

JHONATAN CABRERA PIAZENTIN

**ESTIMATIVA DA PERDA DE CARGA EM TUBULAÇÃO COM MÚLTIPLAS
SAÍDAS EQUIDISTANTES**

Botucatu

2019

JHONATAN CABRERA PIAZENTIN

**ESTIMATIVA DA PERDA DE CARGA EM TUBULAÇÃO COM MÚLTIPLAS
SAÍDAS EQUIDISTANTES**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Irrigação e Drenagem)

Orientador: Prof. Dr. Luís Roberto Almeida Gabriel Filho

Coorientador: Prof. Dr. João Luis Zocoler

Botucatu

2019

P584c

Piazzentin, Jhonatan Cabrera

Estimativa da perda de carga em tubulação com múltiplas saídas equidistantes / Jhonatan Cabrera Piazzentin. -- Botucatu, 2019

69 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu

Orientador: Luís Roberto Almeida Gabriel Filho

Coorientador: João Luis Zocoler

1. Perda de carga em tubulações. 2. Múltiplas saídas equidistantes.
3. Irrigação localizada. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

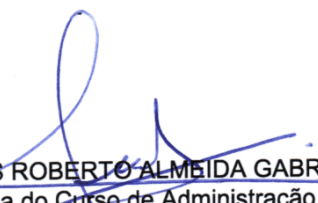
Título: **“ESTIMATIVA DA PERDA DE CARGA EM TUBULAÇÃO COM MÚLTIPLAS SAÍDAS EQUIDISTANTES”**

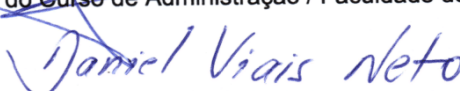
AUTOR: JHONATAN CABRERA PIAZENTIN

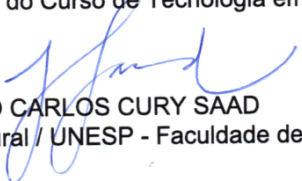
ORIENTADOR: LUÍS ROBERTO ALMEIDA GABRIEL FILHO

COORIENTADOR: JOAO LUIS ZOCOLER

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (IRRIGAÇÃO E DRENAGEM), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. LUÍS ROBERTO ALMEIDA GABRIEL FILHO
Coordenadoria do Curso de Administração / Faculdade de Ciências e Engenharia - FCE - UNESP - Tupã/SP


Prof. Dr. DANIEL DOS SANTOS VIAIS NETO
Coordenadoria do Curso de Tecnologia em Agronegócio / Faculdade de Tecnologia de Presidente Prudente


Prof. Dr. JOÃO CARLOS CURY SAAD
Engenharia Rural / UNESP - Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu

Botucatu, 31 de julho de 2019.

Primeiramente a Deus, aos meus amados pais,
Wagner e Rosana, e irmã Franciele, por existirem
em minha vida, pois sem eles jamais chegaria nesta
etapa da vida.

Dedico

A minha noiva Giovana, pelo apoio incondicional, e que nos
momentos de maior dificuldade esteve ao meu lado para superar
esta batalha.

Ofereço

AGRADECIMENTOS

A Deus primeiramente por permitir viver essa experiência, por guiar meus passos e por estar ao meu lado em todos os momentos de felicidade ou de dificuldade durante toda a minha vida. Agradeço por todas as bênçãos!

Aos meus queridos pais, Vagner e Rosana, pela insubstituível importância em minha vida, não mediram esforços para me apoiarem e nunca desistiram de lutar para que este sonho se tornasse realidade. Muito obrigado pela educação, e por todo ensinamento que transmitiram para mim no decorrer dos momentos da vida. Meu infinito agradecimento.

A minha irmã Franciele que sempre esteve ao meu lado, me suportando e me ajudando nos momentos de maior dificuldade.

A minha noiva Giovana pelo apoio incondicional, e por ser tão especial em minha vida. Nos momentos de tamanha dificuldade me apoiou, mostrando que eu poderia ir além e nunca desistir desta batalha. Seu carinho, amor, companheirismo, apoio, e paciência, sem dúvidas foram a base para a concretização deste sonho.

Ao meu sogro José Carlos, minha sogra Gislaine e meu cunhado Ricardo que no decorrer de toda a fase do mestrado estiveram presentes, e me deram suporte para realização de mais uma etapa da vida.

A minha amada vó Doraci (In Memoriam). Eu pude concretizar um de vossos sonhos. Saiba que nunca esquecerei dos conselhos e puxões de orelha. Que a senhora esteja neste momento comemorando esta vitória.

A toda minha família pelo apoio incondicional. Meus sinceros agradecimentos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Luís Roberto Almeida Gabriel Filho, vulgo (Beto) pela orientação, ensinamentos, dedicação, paciência, incentivo e por todas as lições dadas desde o momento da graduação. Obrigado por acreditar em minha capacidade, e por me guiar na elaboração da dissertação e dos trabalhos científicos. O senhor é um exemplo de pessoa/professor. Meus sinceros agradecimentos.

Ao meu coorientador e amigo Prof. Dr. João Luis Zocoler pela oportunidade de trabalhar junto com o senhor e adquirir conhecimentos cujo os mesmos me guiaram na parte experimental. Minha gratidão pela imensa paciência, orientação e apoio fornecidos para a realização deste trabalho.

Ao meu amigo e Prof. Dr. Tiago Vicentin pela importantíssima contribuição no desenvolvimento do protótipo realizado durante o processo do mestrado, bem como pelos ensinamentos e orientações para o procedimento metodológico mais importante do presente trabalho.

Ao meu amigo e Prof. Dr. Alfredo Bonini por generosamente contribuir com toda sua humildade, orientação e disponibilidade na construção de trabalhos científicos durante o mestrado.

Ao meu amigo Ms. Bruno Góes pela amizade, paciência, companheirismo, incentivo, e convívio durante toda a fase do mestrado, e nas disciplinas cursadas na FCA-UNESP.

Ao meu amigo Dr. Ricardo de Lima Vasconcelos pelo seu companheirismo, e importantíssima e altruísta contribuição em dúvidas pertencentes ao trabalho. Todo o apoio e dicas, foram valiosas para que eu pudesse chegar à finalização deste trabalho.

Ao meu grande amigo Maurílio Usó, pelo companheirismo, honestidade, humildade durante as aulas. Pelas suas experiências, orientações e contribuições durante todo o nosso mestrado. Exemplo nítido de pessoa a ser seguida.

A Faculdade de Ciências Agronômicas FCA-UNESP Campus Botucatu pela base sólida e pela oportunidade em poder realizar este trabalho.

Aos funcionários e docentes da Faculdade de Ciências Agronômicas FCA-UNESP, em especial aos amigos Gilberto, Israel, e Fabiana pelo exemplo de pessoas que são.

Ao CNPQ – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de estudo concedida.

Aos Professores do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agronômicas da FCA-UNESP, pelas disciplinas ministradas que enriqueceram a minha formação.

A todos os meus familiares, amigos, alunos e professores que contribuíram de maneira direta ou indireta para eu chegar até aqui.

“Se você quer ser bem sucedido, precisa ter dedicação total, buscar seu último limite e dar o melhor de si”

Ayrton Senna da Silva

RESUMO

A compreensão sobre as perdas de carga em tubulações e acessórios hidráulicos influencia de forma decisiva o dimensionamento das redes de irrigação, sendo fundamental que sua aferição seja representada/realizada de forma eficiente. Objetivou-se comparar os valores de perda de carga em linha lateral de gotejamento sob sete condições i) estimada pela fórmula de Hazen-Williams trecho a trecho; ii) estimada pela fórmula de Hazen-Williams utilizando o fator de Christiansen; iii) estimada pela fórmula de Flamant trecho a trecho; iv) estimada pela fórmula de Flamant utilizando o fator de Christiansen; v) estimada pela fórmula de Darcy-Weisbach trecho a trecho; vi) estimada pela fórmula de Darcy-Weisbach utilizando o fator de Christiansen; vii) valores observados experimentalmente numa linha de gotejamento, em que se fez presente os 3 regimes de escoamento, ou seja, turbulento, transição e laminar que ocorre sempre no segmento final da linha de gotejadores. O experimento foi conduzido no Laboratório de Ensaios de Equipamentos de Irrigação do Departamento de Engenharia Rural, da Faculdade de Ciências Agrônômicas-FCA Campus de Botucatu. Para aferição das pressões na linha de irrigação foi desenvolvido um dispositivo portátil (Datalogger) capaz de medir e registrar os valores de pressão no início e final da linha, em cada segmento de regime de escoamento (turbulento, transição e laminar). A perda de carga localizada devido a inserção dos gotejadores na tubulação foi avaliada pela diferença entre a perda de carga na tubulação sem e com os gotejadores inseridos, porém estando os mesmos obstruídos. O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado em esquema fatorial 7x4, ou seja, as sete maneiras de estimar ou observar a perda de carga em quatro níveis de pressão (5, 10, 15 e 20 mca – metros de coluna d'água) e 4 repetições. No ensaio de perda de carga sem a inserção dos gotejadores os valores obtidos pelas fórmulas Universal, Hazen-Williams e Flamant subestimaram os valores em relação aos valores observados; No entanto, na presença dos gotejadores vedados, a perda de carga localizada representou uma fração de 31% em relação à total, e quando na presença de gotejadores operando normalmente, houve efeito das interações entre pressões e tratamentos.

Palavras-chave: Perda de carga em tubulações. múltiplas saídas equidistantes. irrigação localizada.

ABSTRACT

Understanding load losses in hydraulic pipes and fittings decisively influences the design of irrigation networks, and it is essential that their measurement be performed efficiently. The objective of this study was to compare the load loss values in the lateral line of drip irrigation under seven conditions (i) estimated by the Hazen-Williams formula; ii) estimated by the Hazen-Williams formula using the Christiansen factor; iii) estimated by the Flamant formula in the following sections; iv) estimated by the Flamant formula using the Christiansen factor; (v) estimated by Darcy-Weisbach's formula; vi) estimated by the Darcy-Weisbach formula using the Christiansen factor; vii) experimentally observed values in a drip line, in which the three flow regimes, ie, turbulent, transition and laminar regimes, which always occur in the final segment of the drip line, were present. The experiment was conducted at the Laboratory of Tests of Irrigation Equipment of the Department of Rural Engineering, Faculty of Agronomic Sciences-FCA Campus de Botucatu. To measure the pressures in the irrigation line, a portable device (Datalogger) was developed able to measure and record the pressure values at the beginning and end of the line, in each segment of flow regime (turbulent, transition and laminar). The localized load loss due to the insertion of the drippers in the pipeline was evaluated by the difference between the loss of load in the piping without and with the inserted drippers, but they were obstructed. The experimental design was completely randomized in a 7x4 factorial scheme, that is, the seven ways of estimating or observing the pressure loss in four pressure levels (5, 10, 15 and 20 mc - meters of water column) and 4 repetitions. In the pressure drop test without dripper insertion, the values obtained by the formulas Universal, Hazen-Williams and Flamant underestimated the values in relation to the observed values; However, in the presence of sealed drippers, localized pressure drop represented a fraction of 31% of the total, and when in the presence of normally operating drippers, there was an effect of interactions between pressures and treatments.

Keywords: Loss of load on pipes. multiple equidistant outputs. localized irrigation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Seção longitudinal com inserção do gotejador “on-line”.....	33
Figura 2 -	Laboratório de Irrigação onde foi desenvolvida a parte experimental.....	34
Figura 3 -	Moto-bombas centrífugas Schneider BCR-2000, manômetro de controle de pressão da saída das bombas, filtro de discos e hidrômetro.....	35
Figura 4 -	Balança de precisão utilizada para determinação do volume de cada trecho.....	36
Figura 5 -	Ferramenta cônica desenvolvida.....	38
Figura 6 -	Paquímetro Digital utilizado nas medições.....	39
Figura 7 -	Posição dos pontos medidos em seção transversal nos tubos emissores.....	39
Figura 8 -	Modelo do gotejador utilizado na parte experimental.....	41
Figura 9 -	Mesa hidráulica utilizada na calibração do protótipo desenvolvido.....	42
Figura 10 -	Valores binários do conversor analógico em função da pressão..	44
Figura 11 -	Hidrômetro utilizado nos ensaios de perda de carga.....	45
Figura 12 -	Curvas de vazão versus perda de carga nos ensaios sem e com os gotejadores inseridos na linha.....	51
Figura 13 -	Erro dos tratamentos da perda de carga total em comparação com tratamento testemunha (observado).....	53
Figura 14 -	Boxplot da perda de carga total em função dos métodos (T1 – perda de carga observada, T2 – perda de carga estimada pela equação universal trecho a trecho, T3 – perda de carga estimada pela equação de Hazen-Williams trecho a trecho, T4 – perda de carga estimada pela equação de Flamant trecho a trecho, T5 – perda de carga pela equação universal aplicando fator de múltiplas saídas de Christiansen, T6 – perda de carga pela equação de Hazen-Williams aplicando fator de múltiplas saídas de Christiansen, T7 – perda de carga pela equação de Flamant aplicando fator de múltiplas saídas de Christiansen e pressões de (5, 10, 15, 20 mca).....	54
Figura 15 -	Erro dos tratamentos da perda de carga em regime de escoamento turbulento em comparação com tratamento testemunha (observado).....	55
Figura 16 -	Boxplot da perda de carga em regime turbulento em função dos métodos (T1 – perda de carga observada, T2 – perda de carga estimada pela equação universal, T3 – perda de carga estimada pela equação de Hazen-Williams, T4 – perda de carga estimada pela equação de Flamant) e para as pressões de (5, 10, 15, 20 mca).....	56
Figura 17 -	Boxplot da perda de carga em regime de transição em função dos métodos (T1 – perda de carga observada pelo protótipo desenvolvido, T2 – perda de carga estimada pela equação	

	universal, T3 – perda de carga estimada pela equação de Hazen-Williams, T4 – perda de carga estimada pela equação de Flamant).....	57
Figura 18 -	Boxplot da perda de carga em regime de escoamento laminar em função dos métodos (T1 – perda de carga observada, T2 – perda de carga estimada pela equação universal em regime laminar, T3 – perda de carga estimada pela equação de Hazen-Williams em regime laminar, T4 – perda de carga estimada pela equação de Flamant).....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Valores da rugosidade absoluta para diferentes tipos de materiais.....	25
Tabela 2 -	Coeficiente C de Hazen-Williams para diferentes materiais.....	28
Tabela 3 -	Coeficiente b de Flamant em função do tipo de material.....	29
Tabela 4 -	Diâmetro interno da tubulação a partir do método do volume.....	38
Tabela 5 -	Diâmetro interno pelo método do paquímetro e cônica desenvolvida.....	40
Tabela 6 -	Valores observados (bits) em função da pressão (mca) utilizados na calibração do protótipo desenvolvido, com coeficientes a e b calculados em cada função linear ($y = ax + b$) entre dois pontos consecutivos.....	43
Tabela 7 -	Ensaio de perda de carga sem inserção dos gotejadores.....	49
Tabela 8 -	Ensaio de perda de carga com gotejadores vedados.....	50
Tabela 9 -	Análise estatística para perda de carga total.....	52
Tabela 10 -	Análise estatística para perda de carga em regime turbulento....	54
Tabela 11 -	Análise estatística para perda de carga em regime de transição.....	56
Tabela 12 -	Erro absoluto de cada tratamento em relação ao T1 (observado) em regime de transição.....	57
Tabela 13 -	Análise estatística para perda de carga em regime de escoamento laminar.....	58
Tabela 14 -	Erro absoluto de cada tratamento em relação ao T1 (observado) em regime de escoamento laminar.....	59
Tabela 15 -	Predição do regime de escoamento do ensaio de perda de carga estimada e observada (Repetição 1 - 20 mca).....	65

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	23
2.1	Fórmula de Darcy-Weisbach para perda de carga em tubulações.....	24
2.2	Fórmula de Hazen-Williams para perda de carga em tubulações.....	27
2.3	Fórmula de Flamant para perda de carga em tubulações.....	28
2.4	Perda de carga em tubulações com múltiplas saídas equidistantes.....	29
2.5	Perda de carga localizada na inserção do gotejador.....	32
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	34
3.1	Equipamentos utilizados nos três ensaios de perda de carga.....	35
3.2	Instrumento eletrônico desenvolvido.....	41
3.3	Ensaio de perda de carga na mangueira de polietileno sem emissores.....	45
3.4	Ensaio de perda de carga na mangueira de polietileno com os gotejadores vedados.....	46
3.5	Ensaio de perda de carga na linha lateral com os gotejadores em operação.....	46
3.6	Delineamento experimental.....	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
4.1	Perda de carga sem gotejadores (mangueira sem o efeito da obstrução parcial da inserção dos gotejadores).....	49
4.2	Perda de carga com os gotejadores vedados (mangueira com o efeito da obstrução parcial da inserção dos gotejadores).....	50
4.3	Perda de carga com os gotejadores em operação – linha lateral completa.....	51
4.4	Perda de carga com os gotejadores em operação – segmento turbulento.....	54
4.5	Perda de carga com os gotejadores em operação – segmento de transição.....	56
4.6	Perda de carga com os gotejadores em operação – segmento laminar.....	57
5	CONCLUSÕES.....	60
	REFERÊNCIAS.....	61
	ANEXO A – Predição do regime de escoamento para a pressão de 20 mca na repetição 1.....	65

1 INTRODUÇÃO

Elevar a produtividade na agricultura, utilizando com maior eficiência os insumos entre os quais a água é um dos desafios da agricultura.

Particularmente, o uso da água para fins de irrigação agrícola deve ser fortemente monitorado, pois envolve grandes áreas e volumes aplicados. No Brasil, há 6,7 milhões de ha (ANA, 2017) sob irrigação nos diversos métodos de aplicação de água, seja por inundação, aspersão, localizada, sulcos e nas diversas culturas, tais como: arroz, feijão, hortaliças, frutas, café e mesmo cana-de-açúcar. Segundo dados da FAO (2013), o Brasil está entre os dez países com o maior potencial de irrigação do mundo. Os líderes mundiais neste contexto são a China e a Índia, com cerca de 70 milhões de hectares (Mha) cada, seguidos dos EUA com 26,7 Mha, do Paquistão com 20,0 Mha e do Irã com 8,7 Mha. O Brasil está no grupo de países que possui uma área entre 4 e 7 Mha, que inclui também Tailândia, México, Indonésia, Turquia, Bangladesh, Vietnã, Uzbequistão, Itália e Espanha.

Para ANA (2017), o potencial de expansão em área pode perfazer conforme estudos conduzidos pela Secretaria de Recursos Hídricos do Ministério do Meio Ambiente no final dos anos 1990, revisados Christofidis (2002) um potencial de desenvolvimento da irrigação de 29,56 milhões de hectares, dos quais cerca de 50% estariam na região Norte. Essa avaliação considerou a aptidão dos solos (classes 1 a 4), a disponibilidade de água e o atendimento à legislação ambiental da época.

Dentre os sistemas de irrigação utilizados na agricultura, o de via gotejamento apresenta grande aplicação, eficiência e seu rendimento pode ser aumentado com a avaliação e redução de fatores que prejudicam a uniformidade de emissão, tais como: oscilações térmicas ao longo da lateral, desnível geométrico, obstrução e variação de vazão de emissores, variação de pressão por perda de carga, entre outros (GOMES et al., 2010).

A perda de carga localizada que é referente à perturbação súbita que o fluido sofre devido a algum elemento inserido no tubo, geralmente é desprezada em tubulações sem emissores, no entanto, mostram-se significativas e de relevante importância para o dimensionamento das linhas laterais, onde estão inseridos os emissores (AL-AMOUD, 1995; RETTORE NETO et al., 2009; GOMES et al., 2010). A desconsideração da perda de carga localizada, resulta em superestimativa do

comprimento máximo da linha lateral em até 27,5 e 9,5% para gotejadores autocompensados e não autocompensados respectivamente (GOMES et al., 2010).

As variações finais podem se tornar maiores ainda, quando se utiliza sistemas de irrigação com múltiplas saídas, pois de acordo com Scaloppi e Allen (1993), o sistema deve apresentar uma vazão uniforme, contudo variável ao longo do comprimento da tubulação.

Diante do exposto, esse trabalho teve como objetivo comparar os valores da perda de carga observados em linha lateral de gotejamento como os estimados pelas fórmulas de Hazen-Williams, Flamant e Darcy-Weisbach, seja pela aplicação trecho a trecho nos intervalos entre gotejadores, ou utilizando o fator de Christiansen (1942). A comparação considerou a linha lateral completa e, também, separadamente para os segmentos turbulento, transição e laminar. Avaliou-se também o efeito da perda de carga localizada devido a inserção dos gotejadores na tubulação em relação à perda de carga total.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Segundo Bernardo, Soares e Mantovani (2009) na irrigação localizada por gotejamento a água é aplicada diretamente no solo, precisamente na região radicular com intensidade mínima, mas com alta frequência, fazendo com que o solo permaneça próximo a capacidade de campo. O uso de gotejadores ou de microaspersores, necessitam de conexões que são introduzidas na linha lateral ocupando uma área interna, fazendo com que haja uma perda de carga localizada (CARDOSO, 2007). A irrigação por gotejamento permite depositar água diretamente na área das raízes nas plantas, e assim torna-se possível o aumento da eficiência do uso das águas (PROVENZANO; PUMO, 2004) melhorando a distribuição de água por toda área irrigada e assim, permitindo representar uma ferramenta importante para a agricultura de precisão (PROVENZANO; PUMO, 2003).

Deve-se ressaltar que o cálculo de perda de carga engloba entre outros fatores: o fator de atrito f , o diâmetro do lateral D , o coeficiente de carga cinética ou resistência de perfil K_L que após sua determinação e avaliação fornecerá um comportamento específico de perda (CASTIBLANCO, 2013).

Considera-se para a avaliação das perdas de energia ao longo das linhas laterais, as perdas de carga contínuas ocorridas nos trechos uniformes da tubulação somadas as perdas de cargas à inserção de cada emissor na linha (PROVENZANO; PUMO; DIDIO, 2005). Em especial a inserção de conectores na linha lateral (derivação) é responsável pelas mudanças na velocidade e direção do fluxo de água, promovendo perdas de cargas no sistema (CASTIBLANCO, 2013).

Ao avaliar as perdas de carga localizada em linhas de derivação na irrigação localizada, foi verificado que este fenômeno é diretamente proporcional a uma potência da velocidade de escoamento e área da protusão do conector e inversamente proporcional a uma potência do diâmetro interno da tubulação (VILAÇA, 2012). O mesmo autor comenta que na passagem direta essa perda é diretamente proporcional a uma potência do diâmetro de saída e do comprimento de conector, da velocidade de escoamento na entrada do conector e do tubo de polietileno.

Quantificação das perdas de cargas localizadas no sistema de irrigação é muito importante para se melhorar a uniformidade de aplicação de água pelo sistema, além da possibilidade de redução nos custos de operação e de aquisição do sistema.

Para tal, é necessário o emprego de equações capazes de dimensionar as perdas de cargas localizadas com elevada precisão, deste modo, refletindo de forma mais real o desempenho do sistema. As equações mais empregadas para a avaliação da perda de carga localizada são Hazen-Williams, Flamant e Darcy-Weisbach.

Contudo, a equação de Darcy-Weisebach exibe melhor exatidão na obtenção da perda de carga, pois considera todos os itens que atuam em determinados fenômenos como o fator de atrito, que depende de diversas características do regime de escoamento e do tipo de tubulação.

2.1 Fórmula de Darcy-Weisbach para perda de carga em tubulações

Uma das expressões mais precisas para determinar a perda de carga em regimes de escoamento é a equação proposta em 1845, conhecida como equação de Darcy-Weisbach.

De acordo com Gomes (1999) a equação Darcy-Weisbach também denominada equação Universal de perda de carga garante maior ajuste aos dados providos da realidade física, e por isso é a equação mais utilizada no meio científico. Tal equação é regida por:

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

onde,

h_f – perda de carga ao longo do comprimento do tubo (*mca*);

f – fator de atrito de Darcy-Weisbach (*adimensional*);

L – comprimento do tubo (*m*);

V – velocidade do líquido no interior do tubo (*m.s⁻¹*);

D – diâmetro interno do tubo (*m*);

g – aceleração da gravidade local (*9,81 m.s⁻²*).

Método de obtenção do fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach

O valor f presente na Equação (1) é determinado a partir do regime de escoamento. Para escoamento de regime laminar onde número de Reynolds ($Re < 2000$) o cálculo do fator de atrito (f) é determinado pela equação de Hagen-Poiseuille

($f = 64 \cdot Re^{-1}$), ou seja, o fator f é determinado em função do número de Reynolds que depende das variáveis: diâmetro do tubo, velocidade de escoamento e viscosidade cinemática que é a razão entre o coeficiente do fluido em determinada temperatura e pressão e massa específica da água. No regime turbulento onde ($Re > 4000$) o fator f é determinado em função da rugosidade relativa (ε/D) das paredes do tubo e do (Re) o que torna a estimativa deste cálculo complexa (ROMEO; ROYO; MONZÓN, 2002; SONNAD; GOUDAR, 2006)

Muitas equações presentes na literatura estimam o valor f presente na Equação (1). Algumas equações requerem técnicas de resolução de equações implícitas como a equação de Colebrook-White (1938) onde é necessário a utilização de um método iterativo para convergência da solução. A partir dos anos 1960 são apresentadas equações explícitas para determinar o valor f . (ALLEN, 1996; MELLO; FERREIRA; CARVALHO, 1999).

Em meio a uma grande gama de equações propostas para determinação de f , existem equações específicas que não dependem apenas do número de Reynolds, mas também da rugosidade do tubo (ε) tais como: Churchill (1973), Swamee (1993), Chen (1979), Barr (1981), Haaland (1983), Robaina (1992), Sousa, Cunha e Marques (1999) como está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores da rugosidade absoluta para diferentes tipos de materiais.

Material	Rugosidade absoluta (ε , mm)
Aço soldado novo	0,05 a 0,10
Aço soldado moderadamente oxidado	0,40
Aço galvanizado sem costura	0,06 a 0,15
Ferro fundido velho	3,00 a 5,00
Ferro fundido novo	0,25 a 0,50
Concreto com acabamento normal	1,00 a 3,00
PVC, plásticos em geral, tubos extrudados	0,0015 a 0,010

Fonte: Adaptado de PORTO, (2006).

A Equação proposta por Swamee (1993) é utilizada para determinar o valor de f (fator de atrito) nos regimes de escoamentos (laminar e turbulento) e é dada por:

$$f = \left(\left(\frac{64}{Re} \right)^8 + 9.5 \left(\ln \left[\left(\frac{\varepsilon}{3,7D} \right) + \left(\frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right] - \left(\frac{2500}{Re} \right)^6 \right)^{-16} \right)^{0.125} \quad (2)$$

onde,

Re – Número de Reynolds (*adimensional*);

ε – rugosidade absoluta (m);
 D – diâmetro (m).

De acordo com a Equação (2) utilizada para determinar o valor do fator de atrito proposta por Swamee, o número de Reynolds pode ser descrito pela seguinte expressão:

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

onde,

Re – Número de Reynolds (*adimensional*);
 V – velocidade da tubulação ($m \cdot s^{-1}$);
 D – diâmetro da tubulação (m);
 ν – viscosidade cinemática ($m^2 \cdot s^{-1}$).

E também, a viscosidade cinemática (ν) presente na Equação (3) pode ser obtida pela seguinte equação:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (4)$$

onde,

ν – viscosidade cinemática ($m^2 \cdot s^{-1}$);
 μ – viscosidade dinâmica ($N \cdot s \cdot m^{-2}$);
 ρ – densidade da água ($kg \cdot m^{-3}$).

E ainda, a densidade da água pode ser obtida pela razão entre a massa e volume, ou seja,

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (5)$$

onde,

m – massa (kg);

V – volume (m^3);

ρ – densidade da água ($kg.m^{-3}$).

Substituindo a Equação (4), (5) em (3) tem-se que:

$$Re = \frac{V.D}{\frac{\mu}{\rho}} \Leftrightarrow Re = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (6)$$

Para melhor efeito de cálculos, substituiu-se a Equação (5) em (2), obtendo a seguinte Equação:

$$f = \left(\left(\frac{64\mu}{\rho VD} \right)^8 + 9.5 \left(\ln \left[\left(\frac{\varepsilon}{3,7.D} \right) + \left(\frac{5,74.(\rho VD)^{0,9}}{\mu^{0,9}} \right) \right] - \left(\frac{2500\mu}{\rho VD} \right)^6 \right)^{-16} \right)^{0.125} \quad (7)$$

A Equação (7) foi substituída na Equação (1), e a partir daí pode-se obter a perda de carga pela equação de Darcy-Weisbach (Fórmula Universal) durante os ensaios descritos no decorrer do trabalho.

2.2 Fórmula de Hazen-Williams para perda de carga em tubulações

A distribuição de água nas grandes cidades até pouco tempo era realizada por meio de tubulações de diversas origens, como: amianto, aço ou ferro fundido, o que resultava em incrustações, reduzindo a vazão e afetando a qualidade do abastecimento urbano. Foi desenvolvido entre os anos de 1902 e 1905 pelos engenheiros civil e sanitaria Allen Hazen e Garden Williams, respectivamente, uma equação que evoluiu o entendimento da dinâmica de fluídos em condutos sobre pressão. Quando se trata do conceito perda de carga em tubulações, tal equação utiliza um coeficiente de atrito “C” adimensional que tende ajustar a estimativa da perda de carga de acordo com tipos de tubulações existentes e vida útil do material. Tal equação é regida por:

$$h_f = 10,6451.L.Q^{1,852}.C^{-1,852}.D^{-4,871} \quad (8)$$

onde,

h_f – perda de carga ao longo do comprimento do tubo (mca);

Q – vazão ($m^3 \cdot s^{-1}$);

L – comprimento do tubo (m);

C – coeficiente de atrito que depende da natureza (material e estado) das paredes dos tubos (*adimensional*);

D – diâmetro interno do tubo (m).

Segundo Porto, (2006) a Equação (8) pode ser utilizada para escoamentos em regime turbulento e transição, em temperatura da água à 20 °C, pois sua equação não leva em consideração a viscosidade em diâmetros que no geral sejam superiores a 4 polegadas, ou seja, superiores a 100 mm. Em relação ao escoamento, a velocidade deve ser inferior à $3,0 m \cdot s^{-1}$.

A Tabela 2 apresenta os valores do coeficiente de atrito C de Hazen-Williams para diferentes materiais.

Tabela 2 - Coeficiente C de Hazen-Williams para diferentes materiais.

Tubos	Novos	Usados (+/-) 10 anos	Usados (+/-) 20 anos
Aço Corrugado (chapa ondulada)	60	x	x
Aço galvanizado roscado	125	100	x
Aço rebitados, novos	110	90	80
Aço soldado comum	125	110	90
Aço soldado com revestimento epóxico	140	130	115
Chumbo	130	120	120
Cimento-amianto	140	130	120
Cobre	140	135	130
Concreto, bom acabamento	130	x	x
Concreto, acabamento comum	130	120	110
Ferro fundido, revestimento epóxico	140	130	120
Ferro fundido, revestimento argamassa	130	120	105
Grés cerâmico, vidrado (manilhas)	110	110	110
Latão	130	130	130
Tijolos, condutos bem executados	100	95	90
Plástico (PVC)	140	135	130

Fonte: AZEVEDO NETO et al., (1998).

2.3 Fórmula de Flamant para perda de carga em tubulações

Inicialmente, a fórmula de Flamant foi testada para tubos de parede lisa de um modo geral e posteriormente notou-se que tal equação se ajustava a tubulações de PVC de diâmetros compreendidos entre o intervalo de 16 a 160 mm e que possuíam

velocidade de escoamento inferiores a 4 m.s^{-1} (CARVALHO; OLIVEIRA, 2014). Tal equação é expressa por:

$$h_f = b \cdot Q^{1,75} \cdot D^{-4,75} \cdot L \quad (9)$$

onde,

h_f – perda de carga ao longo do comprimento do tubo (*mca*);

Q – vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

L – comprimento do tubo (*m*);

D – diâmetro interno do tubo (*m*);

b – coeficiente de atrito (*adimensional*).

A Tabela 3 apresenta os valores coeficiente de atrito de Flamant (*b*) em função da tubulação.

Tabela 3 - Coeficiente b de Flamant em função do tipo de material.

Material	Coeficiente b
PVC	0,000824
Ferro fundido e aços novos	0,001133
Ferro fundido e aços usados	0,0014
Cimento amianto	0,00095
Chumbo	0,0086

Fonte: Adaptado de CARVALHO; OLIVEIRA (2014).

2.4 Perda de carga em tubulações com múltiplas saídas equidistantes

Em 1942 diversos estudos foram desenvolvidos por Christiansen cujas simulações em laboratório puderam prever o comportamento da perda de carga em tubulações com múltiplas saídas equidistantes. Tais simulações foram baseadas em diversas análises com diferentes vazões de 3 a 1000 galões por minuto, bem como com tubulações que variavam de $\frac{3}{4}$ " de polegada até 6 polegadas. Foram utilizadas três equações de perda de carga comumente utilizadas até hoje na literatura, sendo elas Darcy Weisbach (denominada equação Universal), Hazen-Williams descritas nos itens 2.1 e 2.2 deste trabalho, e a equação de Scobey que é dada por:

$$h_f = \frac{K_s L V^{1,9}}{1,000 D^{1,1}} \quad (10)$$

onde,

h_f – perda de carga ao longo do comprimento do tubo (*mca*);

L – comprimento do tubo (*m*);

K_s – coeficiente de atrito (*adimensional*);

D – diâmetro interno do tubo (*m*).

Após diversas simulações feitas para diversos tipos de tubulação, a perda de carga por espaços equidistantes na linha pode ser calculada por um processo passo a passo que está diretamente ligado a variação de vazão em cada gotejador inserido na linha supondo que esta variação é igual a vazão média para todos os gotejadores, ou seja, pode ser expressa pela seguinte relação:

$$q_1 = q_2 = q_3 = q_a = \frac{Q}{N} \quad (11)$$

onde q_1, q_2, q_3 são as vazões no primeiro, segundo e terceiro gotejador respectivamente e q_a a vazão total média dos gotejadores presentes na linha. Note que as igualdades podem ser descritas pela razão entre a vazão total e o número de espaçamento entre os emissores.

Ainda por Christiansen (1942) as Equações (1), (8) e (10) podem ser escritas de forma generalizada como:

$$h_f = \frac{K_1 L V^m}{D^n} \quad (12)$$

Pela equação da continuidade tem-se que:

$$V = \frac{Q}{A} \Rightarrow \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (13)$$

onde,

V – velocidade do escoamento (*m.s⁻¹*);

Q – vazão (*m³.s⁻¹*);

D – diâmetro do tubo (*m*);

A – área da região cilíndrica (*m²*).

Substituindo $K_2 = \frac{4}{\pi}$ na Equação (13) tem-se que:

$$V = \frac{Q}{A} \Rightarrow \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{K_2 Q}{D^2} \quad (14)$$

Elevando ambos lados da Equação (14) por m tem-se que:

$$V^m = \frac{K_2^m Q^m}{D^{2m}} \quad (15)$$

Substituindo a Equação (15) em (12) segue que:

$$h_f = \frac{K_1 L \frac{K_2^m Q^m}{D^{2m}}}{D^n} \Leftrightarrow h_f = \frac{K_1 K_2^m L Q^m}{D^{2m+n}} \Leftrightarrow h_f = \frac{KLQ^m}{D^{2m+n}} \quad (16)$$

Sendo que $K = K_1 K_2^m$, sendo estes coeficientes são constantes determinadas a partir da generalização proposta pela junção das três equações de perda de carga descritas anteriormente.

Para tubulações com múltiplas saídas, a perda total é igual a soma das perdas nos pontos de saídas adjacentes. A igualdade da vazão média em cada saída (q_a) e o espaçamento entre as saídas (S) para as duas últimas saídas na extremidade distal da linha é descrita pelas Equações (17) e (18) respectivamente:

$$h_1 = \frac{KS(1q_a)^m}{D^{2m+n}} \Leftrightarrow h_1 = \frac{KS1^m q_a^m}{D^{2m+n}} \quad (17)$$

$$h_2 = \frac{KS(2q_a)^m}{D^{2m+n}} \Leftrightarrow h_2 = \frac{KS2^m q_a^m}{D^{2m+n}} \quad (18)$$

Consequentemente para N números de espaçamentos tem-se a expressão de forma genérica dada por:

$$h_n = \frac{KS(Nq_a)^m}{D^{2m+n}} \Leftrightarrow h_n = \frac{KSN^m q_a^m}{D^{2m+n}} \quad (19)$$

Sendo assim, Christiansen (1942) notou que a perda de carga total para qualquer número de espaçamentos de saídas adjacentes é dada pelo somatório de cada saída, ou seja,

$$h_f = \sum_{i=1}^N (h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_N) = KSq_a^m \sum (1^m + 2^m + 3^m + \dots + N^m) \quad (20)$$

Substituindo $\frac{L}{N} = S$, $\frac{Q}{N} = q_a$ e $\sum N^m = \sum(1^m + 2^m + 3^m + \dots + N^m)$ na Equação (20) tem-se que:

$$\begin{aligned} h_f &= \frac{K}{D^{2m+n}} \left(\frac{L}{N}\right) \left(\frac{Q}{N}\right)^m \sum N^m \Leftrightarrow h_f = \frac{K}{D^{2m+n}} \left(\frac{L}{N}\right) \left(\frac{Q^m}{N^m}\right) \sum N^m \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow h_f = \frac{\sum N^m}{N^{m+1}} \left(\frac{KLQ^m}{D^{2m+n}}\right) \Leftrightarrow h_f = F \left(\frac{KLQ^m}{D^{2m+n}}\right) \end{aligned} \quad (21)$$

Por fim, tem-se que a perda carga total é resultado das várias saídas das tubulações que ocasionam perdas de cargas em todos os pontos. A partir das generalizações feitas e por outras não mencionadas o processo resultante sobre a diminuição da perda de carga em tubulações com múltiplas saídas equidistantes realizado por Christiansen (1942), é dado pelo fator (F) que pode ser expresso como:

$$F = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2n+1} + \frac{\sqrt{m-1}}{6n^2} \quad (22)$$

onde,

n – número de saídas;

m – expoente da velocidade na equação considerada para o cálculo de h_f .

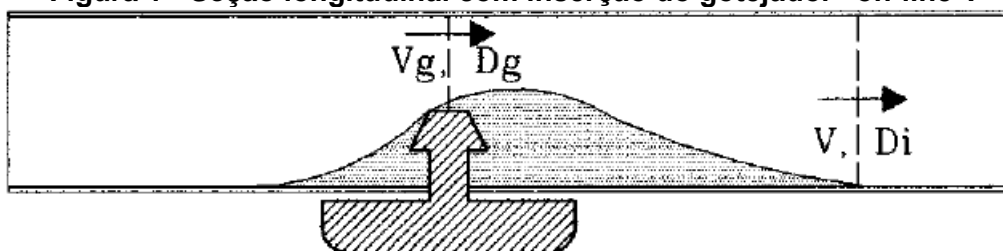
2.5 Perda de carga localizada na inserção do gotejador

Os acessórios presentes nas linhas laterais, fazem com que haja uma alteração da velocidade média do líquido e da pressão localmente envolvida, ocasionando um acréscimo de turbulência que reflete em perdas de carga que devem ser consideradas juntamente com às perdas distribuídas devido ao atrito em todos os trechos da tubulação (LAPERUTA NETO, 2010).

Estas perdas são nomeadas como perdas de carga localizadas ou singulares (PORTO, 2006). Quando é feita a conexão entre o gotejador e o tubo emissor, a passagem sofre um alargamento, redirecionando o trajeto do fluído, e obstruindo a passagem do líquido, totalizando assim em perda de carga localizada (JUANA;

RODRÍGUEZ-SINOBÁS; LOSADA, 2002; PROVENZANO; PUMO, 2003; PROVENZANO; PUMO, 2004; CARDOSO, 2007; YILDIRIM, 2007). A Figura 1 exemplifica a inserção do gotejador na linha, bem como a obstrução da passagem do fluido.

Figura 1 - Seção longitudinal com inserção do gotejador “on-line”.



Fonte: Adaptado de PROVENZANO; PUMO, (2004).

Um as avaliações precisas das perdas ao longo da linha lateral, das perdas ao longo do tubo, bem como devido a inserção dos gotejadores devem ser consideradas (AL-AMOUND, 1995).

As perdas de carga que ocorrem devido as instalações dos gotejadores nas linhas laterais, muitas vezes são desprezadas, ou então são atribuídos valores percentuais médios que se aplicam a perda de carga distribuída (ALVEZ; PORTO, 2002). Tais perdas quando desprezadas podem ocasionar erros evidentes (PROVENZANO; PUMO, 2004).

A determinação precisa das perdas ocorridas na tubulação, bem como nos acessórios que a compõe, são fatores de extrema importância, podendo afetar o balanço hidráulico e custo total do sistema (KAMAND, 1988).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios pertinentes às medições de perda de carga foram conduzidos no Laboratório de Irrigação do Departamento de Engenharia Rural, da Faculdade de Ciências Agrônomicas FCA-UNESP, Campus de Botucatu (Figura 2).

Figura 2 - Laboratório de Irrigação onde foi desenvolvida a parte experimental.



Foto: Jhonatan Cabrera Piazzentin - 2019

Foram realizados, basicamente, três ensaios no laboratório: 1) Ensaio de perda de carga na mangueira de polietileno (linha lateral) sem o emissores inseridos; 2) Ensaio de perda de carga na linha lateral com os gotejadores inseridos, porém, vedando seu orifício de saída, permitindo que a vazão ocorresse somente no final da linha lateral; 3) Ensaio de perda de carga na linha lateral como gotejadores operando normalmente.

Por sua vez, o desenvolvimento de modelos matemáticos bem como as análises estatísticas foram conduzidas no Laboratório de Matemática Aplicada e Computacional (LabMAC) da Faculdade de Ciências e Engenharia FCE – UNESP Campus de Tupã.

3.1 Equipamentos utilizados nos três ensaios de perda de carga

Para os ensaios de perda de carga na mangueira de polietileno (linha lateral), foram utilizadas 2 Moto-Bombas centrífugas da marca Schneider modelo BCR-2000 para pressurização da água durante parte experimental com potência de 1/3' cv (cavalo-vapor), diâmetro da tubulação de sucção e recalque de 3/4' polegadas, diâmetro do rotor de 113 mm, tensão nominal de 127 V, pressão máxima sem vazão de 20 (mca), podendo operar em um intervalo de vazão mínima e máxima de [0,7:3,6] $m^3 \cdot h^{-1}$, ou seja, nas pressões de serviço de 4 à 18 (mca) conforme Figura 3 e um reservatório de água com capacidade total de 300 litros. Foram utilizadas duas bombas associadas em série para permitir a pressão necessária aos ensaios.

Figura 3 - Moto-bombas centrífugas Schneider BCR-2000, manômetro de controle de pressão da saída das bombas, filtro de discos e hidrômetro.



Foto: Jhonatan Cabrera Piazzentin - 2019

Foi utilizado o tubo PELBD da marca NAANDANJAIN (PN-30) com diâmetro nominal (DN) de 16 mm, diâmetro interno de 16 mm e espessura da parede de 0,85 mm com dados fornecidos pelo fabricante do tubo gotejador.

Devido à importância da determinação do diâmetro interno da tubulação (mangueira de polietileno) nos cálculos de perda de carga pelas fórmulas existentes, fez-se necessário proceder uma avaliação criteriosa para sua obtenção, visto que os

valores propostos comercialmente não condizem com os valores aferidos experimentalmente.

Foi estabelecido dois procedimentos metodológicos para a determinação do diâmetro interno. O primeiro procedimento foi dado em função do volume de uma seção da mangueira com formato geométrico cilíndrico. Foram retirados 20 trechos de comprimento de 15 cm da mangueira de polietileno aos quais foram fixados (luvas de látex e elásticos de dinheiro) onde o contato da luva com a base dos trechos retirados não alterasse o resultado final do volume de cada parte. Após isso, foi feita a pesagem e tara em balança de precisão da marca METTLER TOLEDO conforme Figura 4.

Figura 4 - Balança de precisão utilizada para determinação do volume de cada trecho.



Cada trecho em formato cilíndrico foi preenchido com água destilada obtendo assim a massa da água em (gramas). Uma vez conhecida a densidade da água a

temperatura ambiente pode-se determinar o volume, e em virtude disso calculou-se o diâmetro interno pelo seguinte procedimento matemático:

A densidade da água é dada pela Equação (23), ou seja,

$$d = \frac{m}{V} \Leftrightarrow V = \frac{m}{d} \quad (23)$$

onde,

d – densidade ($kg.m^{-3}$);

m – massa (kg);

V – volume (m^3).

O volume de um cilindro (formato da seção da mangueira) é dado pela Equação (24):

$$V = \pi r^2 h \quad (24)$$

Como em uma circunferência o diâmetro (D) é igual a duas vezes o comprimento do raio (r) e igualando-se as Equações (23) e (24) tem-se que:

$$\begin{aligned} \pi r^2 h = \frac{m}{d} &\Leftrightarrow \frac{\pi D_i^2 h}{4} = \frac{m}{d} \Leftrightarrow D_i^2 = \frac{4m}{dh\pi} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow D_i = \sqrt{\frac{4m}{dh\pi}} \Leftrightarrow D_i = \sqrt{\frac{4V}{h\pi}} \end{aligned} \quad (25)$$

onde,

D_i – diâmetro interno da mangueira de polietileno (mm);

V – volume da seção cilíndrica (m^3);

h – altura (m).

Na Tabela 4, estão apresentados os valores da massa total em quilogramas para cada trecho retirado da tubulação, volume de cada trecho (m^3) e também do diâmetro interno (mm) resultante da Equação (25).

Tabela 4 - Diâmetro interno da tubulação a partir do método do volume.

Trecho da tubulação	¹ Massa total (10 ⁻²)	² Volume (10 ⁻⁵)	³ Diâmetro (mm)
1	2,857	2,8655	15,5961
2	2,798	2,8064	15,4342
3	2,814	2,8224	15,4783
4	2,837	2,8455	15,5414
5	2,829	2,8375	15,5195
6	2,860	2,8686	15,6043
7	2,869	2,8776	15,6288
8	2,801	2,8094	15,4425
9	2,844	2,8525	15,5606
10	2,815	2,8234	15,4810
11	2,801	2,8094	15,4425
12	2,815	2,8234	15,4810
13	2,850	2,8585	15,5770
14	2,823	2,8314	15,5030
15	2,876	2,8846	15,6479
16	2,834	2,8425	15,5332
17	2,835	2,8435	15,5359
18	2,851	2,8595	15,5797
19	2,815	2,8234	15,4810
20	2,842	2,8505	15,5551

¹Massa da tubulação com água (kg). ²Volume da seção cilíndrica de cada trecho (m³). ³Diâmetro interno de cada trecho (mm).

O segundo procedimento metodológico consistiu na utilização dos mesmos trechos retirados a partir do primeiro procedimento, mas agora, utilizando-se o paquímetro digital, e uma cônica desenvolvida com ângulo inferior a 10° como recomendado pela norma ISO 9261:2004. A ferramenta desenvolvida (Figura 5), foi inserida na abertura da seção cilíndrica com enorme cuidado para que não danificasse a mesma. Após isso, foi utilizado o paquímetro digital (DIGIMESS-IP54) conforme Figura 6 para medir a parede externa das 20 amostras retiradas da mangueira de polietileno. O paquímetro utilizado possui uma faixa de medição de 0 – 150 mm, e exatidão de $\pm 0,03$ mm.

Figura 5 - Ferramenta cônica desenvolvida.

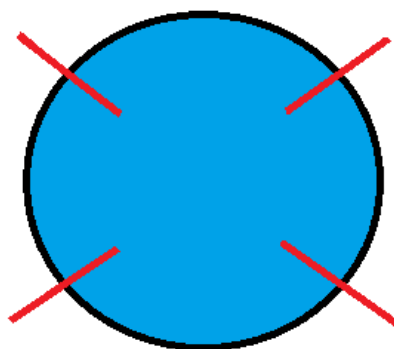
Foto: Jhonatan Cabrera Piazzentin - 2019

Figura 6 - Paquímetro digital utilizado nas medições.



Para determinar a espessura da parede do tubo gotejador foram medidos quatro pontos equidistantes nas duas seções transversais conforme mostra a Figura 7.

Figura 7 - Posição dos pontos medidos em seção transversal nos tubos emissores.



A Tabela 5 apresenta os valores médios para cada trecho retirado da tubulação. Os valores médios do diâmetro externo são resultados das 4 medições feitas com a utilização do paquímetro digital e cônica desenvolvida, já os valores médios da espessura da parede são resultantes das medições em 4 pontos equidistantes em seção transversal dos trechos retirados da tubulação como Figura 7 vista anteriormente. Por fim, o resultado do diâmetro interno é o somatório da diferença entre os valores aferidos do diâmetro externo e espessura da parede que resultou em 15,534 mm.

Tabela 5 - Diâmetro interno pelo método do paquímetro e cônica desenvolvida.

Trecho da tubulação	Diâmetro externo ¹	Espessura da parede ²	Diâmetro interno ³
	(mm)	(mm)	(mm)
1	17,47	0,98	15,54
2	17,47	1,97	15,50
3	17,48	1,975	15,50
4	17,48	1,955	15,53
5	17,47	1,965	15,51
6	17,50	1,93	15,57
7	17,51	1,975	15,53
8	17,47	1,95	15,52
9	17,50	1,965	15,53
10	17,52	1,97	15,55
11	17,51	1,97	15,54
12	17,49	1,965	15,52
13	17,49	1,96	15,53
14	17,49	1,97	15,52
15	17,49	1,97	15,52
16	17,51	1,97	15,54
17	17,51	1,955	15,55
18	17,54	1,97	15,57
19	17,51	1,955	15,55
20	17,51	1,95	15,56

¹Diâmetro externo da tubulação. ²Espessura da parede da tubulação. ³Diâmetro interno da tubulação, calculado pela diferença entre diâmetro externo e o dobro da espessura da parede.

A Figura 8 mostra o gotejador da marca Netafim, modelo PCJ drippers cuja operação de trabalho se encontra no intervalo de 0,5 – 4,0 (Bar), ou seja, de 5 à 40 mca, e vazão nominal de $4 L.h^{-1}$ utilizado em toda a parte de avaliação de uniformidade, e também na avaliação da perda de carga localizada após a inserção dos gotejadores na linha lateral.

Figura 8 - Modelo do gotejador utilizado na parte experimental.



FLOW RATE* (L/H)	WORKING PRESSURE RANGE (BAR)	WATER PASSAGES DIMENSIONS WIDTH-DEPTH-LENGTH (MM)	FILTRATION AREA (MM ²)	CONSTANT K	EXPONENT* X	BASE CODE COLOR	CAP COLOR CODE
0.5	0.5 – 4.0	0.54 x 0.60 x 35	1.8	0.5	0	Mustard	Black
1.2	0.5 – 4.0	0.67 x 0.77 x 35	2.0	1.2	0	Brown	Black
2.0	0.5 – 4.0	0.98 x 0.79 x 35	2.0	2.0	0	Red	Black
3.0	0.5 – 4.0	1.03 x 1.07 x 35	2.0	3.0	0	Blue	Black
4.0	0.5 – 4.0	1.32 x 0.92 x 35	2.0	4.0	0	Gray	Black
8.0	0.5 – 4.0	1.60 x 1.08 x 35	2.0	8.0	0	Green	Black
12.0	0.5 – 4.0	1.60 x 1.08 x 17	2.0	12.0	0	Fuchsia	Black
15.0	0.5 – 4.0	1.60 x 1.08 x 17	2.0	15.0	0	Black	Black

*Within working pressure range

Fonte: NETAFIM

Conforme as especificações da Figura 8, o gotejador utilizado no experimento possui as seguintes características:

- Faixa de pressão de operação: 5 a 40 mca;
- Dimensões de passagem da água (largura x profundidade x comprimento – em mm): 1,32 x 0,92 x 35;
- Área de filtragem: 2 mm²;
- Recomendação de filtragem da água: malha de 130 micros/120 mesh;
- Curva vazão ($L \cdot h^{-1}$) x pressão (bar): $Q = 4,0 \cdot P^{0,0}$, ou seja, se trata de um perfeito gotejador autocompensante na faixa de operação informada.

3.2 Instrumento eletrônico desenvolvido

Devido a necessidade de medir pontos distintos de perda de carga em tubulações, existe uma problemática da tecnologia disponível para fazer tal aferição, que consiste na utilização de manômetro tipo “U” de mercúrio que pode causar riscos

à saúde humana e também ao meio ambiente, embora não haja ainda restrição legal ao seu uso em laboratórios de calibração de manômetros.

Sendo assim, foi desenvolvido um instrumento eletrônico Datalogger de pressão exclusivamente para este trabalho capaz de medir e registrar dados da pressão em linhas de irrigação e armazená-los diretamente em uma planilha eletrônica.

Para calibração do equipamento desenvolvido, foi utilizada a mesa hidráulica Figura 9.

Figura 9 - Mesa hidráulica utilizada na calibração do protótipo desenvolvido.



Foram realizadas 41 leituras da resposta digital do sensor em (valor binário) juntamente com os valores lidos no manômetro de referência da mesa hidráulica. A partir de tais aferições, foi possível estabelecer uma interpolação linear a partir da criação de uma curva formada por 40 segmentos de retas que foram definidas da forma:

$$y = a_i x + b_i, i = 1, \dots, 40, x_i \leq x \leq x_{i+1}$$

onde os valores a e b correspondentes da Tabela 6 são denominados coeficientes angulares e lineares das retas.

Tabela 6 - Valores observados (bits) em função da pressão (mca) utilizados na calibração do protótipo desenvolvido, com coeficientes a e b calculados em cada função linear ($y = a.x + b$) entre dois pontos consecutivos.

Bits (x)	Pressão (y)	a	b
36	0	0.08333	-3.00000
48	1	0.07143	-2.42857
62	2	0.09091	-3.63636
73	3	0.07692	-2.61538
86	4	0.07692	-2.61538
99	5	0.08333	-3.25000
111	6	0.07143	-1.92857
125	7	0.08333	-3.41667
137	8	0.07692	-2.53846
150	9	0.08333	-3.50000
162	10	0.07692	-2.46154
175	11	0.07692	-2.46154
188	12	0.07143	-1.42857
202	13	0.07692	-2.53846
215	14	0.08333	-3.91667
227	15	0.07692	-2.46154
240	16	0.07143	-1.14286
254	17	0.07692	-2.53846
267	18	0.07692	-2.53846
280	19	0.07692	-2.53846
293	20	0.07692	-2.53846
306	21	0.07143	-0.85714
320	22	0.07692	-2.61538
333	23	0.07692	-2.61538
346	24	0.07692	-2.61538
359	25	0.07692	-2.61538
372	26	0.07692	-2.61538
385	27	0.07692	-2.61538
398	28	0.07143	-0.42857
412	29	0.07692	-2.69231
425	30	0.08333	-5.41667
437	31	0.07143	-0.21429
451	32	0.05000	9.45000
471	33	0.05882	5.29412
488	34	0.07143	-0.85714
502	35	0.06250	3.62500
518	36	0.06667	1.46667
533	37	0.07692	-4.00000
546	38	0.03704	17.77778
573	39	0.07143	-1.92857
587	40	0.06814	0.00000

É importante ressaltar que para quaisquer dois pontos $P_i = (x_i, y_i)$ e $P_{i+1} = (x_{i+1}, y_{i+1})$, $1 \leq i \leq 41$, da Tabela 6, os valores a e b da equação da reta que passa por eles foi obtida por meio do determinante da matriz igualado a zero com suas coordenadas e com o ponto genérico (x, y) , da seguinte forma:

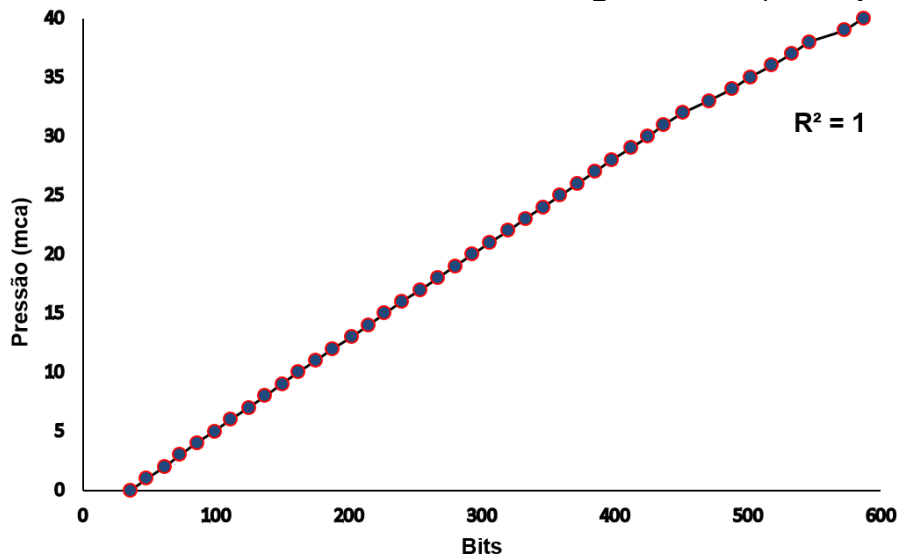
$$\begin{vmatrix} x_i & y_i & 1 \\ x_{i+1} & y_{i+1} & 1 \\ x & y & 1 \end{vmatrix} = 0 \Rightarrow (y_i - y_{i+1})x + (x_{i+1} - x_i)y_i + (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) = 0 \Rightarrow$$

$$y = \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \right) x + \left(\frac{x_{i+1} y_i - x_i y_{i+1}}{x_{i+1} - x_i} \right) \Rightarrow$$

$$a = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \text{ e } b = \frac{x_{i+1} y_i - x_i y_{i+1}}{x_{i+1} - x_i}$$

Uma vez que as 41 aferições geraram 41 pontos da forma (x, y) , onde x representa os Bits aferidos pelo protótipo desenvolvido, e y a pressão (em mca) já convertida para unidade de medida referida, foi possível construir uma reta formada pelos 40 segmentos de reta (Figura 10).

Figura 10 - Valores binários do conversor analógico em função da pressão.



A partir do gráfico desenvolvido, o coeficiente de determinação (R^2) encontrado foi igual a 1, ou seja, o modelo consegue explicar todos os valores observados com

elevada precisão. Isto naturalmente ocorre, pois, a curva formada por segmentos de reta possui todos os pontos aferidos.

3.3 Ensaio de perda de carga na mangueira de polietileno sem emissores

Inicialmente foi tomado o procedimento de ensaio de perda de carga na mangueira de polietileno sem a inserção dos emissores e com o final da linha aberta.

Foram utilizados 11 níveis de pressão (5,10,15 e 20 mca) na entrada da tubulação variando de 0 a 24,92 mca, que resultaram em 11 valores de vazão, cujos valores resultaram do quociente entre os volumes medidos e o tempo utilizado em cada medição.

Foi utilizado o Hidrômetro ELSTER (Figura 11) que tem como características: i) vazão máxima ($Q_{max} = 1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$); ii) vazão mínima ($Q_{min} = 15 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$); iii) pressão máxima de trabalho de 10 (bar), ou seja, 100 mca. A perda de carga na tubulação foi obtida pela leitura direta da pressão no instrumento eletrônico Datalogger de pressão, haja vista que no final da tubulação, cuja vazão saia livremente para a atmosfera a pressão relativa é zero.

Figura 11 - Hidrômetro utilizado nos ensaios de perda de carga.



Foto: Jhonatan Cabrera Piazentin - 2019

3.4 Ensaio de perda de carga na mangueira de polietileno com os gotejadores vedados

Neste ensaio, realizou-se o mesmo procedimento do ensaio anterior, com a diferença de se ter inserido na linha os 200 gotejadores, porém com todos vedados com (palito de dente) aos quais não danificavam as membranas dos gotejadores sendo de fácil inserção, e a vazão livre na atmosfera no final da linha. Com isso, foram registrados menores valores de vazão para o mesmo nível de pressão que o ensaio anterior, evidenciando o efeito da perda de carga localizada devido a intrusão da ponta em forma de seta dos gotejadores na linha, o que provoca um estreitamento na passagem da água e gera uma turbulência extra no fluxo.

Posteriormente, foram ajustadas as funções quadráticas das curvas de vazão versus pressão de ambos os ensaios, sendo que a diferença correspondeu à perda de carga localizada.

3.5 Ensaio de perda de carga na linha lateral com os gotejadores em operação

Para obtenção das informações referentes aos 3 regimes de escoamento ocorrido na linha de gotejadores, previamente estimou-se as posições em que haveria a mudança do regime de escoamento, ou seja, de turbulento no início da linha até uma estimada distância em que o Número de Reynolds (Re) ficasse próximo a 4000; depois para o regime de transição, ou seja, num segmento em que $2000 < Re < 4000$ e finalmente, para o regime laminar num segmento final da linha em que $Re < 2000$. Isso foi possível devido ao cálculo do Re trecho a trecho, ou seja, após cada segmento de 0,5 m onde a vazão é reduzida em 1/200 (para derivar para cada gotejador) o Re decrescia e, assim, pode estabelecer a posição (aproximada) onde haveria a mudança de regime para inserção de um ponto de tomada de pressão, conforme pode ser visto no ANEXO A. O fato dos gotejadores serem autocompensantes ajudou a melhorar a estimativa dos segmentos.

Portanto, a diferença de pressão medidas entre o início e final de cada segmento corresponde à perda de carga, haja vista a linha de gotejadores estar posicionada em nível.

Verificou-se que o escoamento turbulento ($Re > 4000$) ocorreu no início da linha lateral até a distância de aproximadamente 78 m, gotejadores de número 1 ao 156, conforme pode ser observado no ANEXO A.

Por sua vez, o regime de transição ($2000 < Re \leq 4000$) ocorreu no segmento que vai da distância de 78,5 a 89 m, gotejadores de número 157 a 178 ANEXO A.

Finalmente, o regime laminar ($Re \leq 2000$) ocorreu no segmento final, que vai da distância de 89,5 a 100 m, gotejadores de 179 a 200 ANEXO A.

3.6 Delineamento experimental

Os ensaios experimentais realizados foram estruturados adotando-se tratamentos que identificavam a forma de obtenção dos valores de perda de carga. Os tratamentos foram denominados:

- T1: perda de carga observada pelo aparelho Datalogger desenvolvido;
- T2: perda de carga estimada pela equação Universal trecho a trecho;
- T3: perda de carga estimada pela equação de Hazen-Williams trecho a trecho;
- T4: perda de carga estimada pela equação de Flamant trecho a trecho;
- T5: perda de carga pela equação Universal aplicando fator de múltiplas saídas de Christiansen;
- T6: perda de carga pela equação de Hazen-Williams aplicando fator de múltiplas saídas de Christiansen;
- T7: perda de carga pela equação de Flamant aplicando fator de múltiplas saídas de Christiansen.

Foram estabelecidos dois experimentos principais, onde todos utilizavam 4 níveis de pressão (5,10,15 e 20 mca). O primeiro deles tinha como fator secundário os 7 tratamentos supra descritos, enquanto o segundo, somente os 4 primeiros tratamentos (T1, T2, T3, T4).

Sendo assim, estabeleceu-se os seguintes delineamentos experimentais:

- Ensaio 1: delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 7×4 , utilizando 7 tratamentos representados pelo método de obtenção dos valores de perda de carga (T1 a T7) e 4 níveis de pressão, com 4 repetições;
- Ensaio 2: delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 4×4 , utilizando 4 tratamentos representados pelo método de obtenção dos valores de perda de carga (T1 a T4) e 4 níveis de pressão, com 4 repetições.

Em todos ensaios foram aplicados análise de variância ANOVA com nível de significância 5%, com posterior aplicação do teste de Tukey para comparação das médias.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Seguem-se os resultados dos ensaios de perda de carga na tubulação sem e com os gotejadores inseridos (itens 4.1 e 4.2), porém neste caso, com eles obstruídos para se medir a perda de carga localizada devido à inserção dos mesmos na tubulação. Em seguida são apresentados os resultados dos ensaios da perda de carga com os gotejadores em operação (4.3) que se trata do alvo principal do trabalho.

Finalmente são inseridos os resultados do ensaio de uniformidade de distribuição de vazão dos gotejadores.

4.1 Perda de carga sem gotejadores (mangueira sem o efeito da obstrução parcial da inserção dos gotejadores)

A Tabela 7, mostra, os valores obtidos no ensaio de perda de carga sem a inserção dos gotejadores. Verifica-se que somente a fórmula de Flamant superestimou os valores de perda de carga, enquanto a fórmula de Hazen-Williams e a Universal subestimaram os valores de perda de carga. Contudo, todas apresentaram tendências muito próximas aos valores observados.

Tabela 7 - Ensaio de perda de carga sem inserção dos gotejadores.

Q ¹	NR ²	V ³	T ⁴	hf(obs) ⁵	hf(UNIV) ⁶	hf(HW) ⁷	hf(Flam) ⁸
1,1215	25361	100	321,00	24,92	21,85	20,51	24,53
1,0682	24156	65	219,06	22,69	20,06	18,74	22,52
1,0055	22737	65	232,73	20,54	18,03	16,76	20,26
0,9567	21636	65	244,58	18,85	16,52	15,28	18,57
0,8627	19510	50	208,64	15,77	13,77	12,62	15,50
0,7606	17200	50	236,65	12,64	11,05	9,99	12,43
0,6723	15203	50	267,75	10,08	8,90	7,95	10,20
0,5932	13529	50	300,88	8,23	7,26	6,41	8,17
0,5010	11329	50	359,30	6,00	5,34	4,61	5,99
0,3306	7477	50	544,43	2,82	2,60	2,14	2,89
0	0	0	0	0,00	0	0	0

¹Vazão ($m^3 \cdot h^{-1}$). ²Número de Reynolds (adimensional). ³Volume (litros). ⁴Tempo (segundos). ⁵Perda de carga observada pelo protótipo desenvolvido. ⁶Perda de carga estimada pela equação Universal (m). ⁷Perda de carga estimada pela equação de Hazen-Williams (m). ⁸Perda de carga estimada pela equação de Flamant (m).

4.2 Perda de carga com os gotejadores vedados (mangueira com o efeito da obstrução parcial da inserção dos gotejadores)

Os resultados do ensaio dos gotejadores inseridos na linha, porém obstruídos com vazão livre no final da linha, são apresentados na Tabela 8 e Figura 12. Cabe ressaltar que a quinta coluna da referida tabela ($hf+hf_{localizada}$) estão os valores de perda de carga ao longo da mangueira juntamente com a perda de carga localizada. Na sexta coluna estão apresentados os valores da perda de carga observada na mangueira descontando os valores da perda de carga localizada. O procedimento para determinação dos valores da perda de carga referente a sexta coluna da Tabela 8 foi dado em função do resultado da diferença entre as regressões da Figura 12, ou seja da regressão de perda de carga com os gotejadores e sem gotejadores. Nota-se ainda que após isso, os valores obtidos foram descontados dos valores referentes a quinta coluna.

Tabela 8 - Ensaio de perda de carga com gotejadores vedados.

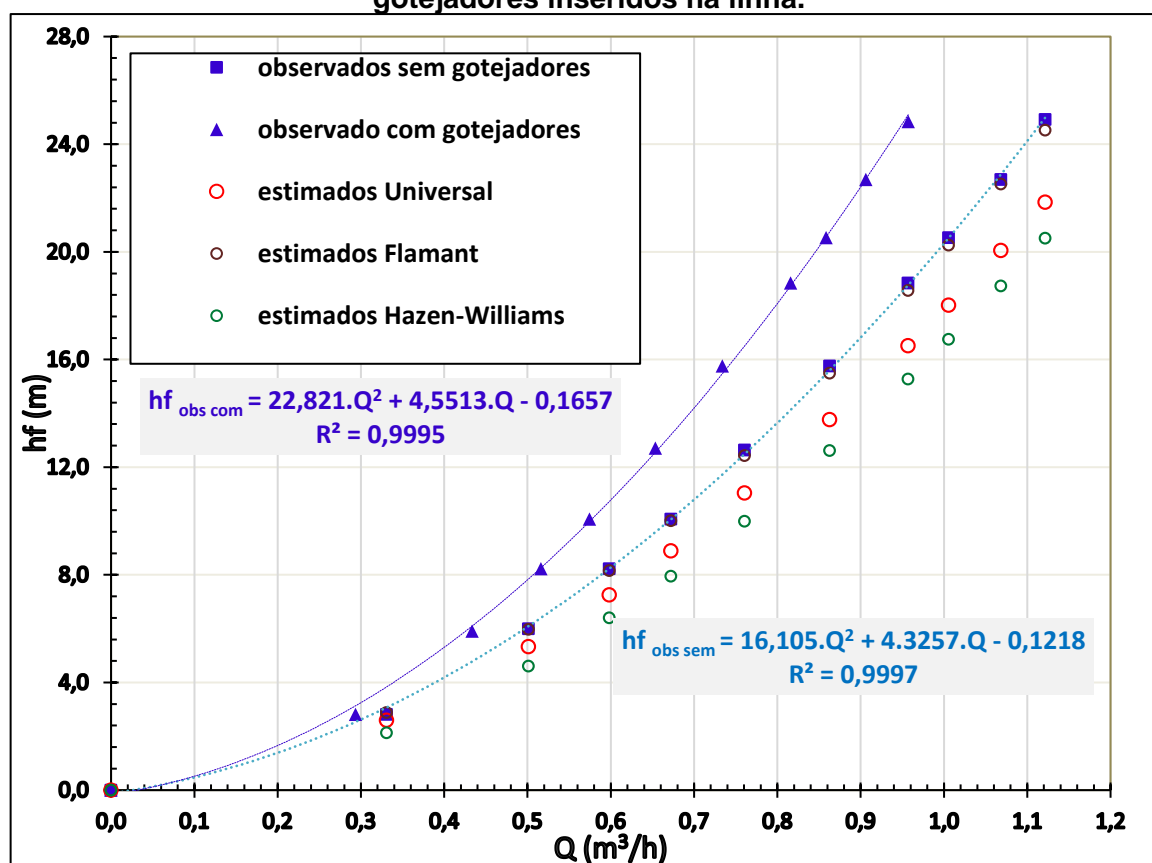
Q ¹	NR ²	V ³	T ⁴	hf+hf _{localizada} (obs) ⁵	hf(obs) ⁶	hf _{loc} (%) ⁷	hf(UNIV) ⁸	hf(HW) ⁹	hf(Flam) ¹⁰
0,9573	21647	100	376,07	24,85	16,19	34,85	16,53	15,30	18,59
0,9063	20496	65	258,18	22,69	14,83	34,64	15,02	13,83	16,90
0,8584	19412	65	272,60	20,54	13,57	33,93	13,65	12,50	15,36
0,8159	18450	65	286,81	18,85	12,53	33,53	12,49	11,38	14,06
0,7340	16598	50	245,24	15,77	10,62	32,66	10,38	9,35	11,68
0,6536	14781	50	275,39	12,71	8,70	31,55	8,47	7,55	9,53
0,5746	12994	50	313,27	10,08	6,94	31,15	6,77	5,94	7,61
0,5162	11674	50	348,69	8,23	5,74	30,26	5,62	4,87	6,31
0,4335	9803	50	415,22	5,92	4,17	29,56	4,15	3,53	4,65
0,2936	6640	50	613,02	2,82	2,06	26,95	2,12	1,71	2,35
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

¹Vazão ($m^3 \cdot h^{-1}$). ²Número de Reynolds (adimensional). ³Volume (litros). ⁴Tempo (segundos). ⁵Perda de carga observada pelo protótipo desenvolvido (ao longo da mangueira juntamente com a perda localizada). ⁶Perda de carga "observada" na mangueira, descontando a perda de carga localizada (m). ⁷Participação percentual da perda de carga localizada da linha lateral total ($hf + hf_{loc}$). ⁸Perda de carga estimada pela equação Universal (m). ⁹Perda de carga estimada pela equação de Hazen-Williams (m). ¹⁰Perda de carga estimada pela equação de Flamant (m).

A Figura 12 apresenta as curvas de vazão em função perda de carga nos ensaios sem e com os gotejadores inseridos na linha. O comportamento dos resultados em relação aos ensaios de perda de carga com e sem gotejadores mostraram-se precisos, cujos coeficientes de determinação (R^2) foi de 0,9995 e de 0,9997

respectivamente. Portanto, se um projetista de sistema de gotejamento desconsiderar a perda de carga localizada na linha lateral, subestimar a altura manométrica total do sistema e poderá comprometer a operação adequada do sistema, especialmente se os gotejadores não forem autocompensantes.

Figura 12 - Curvas de vazão versus perda de carga nos ensaios sem e com os gotejadores inseridos na linha.



4.3 Perda de carga com os gotejadores em operação – linha lateral completa

Na Tabela 9 estão apresentados os valores da análise de variância (ANOVA) para a perda de carga total relativa ao Ensaio 1. A maioria das pressões utilizadas apresentaram diferença significativa ($P \leq 0,05$) nos tratamentos. Apesar dos gotejadores serem autocompensantes, houve diferença de vazão, que resultou em maiores perdas, particularmente nas pressões 10 e 15 mca com resultados semelhantes em T2 a T7.

Tabela 9 - Análise estatística para perda de carga total.

Pressão (mca)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
5	2,605 Cc	2,755 Bb	2,355 Bd	3,104 Ca	2,520 Bc	2,359 Bd	3,111 Ca
10	4,913 Bb	4,541 Ac	4,012 Ad	5,136 Aa	4,159 Ad	4,020 Ad	5,148 Aa
15	5,197 Ab	4,541 Ac	4,012 Ad	5,136 Aa	4,159 Ad	4,020 Ad	5,148 Aa
20	5,098 Aa	4,425 Ab	3,903 Ae	5,005 Ba	4,053 Ac	3,911 Ad	5,016 Ba

Legenda: Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). Letras maiúsculas na coluna comparam diferentes pressões no mesmo tratamento. Letras minúsculas na linha comparam diferentes tratamentos para cada pressão. T1 – perda de carga observada, T2 – perda de carga estimada pela equação universal trecho a trecho, T3 – perda de carga estimada pela equação de Hazen-Williams trecho a trecho, T4 – perda de carga estimada pela equação de Flamant trecho a trecho, T5 – perda de carga pela equação universal aplicando fator de múltiplas saídas de Christiansen, T6 – perda de carga pela equação de Hazen-Williams aplicando fator de múltiplas saídas de Christiansen, T7 – perda de carga pela equação de Flamant aplicando fator de múltiplas saídas de Christiansen.

Para a pressão de 5 mca apenas o T5 (perda de carga pela equação universal aplicando fator de múltiplas saídas de Christiansen) apresentou valor semelhante ao T1, com os menores valores em relação ao demais tratamentos. Tal resultado, indica a eficiência do ajuste dado pelo fator de Christiansen atribuído a equação Universal.

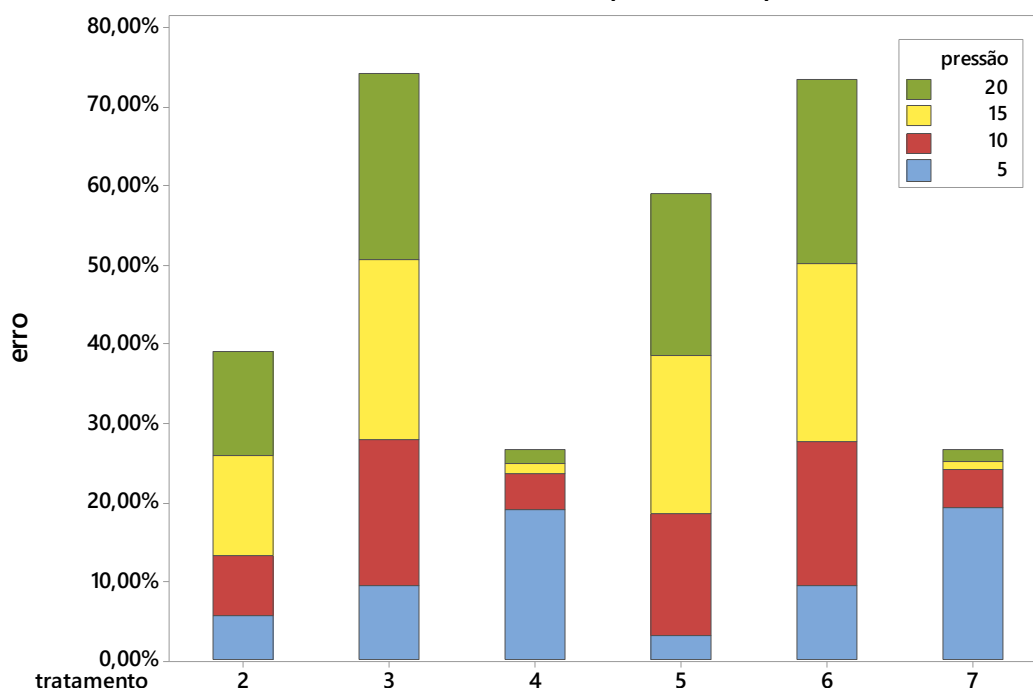
Paras as pressões de 10, 15 e 20 mca os tratamentos T2, T3, T5, e T6 subestimaram os valores da perda de carga em relação ao T1.

Em relação aos tratamentos, ocorre dois grupos de semelhança, com T2, T3, T5 e T6; T4 e T7, sendo que o segundo grupo expressou as maiores perdas de carga, pois foram obtidas por meio da equação de Flamant, enquanto que nas menores foram em T3 e T6 obtidas por Hazen-Williams. Ressalta-se no geral que, entre os tratamentos T1 a T7, o tratamento T2 é mais semelhante ao T1, que por sua vez representa o tratamento testemunha do presente estudo. As maiores perdas médias de carga, ocorreram na seguinte ordem: T7, T4, T1, T2, T5, T6 e T3.

Os tratamentos T4 e T7 superestimaram a perda de carga em todos os níveis de pressão. Conforme a literatura, a Equação de Flamant é recomendada para tubulações de diâmetro interno até 100 mm. O fato desta equação superestimar os valores de perda de carga, remete ao dimensionamento mais conservador de linhas até este diâmetro, ou seja, por superestimar a perda de carga se tem uma certa segurança na composição da altura manométrica total. Cabe ressaltar que o valor do coeficiente “b” utilizado no trabalho foi 0,000135 conforme a literatura. Certamente este valor sendo reduzido permitiria uma melhor aproximação dos valores observados.

Ao se comparar os tratamentos, T2 e T5 nota-se variações de erro nítidas entre si, para as demais houve valores próximos Figura 13.

Figura 13 - Erro dos tratamentos da perda de carga total em comparação com tratamento testemunha (observado).



Observa-se que, para T3, T6 e T5 apresentaram os maiores erros médios, os menores ocorreram em T4 e T7 (Equação de Flamant trecho a trecho e Equação de Flamant aplicando fator de múltiplas saídas de Christiansen, respectivamente).

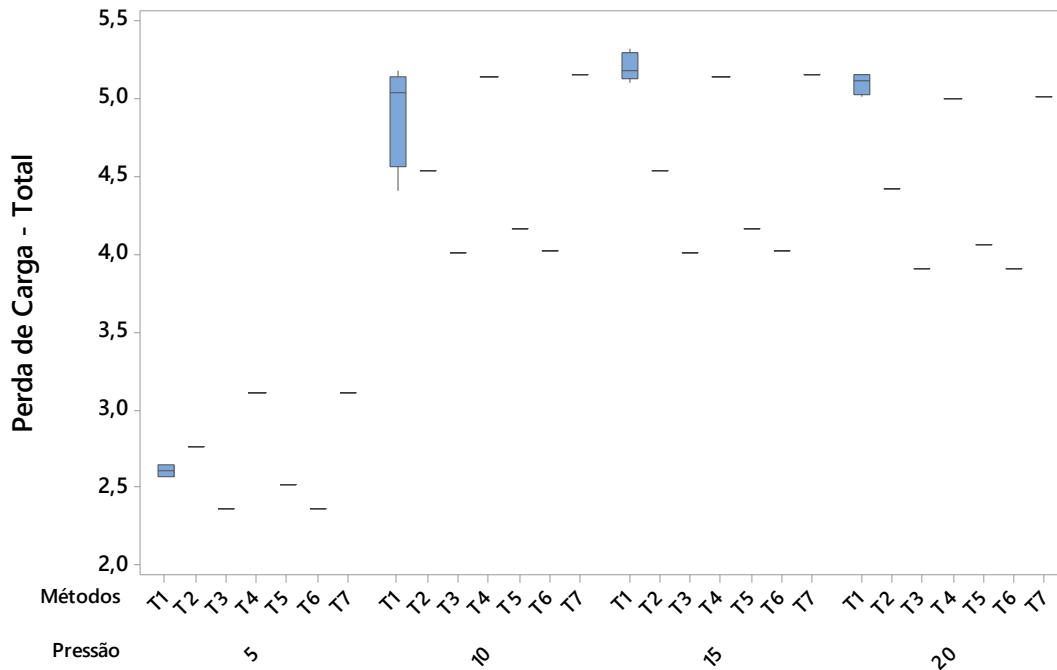
Em relação as pressões utilizadas as maiores perdas, foram observadas em 20, 15, 10 e 5 mca nesta ordem.

Para a pressão de 5 mca observou-se os maiores erros quando foram utilizados os tratamentos T4 e T7, mas para as demais pressões 10, 15 e 20 mca nota-se os menores erros para os mesmos tratamentos.

Com exceção do menor erro no T5 para a pressão de 5 mca, os tratamentos T3, T5 e T5 possuem erro cumulativo maior quando comparados ao T2.

Verifica-se na Figura 14 que todos os tratamentos sob pressão 5 apresentam distribuição concentrada nas menores perdas de cargas, não havendo grande variabilidade nos valores observados, estimados pelas equações trecho a trecho (T2, T3, T4) e pelas equações que contemplam o fator de múltiplas saídas de Christiansen (T2, T5, T7). Para a pressão de 10 mca em T1, houve maior variabilidade nos valores em comparação com as pressões de 15 e 20 mca, para os demais tratamentos houve apresentação de valores medianos, não havendo presença de outliers, ressaltando-se, portanto, que o rigor na aplicação do delineamento experimental foi eficiente na obtenção dos dados.

Figura 14 - Boxplot da perda de carga total em função dos métodos (T1 – perda de carga observada, T2 – perda de carga estimada pela equação universal trecho a trecho, T3 – perda de carga estimada pela equação de Hazen-Williams trecho a trecho, T4 – perda de carga estimada pela equação de Flamant trecho a trecho, T5 – perda de carga pela equação universal aplicando fator de múltiplas saídas de Christiansen, T6 – perda de carga pela equação de Hazen-Williams aplicando fator de múltiplas saídas de Christiansen, T7 – perda de carga pela equação de Flamant aplicando fator de múltiplas saídas de Christiansen) e pressões de (5, 10, 15, 20 mca).



4.4 Perda de carga com os gotejadores em operação – segmento turbulento

Para análise da perda de carga em regime de escoamento turbulento (Tabela 10), verifica-se que o T4 apresentou os maiores valores de perda de carga para todas as pressões aplicadas em relação a T1 e não apresentou diferenças entre as pressões, demonstrando que o coeficiente “b” da Equação de Flamant (trecho a trecho) poderia ser reduzido.

Tabela 10 - Análise estatística para perda de carga em regime turbulento.

Pressão (mca)	T1	T2	T3	T4
5	2,540 Cc	2,720 Cb	2,325 Cd	3,059 Ca
10	4,976 Ab	4,478 Ac	3,961 Ad	5,060 Aa
15	4,903 Ab	4,478 Ac	3,961 Ad	5,060 Aa
20	4,690 Bb	4,364 Bc	3,854 Bd	4,931 Ba

Legenda: Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). Letras maiúsculas na coluna comparam diferentes pressões no mesmo tratamento. Letras minúsculas na linha comparam diferentes tratamentos para cada pressão. T1 – perda de carga observada, T2 – perda de carga estimada pela equação universal em regime turbulento, T3 – perda de carga estimada pela equação de Hazen-Williams em regime turbulento, T4 – perda de carga estimada pela equação de Flamant em regime turbulento.

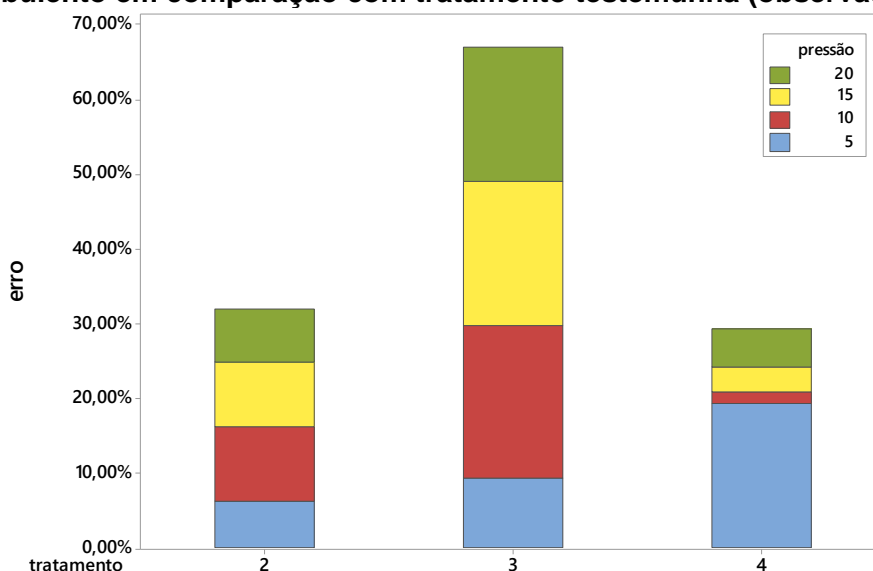
Para o T3, não houve diferença de perda de carga entre as pressões utilizadas, para T2 e T4, somente a pressão 5 mca diferenciou-se das demais, no entanto foi semelhante para os tratamentos. O T4 e o T3 superestimou/subestimou respectivamente as perdas de carga em relação ao T1. Em relação as pressões, 10, 15 e 20 mca possuem grande semelhança para todos os tratamentos.

Nota-se que, o comportamento dos tratamentos (T3 e T4) não foram eficientes apresentaram, pois suas equações possuem coeficientes fixos denominados (C – Hazen Williams) e (b – Flamant) que variam em função da tubulação, enquanto para o T2 (perda de carga estimada pela equação Universal em regime turbulento) o termo denominado (f – fator de atrito) é ajustado em função do número de Reynolds como observado por (ASSY, 1977; OLIVEIRA, 1978; BOTREL, 1984).

A Figura 15 apresenta os desvios dos tratamentos da perda de carga em regime turbulento em relação aos valores observados.

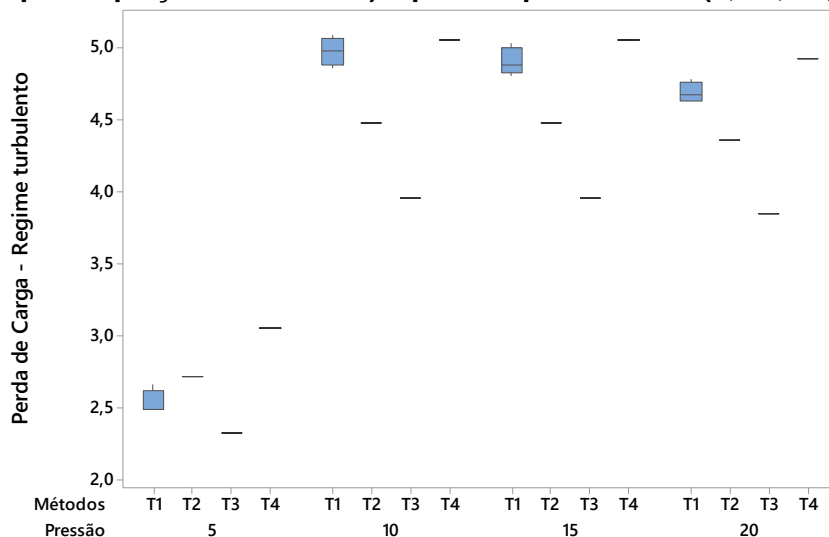
As maiores perdas de carga acumuladas, foram verificadas no T3 nas pressões 10,15 e 20, seguida do T4 (pressão de 5 mca), já o T2 apresentou para todas as pressões uma perda de carga mais distribuída.

Figura 15 - Erro dos tratamentos da perda de carga em regime de escoamento turbulento em comparação com tratamento testemunha (observado).



A Figura 16 indica que para a pressão de 5 mca os valores de perda de carga, são baixos e concentrados quando comparados aos outros tratamentos em todas as pressões. Para as pressões 10, 15 e 20 mca, todos os tratamentos possuem valores próximos, com exceção do T1.

Figura 16 - Boxplot da perda de carga em regime turbulento em função dos métodos (T1 – perda de carga observada, T2 – perda de carga estimada pela equação universal, T3 – perda de carga estimada pela equação de Hazen-Williams, T4 – perda de carga estimada pela equação de Flamant) e para as pressões de (5, 10, 15, 20 mca).



4.5 Perda de carga com os gotejadores em operação – segmento de transição

A Tabela 11 apresenta os valores da análise estatística para o regime de transição. Não houve interação entre tratamentos e pressões, sendo observado apenas efeito exclusivo dos tratamentos.

Os tratamentos T2, T3 e T4 não apresentam diferença entre si para a perda de carga, sendo que o T4 superestimou a perda de carga em relação a T1.

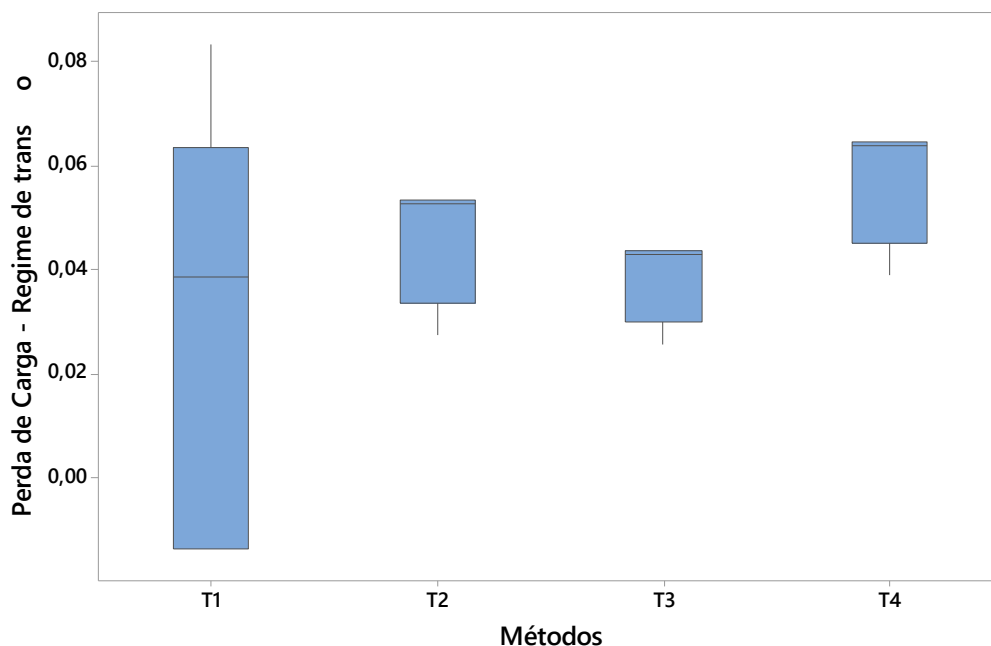
Tabela 11 - Análise estatística para perda de carga em regime de transição.

T1	T2	T3	T4
0,03071 b	0,04657 ab	0,03881 ab	0,05767 a

Legenda: Médias seguidas de mesma letra nas linhas não diferem estatisticamente. T1 – perda de carga observada, T2 – perda de carga estimada pela equação universal em regime de transição, T3 – perda de carga estimada pela equação de Hazen-Williams em regime de transição, T4 – perda de carga estimada pela equação de Flamant em regime de transição.

Nota-se na Figura 17, que as perdas de carga em regime de transição apresentam maior variabilidade média em T1. Para T2 as perdas de carga médias estão próximas aos maiores valores de T1, contudo, com menor variabilidade. Para T3 e T4 a variabilidade média de perda de carga é menor em relação a T1. Contudo em T4, os valores são maiores que os valores médios de T1. Os tratamentos (T2, T3 e T4) estimados pelas equações Universal, Hazen-Williams e Flamant respectivamente possuem valores menores que os valores medianos de T1.

Figura 17 - Boxplot da perda de carga em regime de transição em função dos métodos (T1 – perda de carga observada pelo protótipo desenvolvido, T2 – perda de carga estimada pela equação universal, T3 – perda de carga estimada pela equação de Hazen-Williams, T4 – perda de carga estimada pela equação de Flamant).



A Tabela 12 apresenta os desvios absolutos de cada tratamento em relação ao tratamento observado (T1). Observa-se que o T4 foi o que apresentou o maior desvio em relação aos demais tratamentos.

Tabela 12 - Erro absoluto de cada tratamento em relação ao T1 (observado) em regime de transição.

T2	T3	T4
52%	26%	88%

T2 – erro absoluto da perda de carga estimada pela equação universal em regime de transição, T3 – erro absoluto da perda de carga estimada pela equação de Hazen-Williams em regime de transição, T4 – erro absoluto da perda de carga estimada pela equação de Flamant em regime de transição.

4.6 Perda de carga com os gotejadores em operação – segmento laminar

O segmento laminar, cuja extensão foi aproximadamente 10,5 m (foi da distância de 89,5 a 100 m, gotejadores de 179 a 200) não teve boa resposta de estimativa pelas fórmulas utilizadas, provavelmente devido à grande dificuldade de se medir a perda de carga no trecho, por apresentar um valor muito baixo e de difícil detecção, mesmo utilizando um medidor eletrônico razoavelmente sensível. É sabido que as fórmulas de Hazen-Williams e de Flamant não são aplicadas ao escoamento laminar, sendo esperado uma grande variação em relação aos valores observados. Contudo, a

fórmula Universal, que é única adequada para tal regime, por considerar a viscosidade, o Número de Reynolds e a rugosidade relativa no cálculo do fator de atrito da fórmula (embora em escoamento laminar, o efeito da rugosidade relativa seja desprezível), poderia estimar mais adequadamente dos valores observados, mas isso não ocorreu. A sensibilidade do sensor utilizado poderia ser mais eficaz na aferição de valores tão reduzidos de perda de carga.

Se fosse utilizado um líquido muito viscoso, que resultasse em escoamento laminar em toda tubulação, as condições de comparação dos valores observados versus os estimados pela fórmula Universal seriam, provavelmente, suficientes para evidenciar a performance da fórmula.

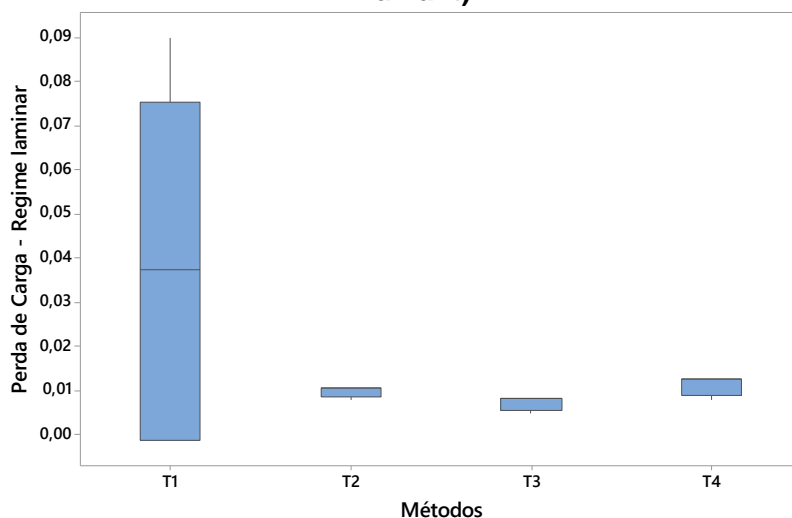
A Tabela 13 apresenta a análise estatística da perda de carga em regime laminar. Não houve diferença significativa para a perda de carga entre as pressões e tão pouco interações. Contudo, os tratamentos T2, T3 e T4 não possuem diferença significativa e subestimaram a perda de carga observada em T1, que por sua vez se mostrou com grande variabilidade conforme Figura 18.

Tabela 13 - Análise estatística para perda de carga em regime de escoamento laminar.

T1	T2	T3	T4
0,0379 a	0,0096 b	0,0070 b	0,0112 b

T1 – perda de carga observada, T2 – perda de carga estimada pela equação universal em regime laminar, T3 – perda de carga estimada pela equação de Hazen-Williams em regime laminar, T4 – perda de carga estimada pela equação de Flamant em regime laminar.

Figura 18 - Boxplot da perda de carga em regime de escoamento laminar em função dos métodos (T1 – perda de carga observada, T2 – perda de carga estimada pela equação universal em regime laminar, T3 – perda de carga estimada pela equação de Hazen-Williams em regime laminar, T4 – perda de carga estimada pela equação de Flamant).



Os desvios observados nos tratamentos T2, T3 e T4 foram próximos, conforme Tabela 14, ou seja, quando comparados com o tratamento testemunha possuem tamanha variação.

Tabela 14 - Erro absoluto de cada tratamento em relação ao T1 (observado) em regime de escoamento laminar.

T2	T3	T4
75%	82%	70%

T2 – erro da perda de carga estimada pela equação universal em regime laminar, T3 – erro da perda de carga estimada pela equação de Hazen-Williams em regime laminar, T4 – erro da perda de carga estimada pela equação de Flamant em regime laminar.

5 CONCLUSÕES

Em relação as proposições do trabalho, pode-se concluir que:

- No ensaio de perda de carga sem a inserção dos gotejadores os valores obtidos pelas fórmulas Universal, Hazen-Williams e Flamant subestimaram os valores de perda de carga em relação aos valores observados;

- No ensaio de perda de carga com a inserção dos gotejadores, porém com eles vedados, a perda de carga localizada representou uma fração muito expressiva em relação à total, algo em torno de 31%;

- No ensaio com os gotejadores operando normalmente, apesar dos gotejadores serem autocompensantes e operarem dentro do intervalo recomendado pelo fabricante, houve o efeito dos níveis de pressão e das fórmulas de cálculo, bem como o efeito interativo delas em relação à perda de carga observada. A fórmula de Flamant (trecho a trecho ou com fator de Christiansen) superestimou as perdas enquanto as de Hazen-Williams e a Universal subestimaram. Os desvios médios foram em ordem decrescente: fórmula de Flamant, fórmula de Hazen-Williams, fórmula Universal.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Atlas irrigação**: uso da água na agricultura irrigada. Brasília, 2017.

ALLEN, R. G. Relating the Hazen-Williams and Darcy-Weisbach Friction loss equations for pressurized irrigation. **Applied Engineering in Agriculture**, Michigan, v.12, n.6, p.685-693, 1996.

AL-MOUND, A. I. Significance of energy losses due to emitter connections in trickle irrigation lines. **Journal of Agriculture Engineering Research**, Silsoe, v. 60, n. 1, p.1-5, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **PNBR 04:015.08-015**: irrigação localizada: microaspersores: requisitos gerais e métodos de ensaio. São Paulo, 2004. 11 p.

ASSY, T. M. Emprego da fórmula universal da perda de carga e as limitações das fórmulas empíricas. **CETESB**, São Paulo, p. 1-64, 1977.

AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNANDEZ, M. F.; ARAUJO, R.; ITO, A. E. **Manual de hidráulica**. 8.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998.

BARR, D. I. H. Solutions of the Colebrook–White function for resistance to uniform turbulent flow. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, London, v. 71, n. 2, p. 529-536, 1981.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: Editora da UFV, 2009.

BOTREL, T. A. **Hidráulica de micro-aspersores e de linhas laterais de irrigação localizada**. Piracicaba. 1984. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agronomia “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1984.

CARDOSO, G. G. G. **Índice geométrico na determinação da perda de carga localizada em conexão de emissores sobre tubos de polietileno de pequenos diâmetros**. 2007. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

CARVALHO, J. A.; OLIVEIRA, L. F. C. **Instalações de bombeamento para irrigação**: hidráulica e consumo de energia. 2. ed. Lavras: Editora da UFLA, 2014.

CASTIBLANCO, C. J. M. **Modelo computacional para o dimensionamento da subunidade em irrigação localizada**. 2013. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

CHEN, N. H. An explicit equation for friction factor in pipes. **Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals**, New York, v. 18, n. 3, p. 296-297, 1979.

CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinklers**. Bulletin. 670. University of Califórnia. Berkeley, Califórnia, 1942.

- CHRISTOFIDIS, D. **Considerações sobre conflitos e uso sustentável em recursos hídricos, em Conflitos e uso sustentável dos recursos naturais.** Brasília: Garamont, 2002.
- CHURCHILL, S. W. Empirical expressions for the shear stress in turbulent flow in commercial pipe. **American Institute of Chemical Engineers**, New York, v. 19, n. 2, p. 375-376, 1973.
- COLEBROOK, C. F. Turbulent Flow in Pipes, with Reference to the Transition Region between the Smooth and Rough Pipes Laws. **Journal of the Institution of Civil Engineers**, London, v. 11, n. 4, p. 133-156, 1938.
- GOMES, A. W. A.; FRIZZONE, J. A.; NETO, O. R.; DE MIRANDA, J. H. Perda de carga localizada em gotejadores integrados em tubos de polietileno. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 3, p. 435-446, 2010.
- GOMES, H. P. **Engenharia de irrigação: hidráulica dos sistemas pressurizados, aspersão e gotejamento.** 3. ed. Campina Grande: UFPB, 1999.
- HAALAND, S. E. Simple and explicit formulas for friction factor in turbulent pipe flow. **Journal of Fluids Engineering**, New York, v. 105, n. 1, p. 89-90, 1983.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9261. **Agricultural irrigation equipment emitters and emitting pipe: specification and test methods.** 2. ed. Geneva, 2004.
- JUANA, L.; RODRÍGUEZ-SINOBÁS, L.; LOSADA, A. Determining minor head losses in drip irrigation laterals. I: Methodology. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 128, n. 6, p. 376-384, 2002.
- KAMAND, F. Z. Hydraulic friction factors for pipe flow. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 114, n. 2, p. 311-323, 1988.
- LAPERUTA NETO, J. **Perda de carga em mangueiras gotejadoras novas, usadas e com emissores entupidos.** 2010. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista Júlio De Mesquita Filho, Botucatu, 2010.
- MELLO, C. R.; FERREIRA, D. F.; CARVALHO, J. A. Equações explícitas para o fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.3, n.2, p.365-371,1999.
- OLIVEIRA, C. A. S. **Hidráulica de gotejadores e de linhas laterais de irrigação por gotejamento.** 1978. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1978.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA. **Global Map of Irrigation Areas version 5**, Roma, 2013.
- PORTO, R. M. **Hidráulica básica.** 4 ed. São Carlos: EESC-USP, 2006.
- PROVENZANO, G.; PUMO, D. Assessing a local losses evaluation procedure in microirrigation integrated lateral design. In: Meeting of the International Commission on Irrigation and Drainage (ICID), 54., 2003, Montpellier. **Proceeding**, Montpellier: FAO/ICID, 2003.
- PROVENZANO, G.; PUMO, D. Experimental analysis of local pressure losses for microirrigation laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.130, n. 4, p. 318-324, 2004.

PROVENZANO, G.; PUMO, D; DIDIO, P. Simplified procedure to evaluate head losses in drip irrigation lateral. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 131, n. 6, p. 525-532, 2005.

RETTORE NETO, R. 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, p. 28-39, 2009.

ROBAINA, D. A. Análise de equações explícitas para o cálculo do coeficiente “f” da fórmula universal de perda de carga. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.22, n.2, p. 157-159, 1992.

ROMEO, E.; ROYO, C.; MONZÓN, A. Improved explicit equations for estimation of the friction factor in rough and smooth pipes. **Chemical Engineering Journal**, Amsterdam, v. 86, n. 3, p. 369-374, 2002.

SCALOPPI, E. J.; ALLEN, R. G. Hydraulic of irrigation laterals: comparative analysis. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Nova York, v. 119, n. 1, p. 91-115, 1993.

SONNAD, J. R.; GOUDAR, C. T. Turbulent flow friction factor calculation using a mathematically exact alternative to the Colebrook-White equation. **Journal of Hydraulic Engineering**, New York, v. 132, n. 8, p. 863-867, 2006.

SOUSA, J.; CUNHA, M. DA C.; MARQUES, A. S. An explicit solution of the Colebrook-White equation through simulated annealing. **Water Industry Systems: Modelling and Optimization Applications**, Baldok, v.2, n.1 p.347-355, 1999.

SWAMEE, P. K. Design of a submarine oil pipeline. **Journal of Transportation Engineering**, Reston, v. 119, n. 1, p. 159- 170, 1993.

VILAÇA, F. N. **Perda de carga em conectores iniciais da irrigação localizada**. 2012. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

YILDIRIM, G. An assessment of hydraulic design of trickle laterals considering effect of minor losses. **Irrigation and Drainage**, New Delhi, v. 56, n. 4, p. 399-421, 2007.

ANEXO A – Predição do regime de escoamento para a pressão de 20 mca na repetição 1

Tabela 15 - Predição do regime de escoamento do ensaio de perda de carga estimada e observada (Repetição 1 - 20 mca).

G¹	P²	Q³	V⁴	NR⁵	R⁶	hf_{ms}⁷	hf_{ms}⁸	hf_{ms}⁹	hf_{ms}¹⁰	hf_{ms}¹¹	hf_{ms}¹²	hf_{ms}¹³	hf_{localiz.}¹⁴	f¹⁵
1	0,50	804,0	1,1788	18181	T	0,0603365	0,0553724	0,0684961	-	-	-	-	0,02133210	0,0264340
2	1,00	800,0	1,1729	18091	T	0,0598108	0,0548608	0,0678979	-	-	-	-	0,02111733	0,0264677
3	1,50	796,0	1,1670	18000	T	0,0592872	0,0543513	0,0673019	-	-	-	-	0,02090366	0,0265017
4	2,00	791,9	1,1612	17909	T	0,0587655	0,0538440	0,0667082	-	-	-	-	0,02069107	0,0265359
5	2,50	787,9	1,1553	17818	T	0,0582459	0,0533389	0,0661168	-	-	-	-	0,02047956	0,0265703
6	3,00	783,9	1,1494	17727	T	0,0577283	0,0528360	0,0655276	-	-	-	-	0,02026914	0,0266050
7	3,50	779,9	1,1435	17636	T	0,0572128	0,0523353	0,0649406	-	-	-	-	0,02005981	0,0266399
8	4,00	775,9	1,1376	17545	T	0,0566992	0,0518368	0,0643559	-	-	-	-	0,01985157	0,0266751
9	4,50	771,8	1,1317	17454	T	0,0561877	0,0513405	0,0637735	-	-	-	-	0,01964441	0,0267105
10	5,00	767,8	1,1258	17363	T	0,0556782	0,0508463	0,0631934	-	-	-	-	0,01943834	0,0267462
11	5,50	763,8	1,1199	17272	T	0,0551708	0,0503544	0,0626155	-	-	-	-	0,01923335	0,0267821
12	6,00	759,8	1,1140	17182	T	0,0546653	0,0498647	0,0620400	-	-	-	-	0,01902945	0,0268183
13	6,50	755,8	1,1081	17091	T	0,0541619	0,0493772	0,0614667	-	-	-	-	0,01882664	0,0268548
14	7,00	751,7	1,1022	17000	T	0,0536606	0,0488919	0,0608956	-	-	-	-	0,01862491	0,0268915
15	7,50	747,7	1,0963	16909	T	0,0531613	0,0484088	0,0603269	-	-	-	-	0,01842428	0,0269285
16	8,00	743,7	1,0904	16818	T	0,0526640	0,0479279	0,0597605	-	-	-	-	0,01822472	0,0269658
17	8,50	739,7	1,0845	16727	T	0,0521688	0,0474492	0,0591963	-	-	-	-	0,01802626	0,0270034
18	9,00	735,7	1,0786	16636	T	0,0516756	0,0469727	0,0586344	-	-	-	-	0,01782888	0,0270412
19	9,50	731,6	1,0727	16545	T	0,0511845	0,0464984	0,0580749	-	-	-	-	0,01763258	0,0270794
20	10,00	727,6	1,0668	16454	T	0,0506954	0,0460264	0,0575176	-	-	-	-	0,01743737	0,0271178
21	10,50	723,6	1,0610	16363	T	0,0502084	0,0455565	0,0569627	-	-	-	-	0,01724325	0,0271565
22	11,00	719,6	1,0551	16272	T	0,0497234	0,0450889	0,0564100	-	-	-	-	0,01705022	0,0271956
23	11,50	715,6	1,0492	16182	T	0,0492405	0,0446235	0,0558597	-	-	-	-	0,01685827	0,0272349
24	12,00	711,5	1,0433	16091	T	0,0487596	0,0441603	0,0553116	-	-	-	-	0,01666741	0,0272745
25	12,50	707,5	1,0374	16000	T	0,0482809	0,0436994	0,0547659	-	-	-	-	0,01647763	0,0273145
26	13,00	703,5	1,0315	15909	T	0,0478041	0,0432407	0,0542226	-	-	-	-	0,01628895	0,0273547
27	13,50	699,5	1,0256	15818	T	0,0473295	0,0427842	0,0536815	-	-	-	-	0,01610134	0,0273953
28	14,00	695,5	1,0197	15727	T	0,0468569	0,0423299	0,0531428	-	-	-	-	0,01591483	0,0274362
29	14,50	691,4	1,0138	15636	T	0,0463864	0,0418779	0,0526063	-	-	-	-	0,01572940	0,0274775
30	15,00	687,4	1,0079	15545	T	0,0459179	0,0414281	0,0520723	-	-	-	-	0,01554506	0,0275190
31	15,50	683,4	1,0020	15454	T	0,0454516	0,0409805	0,0515405	-	-	-	-	0,01536180	0,0275610
32	16,00	679,4	0,9961	15363	T	0,0449873	0,0405352	0,0510112	-	-	-	-	0,01517963	0,0276032
33	16,50	675,4	0,9902	15272	T	0,0445251	0,0400921	0,0504841	-	-	-	-	0,01499855	0,0276458
34	17,00	671,3	0,9843	15182	T	0,0440650	0,0396512	0,0499594	-	-	-	-	0,01481855	0,0276888
35	17,50	667,3	0,9784	15091	T	0,0436069	0,0392126	0,0494370	-	-	-	-	0,01463964	0,0277321

36	18,00	663,3	0,9725	15000	T	0,0431510	0,0387763	0,0489171	-	-	-	-	0,01446182	0,0277758
37	18,50	659,3	0,9666	14909	T	0,0426971	0,0383422	0,0483994	-	-	-	-	0,01428508	0,0278198
38	19,00	655,3	0,9608	14818	T	0,0422454	0,0379103	0,0478841	-	-	-	-	0,01410943	0,0278642
39	19,50	651,2	0,9549	14727	T	0,0417957	0,0374807	0,0473712	-	-	-	-	0,01393486	0,0279091
40	20,00	647,2	0,9490	14636	T	0,0413482	0,0370534	0,0468607	-	-	-	-	0,01376139	0,0279542
41	20,50	643,2	0,9431	14545	T	0,0409027	0,0366283	0,0463525	-	-	-	-	0,01358899	0,0279998
42	21,00	639,2	0,9372	14454	T	0,0404594	0,0362054	0,0458467	-	-	-	-	0,01341769	0,0280458
43	21,50	635,2	0,9313	14363	T	0,0400181	0,0357848	0,0453433	-	-	-	-	0,01324747	0,0280922
44	22,00	631,1	0,9254	14272	T	0,0395790	0,0353665	0,0448423	-	-	-	-	0,01307834	0,0281390
45	22,50	627,1	0,9195	14182	T	0,0391420	0,0349504	0,0443436	-	-	-	-	0,01291029	0,0281862
46	23,00	623,1	0,9136	14091	T	0,0387071	0,0345367	0,0438474	-	-	-	-	0,01274333	0,0282339
47	23,50	619,1	0,9077	14000	T	0,0382743	0,0341251	0,0433535	-	-	-	-	0,01257746	0,0282819
48	24,00	615,1	0,9018	13909	T	0,0378436	0,0337159	0,0428621	-	-	-	-	0,01241267	0,0283304
49	24,50	611,0	0,8959	13818	T	0,0374151	0,0333089	0,0423730	-	-	-	-	0,01224897	0,0283794
50	25,00	607,0	0,8900	13727	T	0,0369887	0,0329042	0,0418864	-	-	-	-	0,01208636	0,0284288
51	25,50	603,0	0,8841	13636	T	0,0365644	0,0325018	0,0414022	-	-	-	-	0,01192483	0,0284786
52	26,00	599,0	0,8782	13545	T	0,0361422	0,0321016	0,0409204	-	-	-	-	0,01176439	0,0285290
53	26,50	595,0	0,8723	13454	T	0,0357222	0,0317038	0,0404410	-	-	-	-	0,01160504	0,0285797
54	27,00	590,9	0,8664	13363	T	0,0353044	0,0313082	0,0399640	-	-	-	-	0,01144677	0,0286310
55	27,50	586,9	0,8606	13272	T	0,0348886	0,0309149	0,0394894	-	-	-	-	0,01128959	0,0286828
56	28,00	582,9	0,8547	13182	T	0,0344750	0,0305239	0,0390173	-	-	-	-	0,01113350	0,0287351
57	28,50	578,9	0,8488	13091	T	0,0340636	0,0301351	0,0385476	-	-	-	-	0,01097849	0,0287878
58	29,00	574,9	0,8429	13000	T	0,0336543	0,0297487	0,0380804	-	-	-	-	0,01082457	0,0288411
59	29,50	570,8	0,8370	12909	T	0,0332472	0,0293646	0,0376156	-	-	-	-	0,01067173	0,0288949
60	30,00	566,8	0,8311	12818	T	0,0328422	0,0289828	0,0371533	-	-	-	-	0,01051998	0,0289492
61	30,50	562,8	0,8252	12727	T	0,0324394	0,0286032	0,0366934	-	-	-	-	0,01036932	0,0290041
62	31,00	558,8	0,8193	12636	T	0,0320387	0,0282260	0,0362359	-	-	-	-	0,01021975	0,0290596
63	31,50	554,8	0,8134	12545	T	0,0316402	0,0278511	0,0357809	-	-	-	-	0,01007126	0,0291155
64	32,00	550,7	0,8075	12454	T	0,0312439	0,0274785	0,0353284	-	-	-	-	0,00992385	0,0291721
65	32,50	546,7	0,8016	12363	T	0,0308498	0,0271082	0,0348784	-	-	-	-	0,00977754	0,0292292
66	33,00	542,7	0,7957	12273	T	0,0304578	0,0267402	0,0344308	-	-	-	-	0,00963231	0,0292870
67	33,50	538,7	0,7898	12182	T	0,0300680	0,0263745	0,0339857	-	-	-	-	0,00948816	0,0293453
68	34,00	534,7	0,7839	12091	T	0,0296804	0,0260111	0,0335431	-	-	-	-	0,00934511	0,0294042
69	34,50	530,6	0,7780	12000	T	0,0292950	0,0256501	0,0331030	-	-	-	-	0,00920314	0,0294638
70	35,00	526,6	0,7721	11909	T	0,0289118	0,0252914	0,0326654	-	-	-	-	0,00906225	0,0295240
71	35,50	522,6	0,7662	11818	T	0,0285307	0,0249350	0,0322303	-	-	-	-	0,00892245	0,0295849
72	36,00	518,6	0,7604	11727	T	0,0281519	0,0245809	0,0317977	-	-	-	-	0,00878374	0,0296464
73	36,50	514,6	0,7545	11636	T	0,0277752	0,0242292	0,0313676	-	-	-	-	0,00864612	0,0297085
74	37,00	510,5	0,7486	11545	T	0,0274008	0,0238798	0,0309400	-	-	-	-	0,00850958	0,0297714
75	37,50	506,5	0,7427	11454	T	0,0270286	0,0235327	0,0305149	-	-	-	-	0,00837413	0,0298349
76	38,00	502,5	0,7368	11363	T	0,0266586	0,0231880	0,0300923	-	-	-	-	0,00823976	0,0298992
77	38,50	498,5	0,7309	11273	T	0,0262907	0,0228456	0,0296723	-	-	-	-	0,00810648	0,0299642
78	39,00	494,5	0,7250	11182	T	0,0259252	0,0225056	0,0292548	-	-	-	-	0,00797429	0,0300299

79	39,50	490,4	0,7191	11091	T	0,0255618	0,0221679	0,0288399	-	-	-	-	0,00784319	0,0300964
80	40,00	486,4	0,7132	11000	T	0,0252006	0,0218326	0,0284274	-	-	-	-	0,00771317	0,0301637
81	40,50	482,4	0,7073	10909	T	0,0248417	0,0214996	0,0280176	-	-	-	-	0,00758423	0,0302317
82	41,00	478,4	0,7014	10818	T	0,0244851	0,0211689	0,0276103	-	-	-	-	0,00745639	0,0303005
83	41,50	474,4	0,6955	10727	T	0,0241306	0,0208407	0,0272055	-	-	-	-	0,00732963	0,0303702
84	42,00	470,3	0,6896	10636	T	0,0237784	0,0205147	0,0268033	-	-	-	-	0,00720395	0,0304407
85	42,50	466,3	0,6837	10545	T	0,0234284	0,0201912	0,0264037	-	-	-	-	0,00707937	0,0305120
86	43,00	462,3	0,6778	10454	T	0,0230807	0,0198700	0,0260067	-	-	-	-	0,00695586	0,0305842
87	43,50	458,3	0,6719	10363	T	0,0227353	0,0195512	0,0256122	-	-	-	-	0,00683345	0,0306573
88	44,00	454,3	0,6660	10273	T	0,0223921	0,0192348	0,0252203	-	-	-	-	0,00671212	0,0307313
89	44,50	450,2	0,6601	10182	T	0,0220511	0,0189207	0,0248310	-	-	-	-	0,00659188	0,0308062
90	45,00	446,2	0,6543	10091	T	0,0217125	0,0186090	0,0244444	-	-	-	-	0,00647273	0,0308821
91	45,50	442,2	0,6484	10000	T	0,0213760	0,0182998	0,0240603	-	-	-	-	0,00635466	0,0309589
92	46,00	438,2	0,6425	9909	T	0,0210419	0,0179928	0,0236788	-	-	-	-	0,00623768	0,0310367
93	46,50	434,2	0,6366	9818	T	0,0207100	0,0176883	0,0232999	-	-	-	-	0,00612178	0,0311155
94	47,00	430,1	0,6307	9727	T	0,0203805	0,0173862	0,0229237	-	-	-	-	0,00600697	0,0311953
95	47,50	426,1	0,6248	9636	T	0,0200532	0,0170865	0,0225501	-	-	-	-	0,00589325	0,0312762
96	48,00	422,1	0,6189	9545	T	0,0197282	0,0167891	0,0221791	-	-	-	-	0,00578061	0,0313582
97	48,50	418,1	0,6130	9454	T	0,0194055	0,0164942	0,0218108	-	-	-	-	0,00566906	0,0314413
98	49,00	414,1	0,6071	9363	T	0,0190850	0,0162017	0,0214451	-	-	-	-	0,00555860	0,0315255
99	49,50	410,0	0,6012	9273	T	0,0187669	0,0159116	0,0210821	-	-	-	-	0,00544922	0,0316109
100	50,00	406,0	0,5953	9182	T	0,0184511	0,0156239	0,0207217	-	-	-	-	0,00534093	0,0316974
101	50,50	402,0	0,5894	9091	T	0,0181376	0,0153386	0,0203640	-	-	-	-	0,00523373	0,0317851
102	51,00	398,0	0,5835	9000	T	0,0178265	0,0150557	0,0200090	-	-	-	-	0,00512761	0,0318741
103	51,50	394,0	0,5776	8909	T	0,0175176	0,0147753	0,0196566	-	-	-	-	0,00502258	0,0319644
104	52,00	389,9	0,5717	8818	T	0,0172111	0,0144973	0,0193070	-	-	-	-	0,00491864	0,0320559
105	52,50	385,9	0,5658	8727	T	0,0169069	0,0142217	0,0189600	-	-	-	-	0,00481578	0,0321488
106	53,00	381,9	0,5599	8636	T	0,0166050	0,0139486	0,0186157	-	-	-	-	0,00471401	0,0322430
107	53,50	377,9	0,5541	8545	T	0,0163055	0,0136779	0,0182741	-	-	-	-	0,00461332	0,0323387
108	54,00	373,9	0,5482	8454	T	0,0160083	0,0134096	0,0179353	-	-	-	-	0,00451373	0,0324357
109	54,50	369,8	0,5423	8363	T	0,0157135	0,0131438	0,0175992	-	-	-	-	0,00441521	0,0325342
110	55,00	365,8	0,5364	8273	T	0,0154210	0,0128804	0,0172658	-	-	-	-	0,00431779	0,0326343
111	55,50	361,8	0,5305	8182	T	0,0151309	0,0126195	0,0169351	-	-	-	-	0,00422145	0,0327358
112	56,00	357,8	0,5246	8091	T	0,0148432	0,0123611	0,0166072	-	-	-	-	0,00412620	0,0328390
113	56,50	353,8	0,5187	8000	T	0,0145578	0,0121051	0,0162820	-	-	-	-	0,00403203	0,0329438
114	57,00	349,7	0,5128	7909	T	0,0142748	0,0118516	0,0159596	-	-	-	-	0,00393895	0,0330502
115	57,50	345,7	0,5069	7818	T	0,0139941	0,0116005	0,0156400	-	-	-	-	0,00384696	0,0331583
116	58,00	341,7	0,5010	7727	T	0,0137159	0,0113519	0,0153231	-	-	-	-	0,00375605	0,0332682
117	58,50	337,7	0,4951	7636	T	0,0134400	0,0111058	0,0150090	-	-	-	-	0,00366623	0,0333799
118	59,00	333,7	0,4892	7545	T	0,0131666	0,0108622	0,0146977	-	-	-	-	0,00357750	0,0334935
119	59,50	329,6	0,4833	7454	T	0,0128955	0,0106211	0,0143892	-	-	-	-	0,00348985	0,0336089
120	60,00	325,6	0,4774	7364	T	0,0126268	0,0103825	0,0140836	-	-	-	-	0,00340329	0,0337263
121	60,50	321,6	0,4715	7273	T	0,0123606	0,0101463	0,0137807	-	-	-	-	0,00331781	0,0338456

122	61,00	317,6	0,4656	7182	T	0,0120967	0,0099127	0,0134806	-	-	-	-	0,00323343	0,0339670
123	61,50	313,6	0,4597	7091	T	0,0118353	0,0096816	0,0131834	-	-	-	-	0,00315012	0,0340905
124	62,00	309,5	0,4539	7000	T	0,0115763	0,0094529	0,0128891	-	-	-	-	0,00306791	0,0342162
125	62,50	305,5	0,4480	6909	T	0,0113197	0,0092268	0,0125976	-	-	-	-	0,00298678	0,0343441
126	63,00	301,5	0,4421	6818	T	0,0110656	0,0090033	0,0123089	-	-	-	-	0,00290674	0,0344742
127	63,50	297,5	0,4362	6727	T	0,0108139	0,0087822	0,0120232	-	-	-	-	0,00282778	0,0346067
128	64,00	293,5	0,4303	6636	T	0,0105646	0,0085637	0,0117403	-	-	-	-	0,00274991	0,0347416
129	64,50	289,4	0,4244	6545	T	0,0103177	0,0083477	0,0114603	-	-	-	-	0,00267313	0,0348789
130	65,00	285,4	0,4185	6454	T	0,0100733	0,0081342	0,0111832	-	-	-	-	0,00259743	0,0350187
131	65,50	281,4	0,4126	6364	T	0,0098314	0,0079233	0,0109090	-	-	-	-	0,00252282	0,0351611
132	66,00	277,4	0,4067	6273	T	0,0095919	0,0077150	0,0106377	-	-	-	-	0,00244930	0,0353061
133	66,50	273,4	0,4008	6182	T	0,0093549	0,0075092	0,0103694	-	-	-	-	0,00237686	0,0354538
134	67,00	269,3	0,3949	6091	T	0,0091203	0,0073059	0,0101040	-	-	-	-	0,00230551	0,0356042
135	67,5	265,3	0,3890	6000	T	0,0088882	0,0071053	0,0098416	-	-	-	-	0,00223525	0,0357575
136	68,0	261,3	0,3831	5909	T	0,0086585	0,0069072	0,0095821	-	-	-	-	0,00216607	0,0359135
137	68,5	257,3	0,3772	5818	T	0,0084313	0,0067117	0,0093256	-	-	-	-	0,00209798	0,0360725
138	69,0	253,3	0,3713	5727	T	0,0082065	0,0065188	0,0090721	-	-	-	-	0,00203098	0,0362344
139	69,5	249,2	0,3654	5636	T	0,0079842	0,0063284	0,0088216	-	-	-	-	0,00196506	0,0363992
140	70,0	245,2	0,3595	5545	T	0,0077643	0,0061407	0,0085741	-	-	-	-	0,00190023	0,0365669
141	70,5	241,2	0,3537	5454	T	0,0075469	0,0059556	0,0083297	-	-	-	-	0,00183648	0,0367377
142	71,0	237,2	0,3478	5364	T	0,0073320	0,0057730	0,0080882	-	-	-	-	0,00177382	0,0369114
143	71,5	233,2	0,3419	5273	T	0,0071194	0,0055931	0,0078499	-	-	-	-	0,00171225	0,0370880
144	72,0	229,1	0,3360	5182	T	0,0069093	0,0054158	0,0076146	-	-	-	-	0,00165177	0,0372674
145	72,5	225,1	0,3301	5091	T	0,0067016	0,0052412	0,0073823	-	-	-	-	0,00159237	0,0374496
146	73,0	221,1	0,3242	5000	T	0,0064963	0,0050692	0,0071532	-	-	-	-	0,00153405	0,0376344
147	73,5	217,1	0,3183	4909	T	0,0062934	0,0048998	0,0069271	-	-	-	-	0,00147683	0,0378216
148	74,0	213,1	0,3124	4818	T	0,0060928	0,0047331	0,0067042	-	-	-	-	0,00142069	0,0380110
149	74,5	209,0	0,3065	4727	T	0,0058946	0,0045690	0,0064844	-	-	-	-	0,00136563	0,0382021
150	75,0	205,0	0,3006	4636	T	0,0056986	0,0044076	0,0062677	-	-	-	-	0,00131167	0,0383947
151	75,5	201,0	0,2947	4545	T	0,0055049	0,0042489	0,0060543	-	-	-	-	0,00125879	0,0385880
152	76,0	197,0	0,2888	4454	T	0,0053134	0,0040929	0,0058440	-	-	-	-	0,00120699	0,0387814
153	76,5	193,0	0,2829	4364	T	0,0051241	0,0039395	0,0056368	-	-	-	-	0,00115628	0,0389739
154	77,0	188,9	0,2770	4273	T	0,0049368	0,0037889	0,0054329	-	-	-	-	0,00110666	0,0391646
155	77,5	184,9	0,2711	4182	T	0,0047516	0,0036409	0,0052323	-	-	-	-	0,00105813	0,0393518
						4,3644283	3,8538714	4,9309109	-	-	-	4,78223	1,40459	
156	78,0	180,9	0,2652	4091	T	0,0045683	0,0034957	0,0050348	-	-	-	-	0,00101068	0,0395338
157	78,5	176,9	0,2593	4000	Tr	0,0043868	0,0033532	0,0048407	-	-	-	-	0,00096432	0,0397083
158	79,0	172,9	0,2535	3909	Tr	0,0042070	0,0032134	0,0046498	-	-	-	-	0,00091904	0,0398726
159	79,5	168,8	0,2476	3818	Tr	0,0040287	0,0030764	0,0044622	-	-	-	-	0,00087485	0,0400232
160	80,0	164,8	0,2417	3727	Tr	0,0038519	0,0029421	0,0042779	-	-	-	-	0,00083175	0,0401555
161	80,5	160,8	0,2358	3636	Tr	0,0036762	0,0028106	0,0040970	-	-	-	-	0,00078974	0,0402642
162	81,0	156,8	0,2299	3545	Tr	0,0035014	0,0026819	0,0039195	-	-	-	-	0,00074881	0,0403424
163	81,5	152,8	0,2240	3454	Tr	0,0033274	0,0025559	0,0037453	-	-	-	-	0,00070896	0,0403814

164	82,0	148,7	0,2181	3364	Tr	0,0031537	0,0024327	0,0035745	-	-	-	-	0,00067021	0,0403708
165	82,5	144,7	0,2122	3273	Tr	0,0029801	0,0023124	0,0034072	-	-	-	-	0,00063254	0,0402971
166	83,0	140,7	0,2063	3182	Tr	0,0028062	0,0021948	0,0032433	-	-	-	-	0,00059595	0,0401441
167	83,5	136,7	0,2004	3091	Tr	0,0026315	0,0020801	0,0030828	-	-	-	-	0,00056046	0,0398919
168	84,0	132,7	0,1945	3000	Tr	0,0024556	0,0019682	0,0029259	-	-	-	-	0,00052605	0,0395160
169	84,5	128,6	0,1886	2909	Tr	0,0022782	0,0018592	0,0027725	-	-	-	-	0,00049272	0,0389880
170	85,0	124,6	0,1827	2818	Tr	0,0020989	0,0017530	0,0026227	-	-	-	-	0,00046048	0,0382752
171	85,5	120,6	0,1768	2727	Tr	0,0019178	0,0016497	0,0024764	-	-	-	-	0,00042933	0,0373431
172	86,0	116,6	0,1709	2636	Tr	0,0017354	0,0015493	0,0023338	-	-	-	-	0,00039927	0,0361614
173	86,5	112,6	0,1650	2545	Tr	0,0015533	0,0014519	0,0021948	-	-	-	-	0,00037029	0,0347201
174	87,0	108,5	0,1591	2455	Tr	0,0013757	0,0013573	0,0020594	-	-	-	-	0,00034240	0,0330698
175	87,5	104,5	0,1532	2364	Tr	0,0012117	0,0012657	0,0019278	-	-	-	-	0,00031559	0,0314125
176	88,0	100,5	0,1474	2273	Tr	0,0010776	0,0011770	0,0017999	-	-	-	-	0,00028987	0,0302148
177	88,5	96,5	0,1415	2182	Tr	0,0009862	0,0010913	0,0016758	-	-	-	-	0,00026524	0,0300059
178	89,0	92,5	0,1356	2091	Tr	0,0009284	0,0010086	0,0015556	-	-	-	-	0,00024169	0,0307568
						0,0517830	0,0424316	0,0628042	-	-	-	0,06348	0,01344	
179	89,5	88,4	0,1297	2000	L	0,0008844	0,0009289	0,0014391	-	-	-	-	0,00021923	0,0320225
180	90,0	84,4	0,1238	1909	L	0,0008437	0,0008522	0,0013266	-	-	-	-	0,00019786	0,0335266
181	90,5	80,4	0,1179	1818	L	0,0008035	0,0007786	0,0012181	-	-	-	-	0,00017758	0,0352008
182	91,0	76,4	0,1120	1727	L	0,0007633	0,0007080	0,0011135	-	-	-	-	0,00015837	0,0370533
183	91,5	72,4	0,1061	1636	L	0,0007231	0,0006405	0,0010130	-	-	-	-	0,00014026	0,0391118
184	92,0	68,3	0,1002	1545	L	0,0006829	0,0005762	0,0009165	-	-	-	-	0,00012323	0,0414125
185	92,5	64,3	0,0943	1455	L	0,0006428	0,0005150	0,0008243	-	-	-	-	0,00010729	0,0440008
186	93,0	60,3	0,0884	1364	L	0,0006026	0,0004570	0,0007362	-	-	-	-	0,00009244	0,0469342
187	93,5	56,3	0,0825	1273	L	0,0005624	0,0004022	0,0006525	-	-	-	-	0,00007867	0,0502866
188	94,0	52,3	0,0766	1182	L	0,0005223	0,0003506	0,0005731	-	-	-	-	0,00006599	0,0541548
189	94,5	48,2	0,0707	1091	L	0,0004821	0,0003023	0,0004982	-	-	-	-	0,00005439	0,0586677
190	95,0	44,2	0,0648	1000	L	0,0004419	0,0002573	0,0004279	-	-	-	-	0,00004389	0,0640012
191	95,5	40,2	0,0589	909	L	0,0004017	0,0002157	0,0003621	-	-	-	-	0,00003446	0,0704013
192	96,0	36,2	0,0530	818	L	0,0003616	0,0001774	0,0003012	-	-	-	-	0,00002613	0,0782236
193	96,5	32,2	0,0472	727	L	0,0003214	0,0001427	0,0002451	-	-	-	-	0,00001888	0,0880016
194	97,0	28,1	0,0413	636	L	0,0002812	0,0001114	0,0001940	-	-	-	-	0,00001272	0,1005732
195	97,5	24,1	0,0354	545	L	0,0002410	0,0000837	0,0001481	-	-	-	-	0,00000764	0,1173355
196	98,0	20,1	0,0295	455	L	0,0002009	0,0000597	0,0001077	-	-	-	-	0,00000365	0,1408025
197	98,5	16,1	0,0236	364	L	0,0001607	0,0000395	0,0000729	-	-	-	-	0,00000075	0,1760032
198	99,0	12,1	0,0177	273	L	0,0001205	0,0000232	0,0000440	-	-	-	-	0,00000107	0,2346709
199	99,5	8,0	0,0118	182	L	0,0000803	0,0000109	0,0000217	-	-	-	-	0,00000180	0,3520064
200	100,0	4,0	0,0059	91	L	0,0000402	0,0000030	0,0000064	-	-	-	-	0,00000144	0,7040127
						0,0101645	0,0076361	0,0122422				0,00644	0,00156	0,0412632
						4,426	3,904	5,006	4,053	4,444	5,016	6,264	1,420	

¹Numero de cada gotejador. ²Posição referente a cada gotejador com espaçamento de 0,5 m cada. ³Vazão da linha ($L \cdot h^{-1}$). ⁴Velocidade de escoamento ($m \cdot s^{-1}$). ⁵Numero de Reynolds (adimensional). ⁶Regime de escoamento (T – turbulento; Tr – transição; L – laminar). ⁷Perda de carga estimada pela equação universal trecho a trecho. ⁸Perda de carga estimada pela equação de Hazen-Williams trecho a trecho. ⁹Perda de carga estimada pela equação de Flamant trecho a trecho. ¹⁰Perda de carga estimada pela equação universal aplicando fator de múltiplas saídas de Christiansen. ¹¹Perda de carga estimada pela equação de Hazen-Williams aplicando fator de múltiplas saídas de Christiansen. ¹²Perda de carga estimada pela equação de Flamant aplicando fator de múltiplas saídas de Christiansen. ¹³Perda de carga observada pelo aparelho Datalogger desenvolvido. ¹⁴Perda de carga localizada de cada gotejador. ¹⁵Fator de atrito obtido pela equação de Swamee.