0.056 ^{NS}	-0.122 ^{NS}	-0.359	-0.262 ^{NS}	-0.299 ^{NS}	-0.331	-0.254 ^{NS}	-0.328
Vmed	-0.784	-0.580	-0.807	-0.659	-0.637	-0.645	-0.592	-0.641	-0.692
Remax	-0.762	-0.540	-0.774	-0.593	-0.586	-0.592	-0.527	-0.583	-0.623
Remin	-0.241 ^{NS}	-0.113 ^{NS}	-0.259 ^{NS}	-0.312	-0.286 ^{NS}	-0.328	-0.191 ^{NS}	-0.226 ^{NS}	-0.313
Reme	-0.823	-0.563	-0.834	-0.625	-0.618	-0.628	-0.545	-0.609	-0.659

Em que: Q - vazão (L/min); V - velocidade de escoamento (m/s); Re - número de Reynolds (adimensional); hfL - perda de carga localizada (m.c.a); K - coeficiente de perda de carga; Leq - comprimento equivalente (m); max – valor máximo; min - valor mínimo; me – valor médio; e NS – não significativo.

Fonte: Da autora (2022).

Em sistemas de distribuição de água por gravidade a constituição física da tubulação tem papel fundamental na vazão máxima que pode ser transportada, ao se considerar a obtenção de regime permanente. A alteração de um tipo de registro presente na rede ou mesmo o fechamento de um mesmo acessório, leva a uma nova situação de equilíbrio, o que implica em uma nova capacidade de escoamento de água. Neste trabalho, com a análise holística das Figuras 13, 14 e 15, além da Tabela 5, percebe-se que o fechamento dos registros de ensaio reduz a vazão máxima que pode ser escoada (e conseqüentemente, velocidade média na seção de escoamento e Re (FIGURA 12), devido a uma maior perda de carga nos acessórios objeto de estudo, já que a energia disponível ao escoamento sempre era a mesma.

Por isso, foram obtidas correlações negativas entre as variáveis hidráulicas relativas ao escoamento e as variáveis hidráulicas relativas à perda de carga (TABELA 5). Obviamente, em um cálculo expedito de perda de carga, ao se aumentar vazões ou velocidades, tem-se uma maior estimativa da perda de carga como fenômeno físico, porém, há uma distinção de processos, considerando o aqui avaliado. Percebe-se ainda que, o fechamento dos registros não só influencia no aumento da perda de carga localizada (hf_L), o coeficiente K e comprimento equivalente, mas também reduz a velocidade de escoamento e número de Reynolds (FIGURA 12) proporcionando uma correlação negativa.

Em geral, as velocidades máximas e mínimas dos ensaios não são correlacionadas à perda de carga localizada (hf_L), ao coeficiente K e ao comprimento equivalente (Leq), com exceção ao comprimento equivalente máximo e comprimento equivalente médio, que possuem correlações negativas fracas, segundo classificação proposta por Viera (2018), com as velocidades mínimas e médias. Adicionalmente, o Re mínimo só possui correlação com K máximo, médio e comprimento equivalente médio, porém todas estas negativas e fracas (VIEIRA, 2018).

Observa-se ainda que, a vazão máxima e média apresentam uma correlação negativa forte com a perda de carga localizada, coeficiente K e ao comprimento equivalente mínimo e médio, ou seja, quando houve o controle da capacidade máxima de escoamento através do aparato hidráulico, devido ao fechamento dos registros de teste, houve um aumento significativo da perda de carga localizada, coeficiente K e o comprimento equivalente mínimo e médio, com exceção do comprimento equivalente máximo que possui correlação moderada.

A análise de correlação deste estudo apresentou resultados semelhantes aos observados por Haque *et al.* (2010), que utilizaram uma montagem experimental semelhante à realizada neste trabalho, na avaliação da perda de carga localizada em registros de esfera com diferentes aberturas. Estes autores também observaram que, à medida em que a vazão

aumentava, houve uma diminuição na perda de carga localizada e coeficiente K, o que leva a uma diminuição do comprimento equivalente, pois o elemento limitante da vazão era o fechamento do registro de teste, que dissipa a energia disponível ao escoamento em detrimento à vazão.

A velocidade de escoamento máxima apresentou uma correlação não significativa negativa com a perda de carga localizada, coeficiente K e o comprimento equivalente, segundo os parâmetros de classificação propostos por Viera (2018). Já a velocidade de escoamento mínima não se correlacionou com a perda de carga localizada máxima e mínima, pois segundo a classificação proposta por Viera (2018), apresentou uma correlação nula; enquanto para a perda de carga localizada média coeficiente K mínimo e médio, comprimento equivalente mínimo as correlações foram pequenas negativas e não significativas. Para o coeficiente K máximo, comprimento equivalente máximo e médio apresentaram uma correlação fraca negativa.

A velocidade de escoamento média e número de Reynolds máximo e médio correlacionam-se significativamente, quase na mesma proporção, com a perda de carga localizada máxima e média, de forma forte e negativa. Já com a perda de carga localizada mínima, coeficiente K e comprimento equivalente apresentam correlação moderada negativa (TABELA 5), o que denota pouca influência dos diversos valores observados de viscosidade da água sobre a perda de carga (FIGURA 11c). Já Re mínimo apresenta uma correlação não significativa com a perda de carga localizada, coeficiente K mínimo, comprimento equivalente máximo e mínimo, porém, possui uma correlação fraca negativa significativa com o coeficiente K máximo e médio e comprimento equivalente.

Isto ocorreu, pois, de forma geral, as maiores vazões foram obtidas para os registros de gaveta e para as aberturas de 100% e 75%, sendo que, para estes tratamentos, teve-se as menores perdas de carga localizadas e coeficientes destas. Há de se destacar que a amplitude de vazões mínimas e, conseqüentemente, velocidades mínimas, ao se considerar todas as combinações de ensaio, era baixa.

As vazões máxima e média apresentaram correlação quase perfeita com a perda de carga localizada máxima e média (-0,990), forte e negativa, isso comprova que as menores perdas de carga localizadas foram obtidas para as maiores vazões (registros de gaveta e aberturas de 100%, de forma geral), pois as menores vazões eram fruto das maiores perdas de carga localizadas nos registros como ensaiados (registros de pressão e menores aberturas).

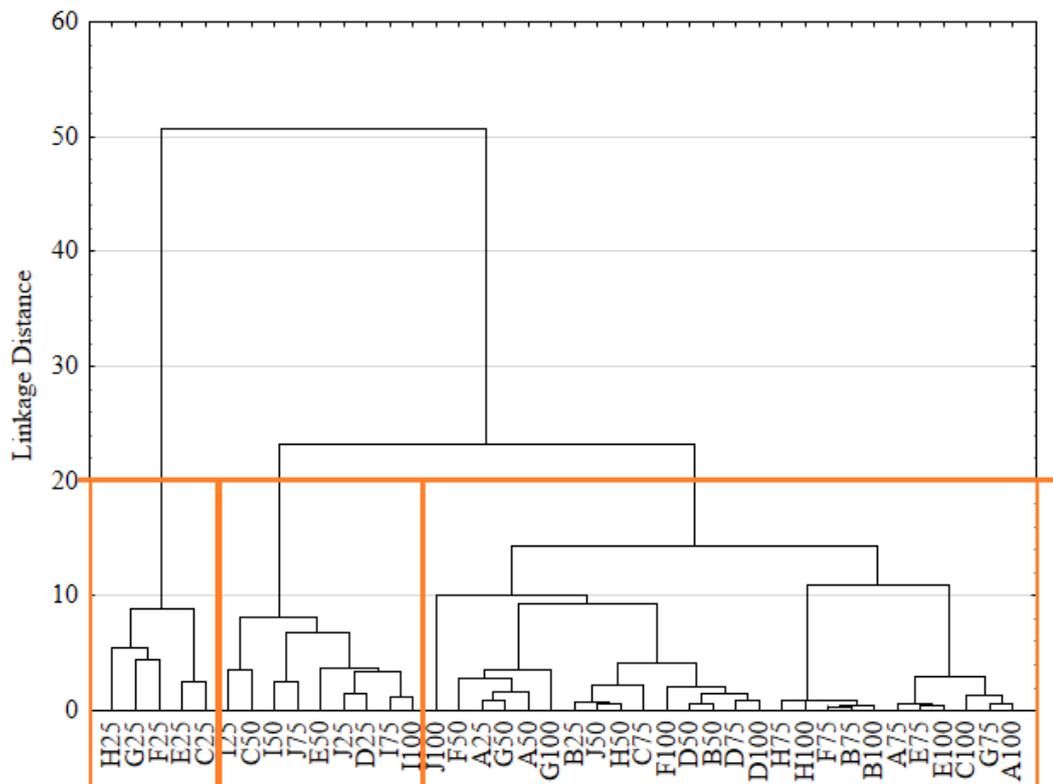
De forma geral, as vazões máximas e médias dos ensaios são mais correlacionadas com as variáveis hidráulicas relativas à perda de carga localizada, do que as vazões mínimas;

e apenas a velocidade média dos ensaios se correlaciona com as variáveis hidráulicas relativas à perda de carga localizada. Já o Re médio dos ensaios se correlaciona melhor com as hfL , K e Leq .

A perda de carga é mais dependente das variáveis hidráulicas que caracterizam o escoamento do que os coeficientes K e Leq estudados. Isso se dá, pois, a perda de carga é um fenômeno hidráulico, enquanto os coeficientes dependem concomitantemente de mais de uma variável que caracteriza o escoamento, além de haver forte dependência, para os cenários avaliados, da abertura do registro de ensaio. Além disso, há uma tendência de estabilização dos valores de K , e conseqüentemente de Leq , para maiores números de Reynolds, já que o atrito viscoso, para este caso, tem forte dependência da rugosidade relativa e não mais da viscosidade dinâmica e, então, do Re .

Na Figura 15 está apresentada a análise de agrupamentos hierárquicos por meio de dendrograma, considerando como variáveis dependentes as combinações de registros e as aberturas avaliadas.

Figura 15 - Dendrograma para análise de Agrupamentos Hierárquicos para os registros estudados e as porcentagens de abertura avaliadas.

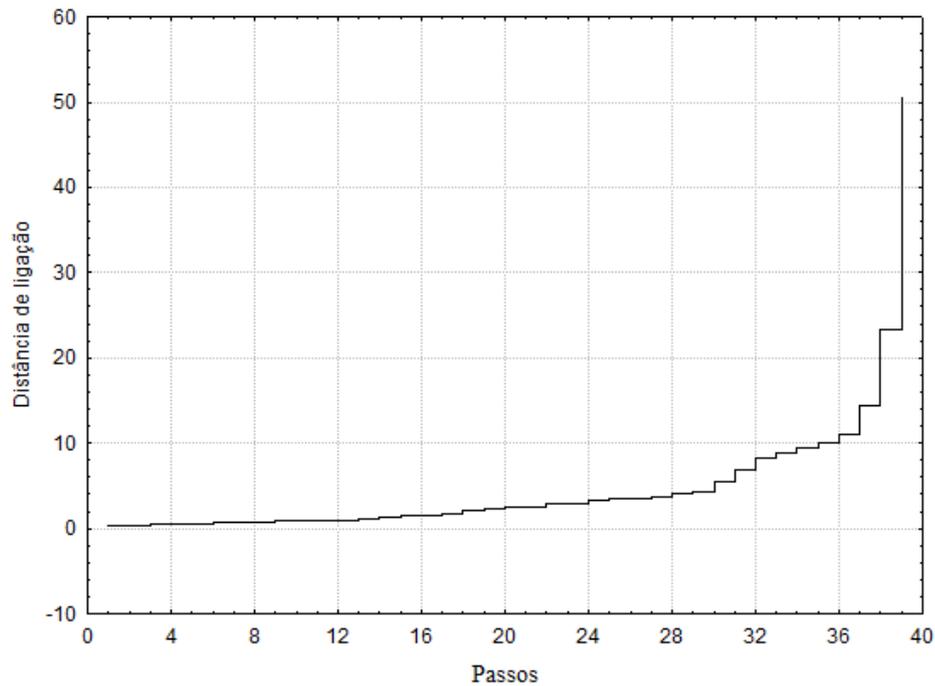


Fonte: Da autora (2022).

Para formação do agrupamento foi realizado um corte no dendrograma, aberturas em função da variância entre combinações dos registros estudados e diferentes aberturas destes.

Tal corte foi feita nessa altura com a finalidade de que os grupos formados apresentassem a maior similaridade interna, visto que, com o aumento da distância de ligação, essa semelhança diminui e a distância para a formação de novos grupos aumenta, como pode ser visto na Figura 16, que apresenta as distâncias de ligação em cada passo do processo de almagamação, e que então, evidenciam a formação de três grupos (FIGURA 16).

Figura 16 - Distância Euclidiana em cada um dos passos do processo de almagamação da análise de grupamento hierárquico das combinações entre registros e aberturas estudadas.



Fonte: Da autora (2022).

O primeiro grupo é formado pelos casos C25, E25, F25, G25 e H25, ou seja, todos com abertura de 25%. Entre estes, C, E e G tem o diâmetro de $\frac{1}{2}$ ", enquanto H e F possuem diâmetro de $\frac{3}{4}$ ". Este grupo possui como particularidade altos valores de perda de carga localizada (hfL), coeficiente K e comprimento equivalente (Leq), o que pode ser atribuído, notadamente, pela pequena abertura dos registros.

O segundo grupo é formado pelos casos C50, D25, E50, I25, I50, I75, I100, J25 e J75, sendo então formado por tratamentos com diferentes diâmetros e aberturas, porém, com predominância de tratamentos com registros de pressão, mesmo com abertura de 100%, o que indica uma similaridade de comportamento das variáveis hidráulicas devido à geometria e forma de construção dos registros e consequência destes sobre as variáveis relacionadas à perda de carga localizada.

Nesse agrupamento observa-se que os registros I25, C50, E50, I50 e J75 apresentam os maiores valores de perda de carga localizada, coeficiente K e comprimento equivalente, observa-se que há uma similaridade nos valores destas variáveis nessas aberturas.

O terceiro grupo, maior, é composto por A100, A75, A50, A25, B100, B75, B50, B25, C100, C75, D100, D75, D50, E100, E75, F100, F75, F50, G100, G75, G50, H100, H75, H50, J100, J50, com predominância de casos em que se tinham as maiores aberturas, ou mesmo os tratamentos que em que não se observaram perdas de carga e coeficientes K e Leq expressivos, mesmo em menores porcentagens de abertura.

Foram ajustados modelos matemáticos para estimativa da perda de carga localizada (hf_L), K e Leq , em função da variável hidráulica independente “v” (TABELA 6). Para esta tabela, quando não se obteve ajuste significativo a 5% de probabilidade estatística pelo teste F, dos modelos avaliados aos dados observados as variáveis dependentes hf_L , K e Leq foram caracterizadas por sua média e desvio padrão.

Tabela 6 - Equações de perda de carga localizada, coeficiente de perda de carga e comprimento equivalente em função da velocidade de escoamento para os registros avaliados (continua).

Registros	Hfl	K	Leq
A-100%	0,142 ± 0,157	$K = 1,8811 \times v^{-0,7678}$ $R^2 = 0,3834$	$Leq = 1,0831 \times v^{-0,5882}$ $R^2 = 0,1982$
B-100%	$hfl = 0,1041 \times v^{1,3187}$ $R^2 = 0,9256$	$K = 24,1446 - 50,1848 \times v + 26,4434 \times v^2$ $R^2 = 0,4284$	$Leq = 11,939 - 23,1282 \times v + 12,1639 \times v^2$ $R^2 = 0,3845$
C-100%	$hfl = 0,8271 - 1,2441 \times v + 0,5539 \times v^2$ $R^2 = 0,2595$	$K = 7,2844 \times v^{-2,1426}$ $R^2 = 0,9975$	$Leq = 3,6185 \times v^{-1,851}$ $R^2 = 0,9905$
D-100%	$hfl = 0,1323 - 0,3409 \times v + 0,2278 \times v^2$ $R^2 = 0,6946$	$K = 0,4984 \times v^{-2,6458}$ $R^2 = 0,9971$	$Leq = 0,4274 \times v^{-2,3564}$ $R^2 = 0,9943$
E-100%	0,075 ± 0,027	$K = 1,3969 \times v^{-2,1166}$ $R^2 = 0,9937$	$Leq = 0,8098 \times v^{-1,9010}$ $R^2 = 0,9930$
F-100%	$hfl = 0,0674 - 0,1878 \times v + 0,1505 \times v^2$ $R^2 = 0,3860$	$K = 0,6145 \times v^{-2,0220}$ $R^2 = 0,9790$	$Leq = 0,5402 \times v^{-1,7123}$ $R^2 = 0,9602$
G-100%	0,090 ± 0,043	$K = 12,950816,6708 \times v + 5,4035 \times v^2$ $R^2 = 0,8133$	$Leq = 6,1337 - 7,6609 \times v + 2,4592 \times v^2$ $R^2 = 0,8009$
H-100%	$hfl = 0,0950 - 0,2439 \times v + 0,1779 \times v^2$ $R^2 = 0,2840$	$K = 0,6329 \times v^{-2,3526}$ $R^2 = 0,9995$	$Leq = 0,5646 \times v^{-2,0430}$ $R^2 = 0,9986$
I-100%	$hfl = 4,2449 \times v^{2,1011}$ $R^2 = 0,9527$	84,657 ± 5,360	48,139 ± 4,010
J-100%	$hfl = 1,9724 \times v^{2,0667}$ $R^2 = 0,9969$	$K = 15,5025 + 52,7363 \times v - 29,3243 \times v^2$ $R^2 = 0,8867$	$Leq = 4,1364 + 54,6364 \times v - 25,6873 \times v^2$ $R^2 = 0,9718$
A-75%	$hfl = v + 0,0486 \times v^2$ $R^2 = 0,0503$	$K = 2,2091 \times v^{-1,4785}$ $R^2 = 0,9873$	$Leq = 1,2806 \times v^{-1,2464}$ $R^2 = 0,9708$
B-75%	$hfl = 0,0605 \times v^{6,0366}$ $R^2 = 0,9200$	$K = 2,2421 \times v^{-1,0877}$ $R^2 = 0,3952$	$Leq = 14,1490 - 32,4000 \times v + 18,7767 \times v^2$ $R^2 = 0,3713$
C-75%	$hfl = 1,9896 \times v^{1,8179}$ $R^2 = 0,9915$	$K = 41,3038 \times v^{-0,3765}$ $R^2 = 0,9724$	$Leq = 23,6743 \times v^{-0,1750}$ $R^2 = 0,8790$
D-75%	$hfl = 0,2283 \times v^{1,8867}$ $R^2 = 0,9345$	$K = 4,5673 \times v^{-0,3509}$ $R^2 = 0,6855$	$Leq = 5,601 - 6,1549 \times v + 3,9703 \times v^2$ $R^2 = 0,2722$
E-75%	$hfl = 0,0939 \times v^{1,8647}$ $R^2 = 0,8660$	$K = 2,6603 \times v^{-0,8819}$ $R^2 = 0,8031$	$Leq = 1,5105 \times v^{-0,6579}$ $R^2 = 0,7461$
F-75%	$hfl = 0,2932 \times v - 0,1781 \times v^2$ $R^2 = 0,1308$	$K = 2,2744 \times v^{-1,3628}$ $R^2 = 0,8791$	$Leq = 11,0846 - 14,2773 \times v + 4,7934 \times v^2$ $R^2 = 0,9487$

Tabela 6 - Equações de perda de carga localizada, coeficiente de perda de carga e comprimento equivalente em função da velocidade de escoamento para os registros avaliados. (continua)

Registros	Hfl	K	Leq
G-75%	$hfl = 0,1214 \times v^{1,2217}$ $R^2 = 0,9146$	$K = 27,6164 - 36,8442 \times v + 12,3758 \times v^2$ $R^2 = 0,9528$	$Leq = 11,0846 - 14,2773 \times v + 4,7934 \times v^2$ $R^2 = 0,9487$
H-75%	$hfl = 0,5506 \times v^{2,1776}$ $R^2 = 0,9967$	$K = 11,2162 \times v^{-0,2622}$ $R^2 = 0,1536$	$9,500 \pm 2,389$
I-75%	$hfl = 4,3541 \times v^{1,9800}$ $R^2 = 0,9987$	$K = 73,7386 + 26,4340 \times v - 14,4153 \times v^2$ $R^2 = 0,6940$	$Leq = 153,9220 \times v - 103,0590 \times v^2$ $R^2 = 0,2842$
J-75%	$hfl = 2,3692 \times v^{2,0115}$ $R^2 = 0,9949$	$K = 168,3046 - 317,1117 \times v + 195,6173 \times v^2$ $R^2 = 0,9738$	$Leq = 9,7349 + 37,7092 \times v - 26,224 \times v^2$ $R^2 = 0,2942$
A-50%	$hfl = 0,5459 \times v^{2,6500}$ $R^2 = 0,9671$	$K = 11,7765 - 12,7266 \times v + 9,0548 \times v^2$ $R^2 = 0,7068$	$Leq = 5,1514 - 5,4795 \times v + 4,9355 \times v^2$ $R^2 = 0,8138$
B-50%	$hfl = 0,0953 \times v + 0,3307 \times v^2$ $R^2 = 0,9921$	$K = 8,3779 \times v^{0,2352}$ $R^2 = 0,2768$	$7,133 \pm 1,019$
C-50%	$hfl = 10,0685 \times v^{1,9491}$ $R^2 = 0,9971$	$K = 160,2000 \times v^{0,0834}$ $R^2 = 0,6921$	$Leq = 114,1237 \times v^{0,1391}$ $R^2 = 0,8518$
D-50%	$hfl = 0,6128 \times v^{2,2351}$ $R^2 = 0,9924$	$K = 11,8819 \times v^{0,3587}$ $R^2 = 0,9404$	$Leq = 9,9601 \times v^{0,6105}$ $R^2 = 0,9707$
E-50%	$hfl = 4,2471 \times v^{2,0388}$ $R^2 = 0,9935$	$K = -25,5957 + 233,8801 \times v - 121,5183 \times v^2$ $R^2 = 0,8133$	$Leq = -12,3059 + 103,7448 \times v - 45,0409 \times v^2$ $R^2 = 0,8476$
F-50%	$hfl = 1,4205 \times v^{2,1267}$ $R^2 = 0,9973$	$K = 27,6362 \times v^{0,4448}$ $R^2 = 0,7163$	$Leq = 23,2644 \times v^{0,6429}$ $R^2 = 0,8743$
G-50%	$hfl = 2,6404 \times v^{2,0924}$ $R^2 = 0,9991$	$K = 51,8582 \times v^{0,0847}$ $R^2 = 0,8546$	$Leq = 29,6867 \times v^{0,2817}$ $R^2 = 0,9830$
H-50%	$hfl = 3,2005 \times v^{2,0466}$ $R^2 = 0,9980$	$K = 64,5392 \times v^{0,5928}$ $R^2 = 0,8489$	$Leq = 54,3761 \times v^{0,7471}$ $R^2 = 0,9148$
I-50%	$hfl = 4,2999 \times v^{1,9914}$ $R^2 = 0,9965$	$K = 51,1383 + 70,5453 \times v - 36,3578 \times v^2$ $R^2 = 0,9183$	$Leq = 59,8287 \times v + -25,3555 \times v^2$ $R^2 = 0,4914$
J-50%	$hfl = 3,6415 \times v^{2,1206}$ $R^2 = 0,9950$	$69,631 \pm 5,176$	$Leq = 18,3527 + 70,5859 \times v - 29,2795 \times v^2$ $R^2 = 0,9136$
A-25%	$hfl = 1,9132 \times v^{1,9958}$ $R^2 = 0,9954$	$K = 35,3701 \times v^{0,1824}$ $R^2 = 0,8180$	$Leq = 20,2934 \times v^{0,3658}$ $R^2 = 0,9282$

Tabela 6 - Equações de perda de carga localizada, coeficiente de perda de carga e comprimento equivalente em função da velocidade de escoamento para os registros avaliados (conclusão).

Registros	Hfl	K	Leq
B-25%	$hfl = 1,8277 \times v^{2,2664}$ $R^2 = 0,9929$	$K = 0 + 72,2653 \times v - 36,1007 \times v^2$ $R^2 = 0,8385$	$Leq = 43,2623 \times v - 16,9611 \times v^2$ $R^2 = 0,9194$
C-25%	$hfl = 104,5227 \times v^{1,6291}$ $R^2 = 0,9510$	$K = -7090,7528 + 110224,245 \times v - 276101,180 \times v^2$ $R^2 = 0,7050$	$Leq = -2748,6617 + 40783,8603 \times v - 97397,8917 \times v^2$ $R^2 = 0,3303$
D-25%	$hfl = 8,3126 \times v^{2,0165}$ $R^2 = 0,9984$	$K = 126,1650 + 106,6491 \times v - 76,9775 \times v^2$ $R^2 = 0,8798$	$Leq = 39,0461 + 228,3746 \times v - 152,2065 \times v^2$ $R^2 = 0,8476$
E-25%	$hfl = -157,1777 + 1831,6181 \times v - 4988,8510 \times v^2$ $R^2 = 0,6808$	$K = -62895,7816 + 799363,7187 \times v - 2306119,0386 \times v^2$ $R^2 = 0,7940$	$Leq = -26275,596 + 326541,5024 \times v - 929969,0172 \times v^2$ $R^2 = 0,7473$
F-25%	$hfl = \times v + 113,3280 \times v^2$ $R^2 = 0,9149$	$K = -5997,1516 + 70359,6447 \times v - 144675,9227 \times v^2$ $R^2 = 0,6548$	$Leq = -3921,6409 + 43480,8038 \times v - 86763,2425 \times v^2$ $R^2 = 0,7754$
G-25%	$hfl = -17,6277 + 181,4126 \times v - 293,7114 \times v^2$ $R^2 = 0,9953$	$K = 26584,8462 \times v - 62176,6481 \times v^2$ $R^2 = 0,9214$	$Leq = 10049,1217 \times v - 22761,1824 \times v^2$ $R^2 = 0,0452$
H-25%	$hfl = \times v + 61,4422 \times v^2$ $R^2 = 0,8468$	$K = 792,4322 \times v^{-0,4417}$ $R^2 = 0,1009$	$814,93 \pm 270,01$
I-25%	$hfl = 18,9073 \times v^{1,0463}$ $R^2 = 0,9954$	$K = 2619,4659 - 6024,8204 \times v + 4454,0355 \times v^2$ $R^2 = 0,9980$	$Leq = 938,9219 - 1675,8619 \times v + 1039,9118 \times v^2$ $R^2 = 0,9963$
J-25%	$hfl = 12,1321 \times v^{2,0905}$ $R^2 = 0,9932$	$K = 111,9354 + 368,6302 \times v - 283,2475 \times v^2$ $R^2 = 0,8966$	$Leq = 30,9927 + 379,6269 \times v - 240,1151 \times v^2$ $R^2 = 0,9680$

Fonte: Da autora (2022).

Para a abertura de 100%, os registros B, I e J apresentam um ajuste de equações do tipo potenciais com coeficientes de determinação (R^2) acima de 0,9256. Para os registros C, D, F e H os melhores ajustes foram modelos quadráticos com R^2 baixo, equivalentes a 0,2595; 0,696; 0,386 e 0,284. Desta forma, a variação da hfL a partir da variável v não é bem explicada nos modelos gerados.

Já para a estimativa de K e Leq em função de v , nos registros A, C, D, E, F e H os melhores modelos matemáticos são equações potenciais, com R^2 acima de 0,9790. Por fim, para a modelagem de K e Leq nos registros B, G e J foram definidas equações do tipo quadráticas com baixo R^2 .

Na abertura 75%, os registros B, C, D, E, G, H, I e J apresentaram os melhores ajustes com modelos do tipo potencial e valores de R^2 acima de 0,8660. Porém, para os registros A e F foram determinados modelos quadráticos com R^2 baixo de 0,1308. Desta forma, a variação da hfL a partir da variável v não é bem explicada nos modelos gerados.

Foram obtidos modelos mais precisos para a estimativa de K em função do v para os registros A, C, D, E e F, do tipo potencial com um R^2 acima de 0,9724, porém, para os registros B e H obteve-se modelos potenciais com R^2 baixo. Já para os registros G, I e J foram obtidos modelos quadráticos com R^2 acima 0,9528. Por fim, para a estimativa de Leq os registros B, D, F, G, I e J foram ajustados também modelos quadráticos com um R^2 acima de 0,9487.

Para abertura relativa a 50%, foram gerados modelos potenciais sendo os melhores nos registros A, C, D, E, F, G, H, I e J com R^2 acima de 0,9671 sendo os melhores ajustes (TABELA 6). Porém, o registro B apresentou um ótimo ajuste no modelo quadrático com um coeficiente de determinação R^2 0,9921.

Já na estimativa de K e Leq em função de v , os melhores ajustes de modelos matemáticos foram conseguidos para os registros D, G e H, com modelos potenciais com um R^2 acima de 0,8546 (TABELA 6). Para os registros A, E, I e J foram ajustados modelos quadráticos com R^2 acima de 0,7068.

Na abertura 25%, foram gerados modelos matemáticos tendo os melhores nos registros A, B, C, D, I e J apresentando modelo potencial com R^2 acima de 0,9929. Já os registros E, F, G e H geram modelos quadráticos com R^2 acima de 0,8468.

Para a estimativa de K em função de v , os registros B, C, D, E, F, G, I e J ajustaram os melhores modelos matemáticos quadráticos com R^2 acima de 0,8798, porém, considerando os registros A e H, determinou-se modelos potenciais. Já para o Leq , verificou-se

comportamento semelhante do K sendo que os melhores ajustes foram nos registros B, D, I e J, com modelos quadráticos.

Já na Tabela 7 são apresentados os modelos matemáticos ajustados para a estimativa da perda de carga localizada (hf_L), K e Leq , em função da variável hidráulica independente “ Re ”.

Tabela 7 - Equações de perda de carga localizada, coeficiente de perda de carga e comprimento equivalente em função do Número de Reynolds para os registros avaliados (continua).

Registros	Hfl	K	Leq
A-100%	$hfl = 4,08 \cdot 10^{-5} \times Re - 1,02 \cdot 10^{-9} \times Re^2$ $R^2 = 0,7114$	$K = 4,2311 + 1,0 \cdot 10^{-4} \times Re - 5,65 \cdot 10^{-9} \times Re^2$ $R^2 = 0,9186$	$Leq = 1,2538 + 2,0 \cdot 10^{-4} - 5,592 \cdot 10^{-9} \times Re^2$ $R^2 = 0,9334$
B-100%	$hfl = 2,14 \cdot 10^{-6} \times Re + 8,21 \cdot 10^{-9} \times Re^2$ $R^2 = 0,9286$	$K = 24,5195 - 2,0 \cdot 10^{-3} \times Re + 4,33 \cdot 10^{-8} \times Re^2$ $R^2 = 0,4312$	$Leq = 12,1243 - 9,00 \cdot 10^{-8} \times Re + 2,00 \cdot 10^{-8} \times Re^2$ $R^2 = 0,3875$
C-100%	$hfl = 0,8441 - 7,21 \cdot 10^{-5} \times Re + 1,75 \cdot 10^{-9} \times Re^2$ $R^2 = 0,3719$	$K = 6448247906,8080 \times Re^{-2,1056}$ $R^2 = 0,9971$	$Leq = 189730007,66666 \times Re^{-1,8165}$ $R^2 = 0,9891$
D-100%	$hfl = 0,1257 - 1,572 \cdot 10^{-5} \times Re + 5,184 \cdot 10^{-9} \times Re^2$ $R^2 = 0,7466$	$2,455 \pm 7,143$	$1,487 \pm 3,892$
E-100%	$0,075 \pm 0,027$	$2,613 \pm 8,023$	$1,198 \pm 3,352$
F-100%	$hfl = 0,0646 - 8,838 \times Re + 3,5453 \cdot 10^{-10} \times Re^2$ $R^2 = 0,4522$	$1,570 \pm 3,229$	$1,037 \pm 1,738$
G-100%	$0,090 \pm 0,043$	$K = 12,5519 - 0,0009 \times Re + 1,529 \cdot 10^{-8} \times Re^2$ $R^2 = 0,8186$	$Leq = 5,9873 - 0,0004 \times Re + 7,0986 \cdot 10^{-9} \times Re^2$ $R^2 = 0,4522$
H-100%	$hfl = 0,0934 - 1,098 \cdot 10^{-5} \times Re + 3,732 \cdot 10^{-10} \times Re^2$ $R^2 = 0,2935$	$K = 9021754390,92913 \times Re^{-2,3479}$ $R^2 = 0,9995$	$Leq = 364454829,1396 \times Re^{-2,0367}$ $R^2 = 0,9985$
I-100%	$hfl = 1,5828 \cdot 10^{-8} \times Re^2$ $R^2 = 0,9520$	$84,657 \pm 5,360$	$48,139 \pm 4,010$
J-100%	$1,844 \pm 0,588$	$K = 15,5025 + 0,0022 \times Re - 5,228 \cdot 10^8 \times Re^2$ $R^2 = 0,8867$	$Leq = 4,1364 + 0,0023 \times Re - 4,580 \cdot 10^{-8} \times Re^2$ $R^2 = 0,9718$
A-75%	$hfl = 1,752 \cdot 10^{-5} \times Re - 3,570 \cdot 10^{-10} \times Re^2$ $R^2 = 0,2242$	$K = 1857051,8310 \times Re^{-1,3950}$ $R^2 = 0,9864$	$Leq = 9,9824 - 0,0007 + 1,095 \cdot 10^{-8} \times Re^2$ $R^2 = 0,8799$
B-75%	$hfl = 2,0746 \cdot 10^{-10} \times Re^2$ $R^2 = 0,8040$	$3,401 \pm 7,612$	$Leq = 13,8744 - 0,0013 \times Re + 3,3173 \cdot 10^{-8} \times Re^2$ $R^2 = 0,3675$
C-75%	$hfl = 3,0765 \cdot 10^{-5} \times Re + 4,674 \cdot 10^{-9} \times Re^2$ $R^2 = 0,9913$	$K = 1561,9234 \times Re^{0,3714}$ $R^2 = 0,9716$	$Leq = 128,1913 \times Re^{0,1727}$ $R^2 = 0,8808$
D-75%	$hfl = 3,8089 \cdot 10^{-10} \times Re^2$ $R^2 = 0,9353$	$K = 122,3188 \times Re^{0,3260}$ $R^2 = 0,7133$	$Leq = 5,5968 - 0,0003 \times Re + 7,4622 \cdot 10^{-9} \times Re^2$ $R^2 = 0,3760$

Tabela 7 - Equações de perda de carga localizada, coeficiente de perda de carga e comprimento equivalente em função do Número de Reynolds para os registros avaliados (continua).

Registros	Hfl	K	Leq
E-75%	$0,244 \pm 0,087$	$K = 8999,3131 \times Re^{0,8302}$ $R^2 = 0,8302$	$Leq = 659.9266 \times Re^{0,6212}$ $R^2 = 0,7518$
F-75%	$hfl = 1,085.10^{-5} \times Re$ $- 2,6476.10^{-10} \times Re^2$ $R^2 = 0,0710$	$hfl = 44,9575 - 0,0036 \times Re$ $- 7,1506.10^{-8} \times Re^2$ $R^2 = 0,8932$	$Leq = 20,5185 - 0,0015 \times Re$ $+ 2,7038.10^{-8} \times Re^2$ $R^2 = 0,8629$
G-75%	$hfl = 4,5346.10^{-6} \times Re$ $+ 8,7873.10^{-11} \times Re^2$ $R^2 = 0,9226$	$K = 27,0013 - 0,0019 \times Re$ $+ 3,5367.10^{-8} \times Re^2$ $R^2 = 0,9552$	$Leq = 10,8506 - 0,0008 \times Re$ $+ 1,3720.10^{-8} \times Re^2$ $R^2 = 0,9515$
B-50%	$hfl = 3,9271.10^{-6} \times Re$ $+ 5,6519.10^{-10} \times Re^2$ $R^2 = 0,9914$	$K = 87,7050 \times Re^{0,2327}$ $R^2 = 0,2768$	$7,133 \pm 1,019$
H-75%	$hfl = 9,7649.10^{-10} \times Re^2$ $R^2 = 0,9906$	$11,503 \pm 5,027$	$9,500 \pm 2,389$
I-75%	$hfl = 1,6414.10^{-8} \times Re^2$ $R^2 = 0,9634$	$K = 74,8811 + 0,0014 \times Re$ $+ 4,4830.10^{-8} \times Re^2$ $R^2 = 0,6753$	$Leq = 0,0097 \times Re - 4,0462.10^{-7} \times Re^2$ $R^2 = 0,4722$
J-75%	$hfl = 0,2785 - 0,0004 \times Re$ $+ 6,0887.10^{-7} \times Re^2$ $R^2 = 0,9980$	$K = 168,3046 - 0,1436 \times Re$ $+ 4,0103.10^5 \times Re^2$ $R^2 = 0,9738$	$Leq = 9,7349 + 0,0171 \times Re$ $- 5,3761.10^{-6} \times Re^2$ $R^2 = 0,2942$
A-50%	$hfl = 2,528.10^{-9} \times Re^2$ $R^2 = 0,9323$	$K = 0,0009 \times Re - 1,2475.10^{-8} \times Re^2$ $R^2 = 0,4443$	$Leq = 0,5402 \times Re^{-1,7123}$ $R^2 = 0,9602$
B-50%	$hfl = 3,9271.10^{-6} \times Re$ $+ 5,6519.10^{-10} \times Re^2$ $R^2 = 0,9914$	$K = 87,7050 \times Re^{0,2327}$ $R^2 = 0,2768$	$7,133 \pm 1,019$
C-50%	$hfl = 4,9975.10^{-8} \times Re^{-1,9491}$ $R^2 = 0,9971$	$K = 444,8293 \times Re^{0,0834}$ $R^2 = 0,6921$	$Leq = 29,1626 \times Re^{0,1391}$ $R^2 = 0,8518$
D-50%	$hfl = 1,1896.10^{-9} \times Re^2$ $R^2 = 0,9885$	$K = 0,3964 \times Re^{0,3388}$ $R^2 = 0,9402$	$Leq = 0,0300 \times Re^{0,5783}$ $R^2 = 0,9710$

Tabela 7 - Equações de perda de carga localizada, coeficiente de perda de carga e comprimento equivalente em função do número de Reynolds para os registros avaliados (conclusão).

Registros	Hfl	K	Leq
E-50%	$hfl = 5,6397 - 0,0008 \times Re + 3,9298.10^{-8} \times Re^2$ $R^2 = 0,5264$	$K = 41,0381 \times Re^{0,0715}$ $R^2 = 0,9402$	$Leq = 11,4245 \times Re^{0,1469}$ $R^2 = 0,3221$
F-50%	$hfl = -6,951.10^{-67} \times Re + 2,9551.10^{-9} \times Re^2$ $R^2 = 0,9976$	$K = 0,0026 \times Re - 6,0279.10^{-8} \times Re^2$ $R^2 = 0,8052$	$Leq = 0,0017 \times Re + 3,1307.10^{-8} \times Re^2$ $R^2 = 0,9106$
G-50%	$hfl = 8,4735.10^{-9} \times Re^2$ $R^2 = 0,9928$	$K = 22,3447 \times v^{0,0859}$ $R^2 = 0,8493$	$Leq = 15,4601 + 0,0011 \times Re + 1,8300.10^{-8} \times Re^2$ $R^2 = 0,9826$
H-50%	$hfl = 3,5694.10^{-9} \times Re^{2,0466}$ $R^2 = 0,9980$	$K = 0,0059 \times Re - 1,3991.10^{-7} \times Re^2$ $R^2 = 0,9388$	$Leq = 0,0040 \times Re - 7,2929.10^8 \times Re^2$ $R^2 = 0,9504$
I-50%	$hfl = 1,4215.10^{-6} \times Re^2$ $R^2 = 0,9965$	$K = 51,1383 + 0,0406 \times Re - 1,2033.10^{-5} \times Re^2$ $R^2 = 0,9183$	$Leq = 0,0344 \times Re - 8,3918.10^{-6} \times Re^2$ $R^2 = 0,4914$
J-50%	$hfl = 7,0672.10^{-9} \times Re^2$ $R^2 = 0,9944$	69,631 ± 5,176	$Leq = 18,3527 + 0,0031 \times Re - 5,7283.10^{-8} \times Re^2$ $R^2 = 0,9136$
A-25%	$hfl = 5,9527.10^{-9} \times Re^2$ $R^2 = 0,9895$	$K = 5,3757 \times Re^{0,1921}$ $R^2 = 0,8406$	$Leq = 0,4613 \times Re^{0,3857}$ $R^2 = 0,9451$
B-25%	$hfl = 3,5507.10^{-9} \times Re^2$ $R^2 = 0,9836$	$K = 0,0032 \times Re - 6,8794.10^{-8} \times Re^2$ $R^2 = 0,8374$	$Leq = 0,0020 \times Re + 3,0671.10^{-8} \times Re^2$ $R^2 = 0,9203$
C-25%	$hfl = 0,0018 \times Re + 1,5775.10^{-7} \times Re^2$ $R^2 = 0,8450$	$K = 38598,8996 \times Re^{-0,2894}$ $R^2 = 0,5696$	$Leq = 0,8280 \times Re - 0,0001 \times Re^2$ $R^2 = 0,1909$
E-25%	$hfl = -54,8155 - 0,0415 \times Re - 6,6226.10^{-6} \times Re^2$ $R^2 = 0,1991$	$K = 4,5346 \times Re - 0,0009 \times Re^2$ $R^2 = 0,0768$	$Leq = 1,5329 \times Re - 0,0003 \times Re^2$ $R^2 = 0,0283$
F-25%	$hfl = 2,1158.10^{-7} \times Re^2$ $R^2 = 0,9149$	$K = -5997,1514 + 3,0401 \times Re + -0,0003 \times Re^2$ $R^2 = 0,6548$	$Leq = 0,2832 \times Re + 1,1534.10^{-5} \times Re^2$ $R^2 = 0,6838$
G-25%	$hfl = 11,1046 - 0,0036 \times Re + 6,7994.10^{-7} \times Re^2$ $R^2 = 0,4692$	$K = 2406,3181 + 0,3087 \times Re - 5,5215.10^{-5} \times Re^2$ $R^2 = 0,3858$	$Leq = 82,0966 + 0,5142 \times Re - 6,007.10^{-5} \times Re^2$ $R^2 = 0,9771$
H-25%	$hfl = 1,1965.10^{-7} \times Re^2$ $R^2 = 0,8358$	2596,76 ± 151,43	$Leq = 0,3710 \times Re - 3,1982.10^{-5} \times Re^2$ $R^2 = 0,0110$
I-25%	$hfl = 0,0007 \times Re^{1,0463}$ $R^2 = 0,9954$	$K = 2619,4660 - 0,3386 \times Re + 1,4068.10^{-5} \times Re^2$ $R^2 = 0,9980$	$Leq = 938,9219 - 0,0942 \times Re + 3,2845.10^{-6} \times Re^2$ $R^2 = 0,9963$
J-25%	$hfl = 2,3015.10^{-8} \times Re^2$ $R^2 = 0,9929$	$K = 111,9354 + 0,0163 \times Re - 5,541.10^{-7} \times Re^2$ $R^2 = 0,9980$	$Leq = 30,9927 + 0,0168 \times Re - 4,6977.10^{-7} \times Re^2$ $R^2 = 0,9680$

Fonte: Da autora (2022).

Na Tabela 7 observa-se que, na abertura de 100%, os registros A, B, D e I apresentam-se como os melhores dos modelos matemáticos do tipo quadráticos com R^2 acima de 0,7466, conseqüentemente, os registros C, F e H também apresentaram modelos quadráticos com um R^2 baixo de 0,4522.

Já na estimativa de K e Leq em função do Re, foram gerados modelos quadráticos para os registros A, G e J com R^2 acima de 0,9186, sendo que os registros B e G também apresentam o mesmo tipo de modelo com um R^2 baixo. Por fim, nos registros C e H determinou-se modelos potenciais com R^2 acima de 0,9995.

Observa-se ainda que, na abertura relativa 75%, os melhores modelos matemáticos foram os modelos quadráticos nos registros B, C, D, G, H, I e J com R^2 acima 0,9353, sendo que o registro F também obteve um modelo quadrático com R^2 baixo.

Para a estimativa de K em função Re, foram gerados modelos potenciais nos registros A, C e J com R^2 acima de 0,8302; e, para os registros F, G, I e J se obteve modelos quadráticos com R^2 acima de 0,8932. Observa-se ainda que, na estimativa de Leq foram gerados os melhores modelos quadráticos nos registros A, F e G, com R^2 acima de 0,8629, sendo que os registros B, D, I e J também se obteve modelos quadráticos com um R^2 baixo de 0,3675; enquanto nos registros C e E determinou-se modelos potenciais com R^2 acima de 0,7518.

Na abertura relativa 50%, foram gerados modelos matemáticos tendo os melhores ajustes no modelo quadrático nos registros A, B, D, F, G, I e J com R^2 acima de 0,9323, sendo que o registro E obteve o mesmo tipo de modelo quadrático com um R^2 baixo; de 0,5264. Por fim, nos registros C e H determinou-se modelos potenciais com R^2 acima de 0,9971 (TABELA 7).

Para a estimativa de K em função do Re, foram gerados modelos quadráticos nos registros F, H e I como os melhores modelos com R^2 acima 0,8052, sendo que o registro A apresenta o mesmo tipo de modelo, mas com um R^2 baixo; enquanto os registros B, C, D, E e G foram gerados modelos potenciais com R^2 acima 0,8493. Já na estimativa de Leq os registros A, C, D e E apresentam modelos potenciais com R^2 acima de 0,8518 gerando uns bons ajustes nos modelos. Por fim, nos registros F, G, H, I e J foram gerados modelos quadráticos com R^2 acima de 0,9136.

Na abertura relativa a 25%, foram gerados modelos matemáticos nos registros A, B, C, D, F, H e J tendo os modelos quadráticos como os melhores ajustes com R^2 acima 0,8358, os registros E e G também obtiveram modelos quadráticos com um R^2 baixo de 0,4692; enquanto para o registro I foi encontrado um modelo potencial com R^2 de 0,9954.

Já na estimativa do K em função do Re , foram gerados modelos quadráticos nos registros D, F, I e J com R^2 acima de 0,9980 como os melhores modelos, porém os registros E e G, também apresentaram o mesmo tipo de modelo com um R^2 baixo de 0,3858. Para a estimativa do Leq , foram gerados modelos quadráticos nos registros B, D, F, G, H, I e J com R^2 acima de 0,9203, apresentando-se como melhores ajustes nesses modelos gerados, porém, os registros C, E e H tiveram um R^2 baixo, de 0,1909. Por fim, no caso do registro A, o melhor modelo matemático para a estimativa de Leq , foi do tipo potencial com R^2 equivalente 0,9451.

Ao analisar os modelos ajustados, a variável velocidade de escoamento destacou-se como a melhor na estimativa do K e Leq em comparação ao número de Reynolds. Nos Apêndices A e B são apresentados os valores dos parâmetros estatísticos e indicadores de qualidade de ajuste dos modelos apresentados nas Tabelas 6 e 7.

4 CONCLUSÃO

Na estimativa da perda de carga localizada (hfL), do coeficiente K e do comprimento equivalente (Leq) dos registros ensaiados, os maiores valores de hfL, K, Leq foram obtidos para as aberturas 25% devido a menor área de seção transversal disponível ao escoamento e menor velocidade de escoamento. Os menores valores destas variáveis foram determinados para as aberturas de 100% e 75%, sendo que os registros de pressão apresentaram valores altos mesmo para estas aberturas.

Dentre os registros de esfera avaliados, os metálicos possuíam uma construção interna particular, com um anel para assento do elemento controlador do fluxo, o que levou a maior perda de carga em comparação aos demais registros do mesmo tipo, principalmente nas menores aberturas avaliadas, ou seja, de 25% e 50%. Nos registros de gaveta a variação da hfL foi pequena em função da variação da vazão nos ensaios. Já para os registros de pressão foram obtidos valores maiores de perda de carga.

Na análise de correlação, as variáveis hidráulicas vazão máxima e média dos ensaios, foram as que mais se relacionavam com as variáveis hidráulicas relativas à hfL; e apenas a velocidade média dos ensaios, de forma geral, se correlacionou com as variáveis hidráulicas relativas à hfL. Desta forma, concluiu-se também, que as variáveis velocidades máximas e mínimas não se correlacionaram com a hfL, K e Leq. Por outro lado, o Re médio dos ensaios se correlacionou melhor com a hfL, K e Leq.

Ao se analisar os modelos para estimativa das variáveis relativas à perda de carga localizada, a variável independente velocidade de escoamento, de forma geral, apresentou melhor estimativa em comparação ao Número de Reynolds; enquanto este último, quando utilizado como variável independente para estimativa de K e Leq, apresentou maior quantidade de séries amostrais com diferença não significativa entre dados, mais relacionados à abertura de 100%, o que mostra uma estabilidade dos valores destes coeficientes, mesmo com a variação do Número de Reynolds.

Foram verificados três agrupamentos para os registros estudados e, ao analisar a variação entre as combinações das aberturas, juntamente aos valores das variáveis perda de carga localizada, coeficiente K e comprimento equivalente, concluiu-se que o primeiro grupo possuiu altos valores destas variáveis devido a menores aberturas nos registros, porém, no segundo grupo com predominância de tratamentos com registros de pressão, houve uma similaridade nos valores das variáveis hidráulicas devido a geometria e forma de construção

dos registros. Já para o terceiro grupo houve predominância de casos em que se tinham as maiores aberturas.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Instalações hidráulicas prediais- Registro de gaveta - Requisitos e métodos de ensaio**. NBR 15705, 2009.

_____. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Válvulas de esfera- Requisitos**. NBR 14788, 2001.

_____. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Dossiê Técnico. **Registro de Pressão**. 2016.

ALMEIDA, G. M. **Sistemas Hidráulicos Prediais: um novo dimensionamento**. 2019. 179 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

AMANCO WAVIN BRASIL. **Catálogo-Predial-Master-Linha Predial**. 2019. Disponível em: <http://amancowavin.com.br/downloads>. Acesso em: 13 out. 2020.

AMARAL, R. E; AMARAL, R. T. Análise dos fatores que influenciam nas perdas de carga em tubulações e acessórios hidráulicos. *In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA*, 5., 2016, Monte Claros. **Anais [...]**. Montes Claros, 2016.

ANGELO, E.; TEMISTOCLES, L.; CAMPANELLA, L. F.; BARROS, B. Estudo numérico da perda de carga de uma válvula do tipo globo. **Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica**, v. 14, n. 2, p. 41-62, 2010.

AZEVEDO NETO, J. M.; FERNÁNDEZ, M. F. **Manual de Hidráulica**. 9 ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 2015.

BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P.; CIRILO, J. A.; MASCARENHAS, F. C. B. **Hidráulica Aplicada**. 2. ed. Porto Alegre: ABHR, 2014.

BISTAFA, S. R. **Mecânica dos Fluidos: noções e aplicações**. 2. ed. São Paulo. Blücher, 2018.

BRUNETTI, F. **Mecânica dos Fluidos**. 2. ed. rev. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

CARDOSO, G. G. de G. **Índice geométrico na determinação da perda de carga localizada em conexão de emissores tubos de polietileno de pequenos diâmetros**. 2007. 65 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de São Paulo:Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2007.

CARVALHO, J. de A.; OLIVEIRA, L. F. C. **Instalações de Bombeamento para Irrigação**. Lavras: UFLA, 2008. 345 p.: il.

_____. **Instalações de Bombeamento para Irrigação**. Lavras: UFLA, 2014.

CARVALHO JÚNIOR, R. de. **Instalações hidráulicas e o projeto de arquitetura**. 7. ed. São Paulo: Blucher, 2013.

CARDOSO, G. G. DE G.; KLAR, ANTÔNIO E. Índice geométrico e perda de carga localizada em conexões de emissores “online”. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 6, p. 1114-1127, nov./dez. 2014.

CAVALCANTI, R. A.; CRUZ, O. C.; BARRETO, A. C. Determinação da perda de carga em tubo de PVC e comparação nas equações empíricas. *In*: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 5., 2009, Uberaba. **Anais [...]**. Uberaba: IFTM, 2009.

COSTA, R. P. **Estudo do escoamento da válvula de globo utilizando métodos dos volumes finitos**. 2015. Dissertação (Mestrado) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão. São Luis, 2015.

DOCOL. **Catálogo geral**. 2018-2019. Disponível em: <https://m.docol.com.br/pt/produto/hidraulicos/registros?page=3&caracteristicas=uso-publico,tecnologia&local=presidios-delegacias-e-casas-de-recuperacao,estadios-de-futebol,industrias-1>. Acesso em: 10 out. 2020.

GOMES, A. W. A.; FRIZZONE, J. A.; RETTORE NETO, O.; MIRANDA, J. H. Perda de carga localizada em gotejadores integrados em tubo de polietileno 2010. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 3, p. 435-446, maio/jun. 2010.

GOMES, A. A. **Perda de carga localizada em gotejadores integrados em tubo de polietileno**. 2009. 62 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2009.

HAIR JÚNIOR, J. F. *et al.* **Análise multivariada de dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

HAQUE, F.; HAIDER, F.; RAHMAN, A.; ISLAM, Q.; Study of diferente types of valves & Determination of minor head loss various openings of locally available plastic valva. Dhaka, Bangladesh. **Asian congresso of Fluid Mechanic**, p. 17-21, december. 2010.

LIMA, A. V. B. **A Hidrodinâmica para o ensino médio na perspectiva da aprendizagem significativa**. 2019. 76 p. Dissertação (Mestrado em Ensino de Matemática) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

LOESCH, C.; HIELTGEBAUM, M. **Métodos Estatísticos Multivariados**. São Paulo: Saraiva, 2012. *In*: MELO JÚNIOR, J. C. F. DE *et al.* Determinação de regiões homogêneas quanto à distribuição de frequência de chuvas no leste do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 408–416, jun. 2006.

MAUREN ELL, S.; TRABACHINI, A. Perda de carga em condutos forçados. **Revista científica da Faculdade tecnológica de Tatuí**. Tatuí. v. 1, n. 1, jul/dez. 2009.

MOREIRA, M. **A Equação de Bernoulli da Hidráulica**. Agosto, 2007.

MURTAGH, F.; LEGENDRE, P. Ward’s Hierarchical Agglomerative Clustering Method: Which Algorithms Implement Ward’s Criterion? **Journal of Classification**, v. 31, n. 3, p. 274–295, 18 out. 2014.

PORTO, R. D. **Hidráulica Básica**. 4. ed. São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade São Paulo, 2004.

RETTORE NETO, O. **Metodologia para a determinação da perda de carga localizada em emissores não coaxiais integrados a tubos de polietileno**. 2018. 61 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2008.

RETTORE NETO, O.; BOTREL, T. A.; FRIZZONE, J. A.; PINTO, M. F.; CAMARGO, A. P. Quantificação do erro na determinação da Perda de carga contínua de carga em tubos plásticos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 33, n. 6, p. 1312- 1321, nov./dez. 2013.

RETTORE NETO, O.; FRIZZONE, J. A.; MIRANDA, J. H.; BOTREL, T. A. Perda de carga localizada em emissores não coaxiais integrados a tubos de polietileno. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 1, 2009.

SANTOS JUNIOR, R. D dos; JUNHO, A. L; COSTA, T. F; PEREIRA, I.Z; SANTOS, I. F. S. Análise do escoamento e do coeficiente da perda de carga localizada em uma válvula borboleta por meio de modelagem numérica. **PHC. Notícias e SHIP NEWS**, v. 77, n. 2, p. 9-12, abr./jun. 2018.

SEIDEL, E. J. *et al.* Comparação entre o método Ward e o método K-médias no agrupamento de produtores de leite. **Ciência e Natura**, v. 1, n. 30, p. 7–15, 2008.

SILVA, C. K. T; MELLO NASCIMENTO, B; GONSALVES, B. S; SOUZA F. L; MAGIO, G. S. *et al.* Quantificação experimental da perda de carga localizada em acessórios pelo uso de piezômetro. 16º Congresso Nacional de Iniciação Científica. CONIC SEMESP. 2008.

SINGH, K. P. *et al.* Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti River (India) - a case study. **Water Research**, v. 38, n. 18, p. 3980–3992, nov. 2004.

SOUSA, R. **Uso de válvulas redutoras de pressão na otimização de rede setorizada de distribuição de água**. 2017. 70 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, 2017.

TIGRE. **Catálogo Técnico Esgoto**. 2016. Disponível em: <https://www.tigre.com.br/catalogos-tecnicos>. Acesso em: 10 out. 2020.

VICINI, L. *et al.* **Técnicas multivariadas exploratórias: teorias e aplicações no Software Statistica**. Santa Maria, RS: UFSM, 2018.

VIEIRA, S. **Estatística básica**. 2. ed. São Paulo: Cengage, 2018.

WARD, J. H. Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. **Journal of the American Statistical Association**, v. 58, n. 301, p. 236–244, mar. 1963.

WHITE, F. M. **Mecânica dos fluidos**. 8. ed. Porto Alegre: ARTMED, 2018.

ZITTEREL, D. B.; FRIZZONE, J. A.; RETTORE, O.; ULLMANN, M. N. Perda de carga EM microtubos e conetores utilizados em microaspersão. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 4, p. 591- 604 out./dez. 200

APÊNDICES

Apêndice A - Indicadores estatísticos de qualidade do ajuste dos modelos matemáticos para estimativa de hfl, K e Leq em função da velocidade média de escoamento. (continua)

Registro	v x hfl					v x K					v x Leq				
	EAM	REQM	D	C	Erro padrão de estimativa	EAM	REQM	D	C	Erro padrão de estimativa	EAM	REQM	d	C	Erro padrão de estimativa
A-100%	-	-	-	-	-	1.113	1.354	0.708	0.438	30.730	30.730	31.132	0.133	0.059	0.899
B-100%	0.006	0.009	0.980	0.943	0.010	1.403	4.793	0.750	0.491	4.892	0.714	2.429	0.714	0.443	2.479
C-100%	0.113	0.149	0.594	0.302	0.152	0.971	1.169	0.999	0.995	1.185	0.706	0.780	0.997	0.992	0.791
D-100%	0.006	0.291	0.903	0.752	0.009	0.297	0.382	0.999	0.997	0.387	0.225	0.291	0.998	0.995	0.295
E-100%	-	-	-	-	-	0.305	0.631	0.998	0.995	0.639	0.156	0.279	0.998	0.994	0.283
F-100%	0.011	0.017	0.739	0.459	0.015	0.320	0.464	0.994	0.984	0.470	0.236	0.344	0.990	0.970	0.349
G-100%	-	-	-	-	-	0.436	0.858	0.945	0.852	0.876	0.230	0.420	0.941	0.842	0.429
H-100%	0.016	0.019	0.643	0.342	0.020	0.346	0.495	0.999	0.999	0.502	0.276	0.399	0.999	0.998	0.405
I-100%	4.404	4.455	0.400	0.390	0.329	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J-100%	0.021	0.032	0.999	0.997	0.032	0.623	1.140	0.969	0.912	1.164	0.468	0.771	0.992	0.978	0.786
A-75%	0.083	0.114	0.523	0.117	0.089	0.476	0.559	0.996	0.990	0.566	0.296	0.339	0.992	0.977	0.344
B-75%	2.224	2.470	0.056	0.053	0.017	1.100	2.433	0.897	0.564	16.353	0.040	0.040	0.024	2.900	16.353
C-75%	0.066	0.089	0.997	0.993	0.090	1.086	1.483	0.992	0.978	1.504	0.550	0.771	0.966	0.906	0.781
D-75%	0.019	0.025	0.982	0.950	0.025	0.382	0.592	0.907	0.751	0.382	0.331	0.390	0.649	0.338	0.331
E-75%	0.024	0.031	0.965	0.898	0.031	0.465	1.086	0.942	0.845	1.101	0.228	0.457	0.922	0.797	0.463
F-75%	0.022	0.036	0.516	0.186	0.037	1.433	3.227	0.966	0.906	3.270	0.874	1.824	0.947	0.858	1.849
G-75%	0.013	0.017	0.979	0.936	0.017	0.561	0.978	0.987	0.964	0.998	0.228	0.396	0.986	0.961	0.404
H-75%	0.009	0.012	0.999	0.997	0.012	1.346	4.594	0.526	0.206	4.656	-	-	-	-	-
I-75%	0.038	0.052	0.999	0.998	0.053	0.671	0.921	0.902	0.752	0.940	6.385	7.250	0.655	0.333	7.349
J-75%	0.027	0.045	0.998	0.996	0.046	2.113	2.768	0.993	0.980	2.825	1.135	2.246	0.651	0.353	2.294
A-50%	0.081	0.107	0.991	0.975	0.106	0.537	1.824	0.620	0.326	1.849	-	-	-	-	-
B-50%	0.011	0.013	0.997	0.993	0.014	1.100	2.433	0.897	0.564	16.353	0.040	0.040	0.024	2.900	16.353
C-50%	0.082	0.095	0.999	0.997	0.097	2.439	3.127	0.905	0.753	3.169	1.338	1.637	0.958	0.884	1.659
D-50%	0.016	0.020	0.998	0.994	0.020	0.310	0.383	0.984	0.954	0.388	0.269	0.326	0.992	0.977	0.331

Apêndice A - Indicadores estatísticos de qualidade do ajuste dos modelos matemáticos para estimativa de hfL, K e Leq em função da velocidade média de escoamento. (conclusão)

Registro	v x hfL					v x K					v x Leq				
	EAM	REQM	D	C	Erro padrão de estimativa	EAM	REQM	D	C	Erro padrão de estimativa	EAM	REQM	d	C	Erro padrão de estimativa
E-50%	0.092	1.096	0.998	0.995	0.122	2.991	5.758	0.972	0.920	5.877	6.985	7.910	0.905	0.833	4.446
F-50%	0.017	0.0237	0.999	0.997	0.024	1.040	2.240	0.907	0.768	2.270	0.723	1.493	0.964	0.901	1.513
G-50%	0.028	0.036	0.999	0.999	0.037	0.424	0.588	0.959	0.887	0.596	2.250	2.738	0.344	0.327	0.340
H-50%	0.029	0.038	0.999	0.998	0.038	2.649	4.733	0.955	0.880	4.656	1.924	3.284	0.975	0.933	3.329
I-50%	0.068	0.087	0.999	0.997	0.088	0.966	1.276	0.978	0.937	1.302	6.196	6.724	0.777	0.544	6.815
J-50%	1.551	1.606	0.642	0.641	0.063	-	-	-	-	-	1.129	2.167	0.977	0.933	2.212
A-25%	0.053	0.067	0.998	0.996	0.066	0.777	1.070	0.948	0.858	1.053	0.506	0.687	0.981	0.945	0.677
B-25%	0.026	0.048	0.998	0.994	0.049	0.980	2.452	0.956	0.875	2.486	0.762	1.741	0.977	0.937	1.764
C-25%	0.152	0.223	0.987	0.962	0.226	28.421	64.124	0.907	0.761	65.486	12.884	25.768	0.699	0.401	26.313
D-25%	0.040	0.054	0.999	0.994	0.055	1.255	1.752	0.967	0.907	1.788	1.696	2.232	0.991	0.974	2.278
E-25%	0.296	0.474	0.898	0.741	0.484	131.58	217.84	0.9388	0.836	221.773	58.149	91.283	0.921	0.797	92.981
F-25%	0.364	0.557	0.975	0.933	0.560	77.056	118.06	0.890	0.720	47.522	72.615	0.935	0.82	74.135	47.522
G-25%	0.087	0.122	0.998	0.996	0.1247	32.161	42.160	0.978	0.938	42.740	195.22	282.71	0.160	0.034	286.547
H-25%	0.226	0.774	0.962	0.885	0.7796	121.29	500.59	0.354	0.112	507.397	-	-	-	-	-
I-25%	10.109	10.243	0.139	0.139	0.093	5.330	8.450	0.999	0.998	8.627	2.516	3.843	0.999	0.997	3.925
J-25%	7.890	8.028	0.215	0.214	0.130	4.256	5.456	0.972	0.920	5.568	3.233	4.149	0.991	0.975	4.234

Fonte: Da autora (2022).

Apêndice B - Indicadores estatístico de qualidade do ajuste dos modelos matemáticos para estimativa de hfL, K e Leq em função da velocidade média de escoamento. (continua)

Registro	hfL					K					Leq				
	EAM	REQM	D	C	Erro padrão de estimativa	EAM	REQM	D	C	Erro padrão de estimativa	EAM	REQM	d	C	Erro padrão de estimativa
A-100%	0.059	0.083	0.902	0.761	0.0851	0.586	0.694	0.960	0.810	0.5021	0.475	0.521	0.922	0.778	0.260
B-100%	0.006	0.009	0.981	0.945	0.009	2.004	4.891	0.733	0.481	4.880	1.568	2.673	0.664	0.413	2.473
C-100%	0.100	0.137	0.709	0.432	0.140	1.097	1.257	0.999	0.997	1.274	0.769	0.835	0.997	0.991	0.847
D-100%	0.006	0.008	0.923	0.797	0.008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E-100%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F-100%	0.010	0.014	0.784	0.527	0.014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G-100%	-	-	-	-	-	1.021	1.207	0.907	0.821	0.863	0.31	0.468	0.925	0.831	0.422
H-100%	0.016	0.019	0.657	0.356	0.020	4.78×10^{18}	5.0×10^{18}	0	0	0.5131	3.36×10^{13}	3.48	3.08×10^{-14}	$3.30E \times 10^{-14}$	0.4134
I-100%	0.148	0.3271	0.987	0.963	0.329	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J-100%	-	-	-	-	-	0.864	1.296	0.958	0.902	1.164	0.476	0.787	0.992	0.978	0.786
A-75%	0.067	0.080	0.527	0.249	0.081	0.467	0.580	0.996	0.989	0.588	1.526	1.609	0.865	0.812	0.702
B-75%	0.112	0.135	0.528	0.474	0.026	-	-	-	-	-	8.292	9.034	0.169	0.102	2.909
C-75%	0.065	0.090	0.997	0.993	0.091	1.106	1.505	0.992	0.978	1.526	0.547	0.765	0.967	0.907	0.776
D-75%	0.016	0.024	0.983	0.950	0.025	0.379	0.566	0.916	0.774	0.573	0.702	0.794	0.524	0.321	0.369
E-75%	-	-	-	-	-	0.448	1.076	0.944	0.847	1.091	0.222	0.451	0.924	0.801	0.458
F-75%	0.022	0.038	0.464	0.123	0.038	1.612	3.117	0.970	0.916	3.094	17.81	18.245	0.206	0.192	1.627
G-75%	0.012	0.016	0.981	0.942	0.016	1.625	1.760	0.959	0.937	0.971	1.422	1.456	0.866	0.845	0.393
H-75%	0.018	0.020	0.997	0.992	0.021	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
I-75%	0.222	0.278	0.991	0.973	0.280	0.689	0.978	0.894	0.735	0.969	4.810	6.268	0.788	0.542	6.310
J-75%	0.019	0.029	0.999	0.998	0.0291	2.101	2.768	0.993	0.981	2.825	1.176	2.249	0.653	0.354	2.294
A-50%	0.127	0.153	0.982	0.948	0.151	1.348	2.125	0.830	0.553	1.963	8.288	8.501	0.222	0.218	0.349
B-50%	0.011	0.014	0.997	0.993	0.014	0.537	1.824	0.620	0.326	1.849	-	-	-	-	-
C-50%	0.082	0.096	0.999	0.997	0.097	2.440	3.128	0.905	0.753	3.169	1.338	1.637	0.958	0.884	1.659
D-50%	0.020	0.025	0.997	0.991	0.025	0.305	0.383	0.984	0.954	0.389	0.259	0.325	0.992	0.978	0.329
E-50%	0.531	1.029	0.819	0.594	1.049	8.166	17.029	0.356	0.113	17.260	4.552	9.188	0.660	0.374	9.313
F-50%	0.155	0.160	0.971	0.970	0.022	0.925	1.904	0.935	0.839	1.881	1.247	1.612	0.370	0.353	1.276
G-50%	0.077	0.103	0.998	0.994	0.104	0.434	0.599	0.957	0.882	0.971	0.813	0.859	0.125	0.124	0.346
H-50%	0.029	0.038	0.999	0.998	0.038	1.803	3.182	0.979	0.948	3.053	26.327	27.40	0.343	0.335	2.541
I-50%	0.068	0.087	0.999	0.997	0.087	0.970	1.276	0.978	0.937	1.302	6.188	6.724	0.359	0.252	6.815
J-50%	0.043	0.066	0.998	0.998	0.066	-	-	-	-	-	1.351	2.122	0.781	0.747	2.212
A-25%	0.082	0.102	0.997	0.991	0.099	0.717	1.001	0.952	0.873	0.985	0.430	0.597	0.999	0.943	-
B-25%	0.051	0.074	0.995	0.987	0.074	1.588	2.669	0.954	0.873	2.495	14972	15692	0.749	0.719	1.755

Apêndice B - Indicadores estatístico de qualidade do ajuste dos modelos matemáticos para estimativa de hfL, K e Leq em função da velocidade média de escoamento. (conclusão)

Registro	hfL					K					Leq				
	EAM	REQM	D	C	Erro padrão de estimativa	EAM	REQM	D	C	Erro padrão de estimativa	EAM	REQM	d	C	Erro padrão de estimativa
C-25%	0.345	0.439	0.940	0.864	0.402	48.480	77.502	0.809	0.610	78.553	265.47	269.38	0.993	0.434	28.723
D-25%	0.137	0.158	0.996	0.995	0.064	1.486	1.890	0.958	8964	1.826	1.580	2.219	0.999	0.983	2.245
E-25%	0.282	0.761	0.082	0.036	0.766	14262.8	14281.1	0.749	0.207	466.301	187.29	217.34	0.996	0.167	181.085
F-25%	0.364	0.556	0.972	0.929	0.560	1289.5	1316.3	0.742	0.600	120.541	48.895	86.187	0.998	0.826	87.359
G-25%	0.634	1.297	0.720	0.493	1.323	72.041	117.87	0.602	0.373	120.307	32.770	43.781	0.999	0.988	44.684
H-25%	0.269	0.801	0.960	0.877	0.807	-	-	-	-	-	70.683	266.72	70.68	266.72	270.349
I-25%	0.337	0.347	0.985	0.983	0.093	5.317	8.453	0.999	0.998	8.627	2.503	3.848	0.999	0.998	3.925
J-25%	0.103	0.130	0.998	0.994	0.131	4.272	5.456	0.971	0.919	5.568	3.208	4.151	0.999	0.983	4.234

Fonte: Da autora (2022).