

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

Perda de carga em tubos gotejadores colapsáveis para microirrigação

Verônica Gaspar Martins Leite de Melo

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2020**

Verônica Gaspar Martins Leite de Melo
Engenheira Agrônoma

Perda de carga em tubos gotejadores colapsáveis para microirrigação
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011.

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ ANTÔNIO FRIZZONE**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2020

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Melo, Verônica Gaspar Martins Leite de

Perda de carga em tubos gotejadores colapsáveis para microirrigação /
Verônica Gaspar Martins Leite de Melo.- - versão revisada de acordo com a
resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2020.

68 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de
Queiroz”.

1. Hidráulica de tubo gotejador 2. Tubos colapsáveis 3. Fator de atrito 4.
Pressão de operação 5. Variação do diâmetro I. Título

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente ao meu criador, por ser essencial em minha vida. Ao meu marido Leonardo por todo apoio, carinho e motivação. Aos meus pais Eleuse e Itamar e minha avó Neusa que com muito carinho e apoio não mediram esforços para que eu chegasse a essa etapa da minha vida. Ao grande Professor José Antônio Frizzone por toda orientação e apoio imprescindíveis para a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor José Antônio Frizzone pela oportunidade de realizar este trabalho ao lado de um pesquisador que nos inspira todos os dias pela busca do conhecimento, detentor do meu eterno respeito e admiração, pelo seu dom de extrair o melhor de cada orientado e pela sua grande humildade, inibindo sempre a vaidade em prol do compartilhamento da ciência. Ao meu marido Leonardo por sempre ser o motivador e torcedor de todos os meus sonhos. Aos meus pais Eleuse e Itamar por todo apoio, carinho e esforços que me permitiram chegar até esta etapa. A minha amada avó Neusa sempre presente em minha vida.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa, a qual permite ocorrer a expansão e consolidação da pós-graduação no país.

Ao Professor Antônio Pires de Camargo por todo apoio, ensinamentos e paciência. A Professora Patrícia Angélica Alves Marques por todo apoio, inspiração e carinho.

Ao colega Wagner Wilson Ávila Bombrdelli pelo apoio, aprendizado compartilhado e significativas colaborações.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP) e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, que garantiram as condições necessárias para realização desta pesquisa. A todos os funcionários da ESALQ por todo apoio e dedicação ao setor público.

EPÍGRAFE

“A persistência é o caminho do êxito.”

Charles Chaplin

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE QUADROS	12
LISTA DE SÍMBOLOS	13
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Irrigação por gotejamento	19
2.2 Emissores	20
2.3 Balanço de energia	22
2.4 Perda de carga	23
2.4.1 Escoamento viscoso em condutos forçados – Número de Reynolds	24
2.4.2 Perda de carga total	26
2.4.3 Perda contínua de carga	27
2.4.4 Perda localizada de carga	28
2.4.5 Perda de carga em tubos de polietileno colapsáveis	29
2.5 Fator de atrito	32
2.6 Teste de aderência	34
3 MATERIAL E MÉTODOS	36
3.1 Material avaliado	36
3.1.1 Tubos gotejadores colapsáveis com labirintos contínuos integrados à parede interna do tubo	36
3.1.2 Tubo gotejador com emissores moldados na parede interna do tubo	37
3.2 Estrutura dos ensaios hidráulicos	37
3.3 Análise dos dados	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1 Tubos gotejadores colapsáveis com labirintos contínuos integrados à parede interna do tubo	44
4.2 Tubo gotejador com emissores moldados na parede interna do tubo	56
5 CONCLUSÕES	63
REFERÊNCIAS	65

RESUMO

Perda de carga em tubos gotejadores colapsáveis para microirrigação

O objetivo deste trabalho foi investigar experimentalmente o fator de atrito e a perda de carga em tubos gotejadores colapsáveis com distintos dispositivos emissores operando sob diferentes pressões. Esse tipo de material vem ganhando mercado na irrigação de hortaliças e de outras culturas de ciclo curto, especialmente devido ao baixo custo. Utilizaram-se amostras de tubos colapsáveis com emissores contínuos soldados e emissores moldados na parede interna do tubo. Para determinar as equações de perda carga, utilizaram-se amostras de tubo com emissores vedados. Ajustaram-se equações em função da vazão e da carga de pressão na entrada do tubo e, alternativamente, ajustou-se a equação de Darcy-Weisbach, com o diâmetro expresso em função da carga de pressão por um modelo potencial. Analisou-se também a possibilidade de se utilizar um diâmetro médio na equação de Darcy-Weisbach. A investigação experimental indicou que o fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach pode ser acuradamente descrito usando uma relação potência, semelhante à equação de Blasius, mas caracterizada por um coeficiente $a = 0,3442$ para o tubo Turbo Tape, e $a = 0,3225$ para o tubo Silver Tape. Para o tubo gotejador Rain-Tape, com emissores moldados, o fator de atrito calculado pela equação de Blasius deve considerar um coeficiente angular $a = 0,3408$. Para os modelos estudados, a influência da carga de pressão no diâmetro, para efeitos de cálculo da perda de carga, é pequena e pode ser desconsiderada. As duas abordagens, considerando a variação do diâmetro com a carga de pressão e considerando um diâmetro médio ótimo para o cálculo da perda de carga pela equação de Darcy-Weisbach, produzem resultados semelhantes, permitindo estimativas com erros negligenciáveis. Para os três modelos de tubos, os erros relativos em 95% das estimativas de perda de carga foram menores que 6,16%. Para o Turbo Tape, o diâmetro ótimo para fins de cálculo da perda de carga é 16,01 mm, sendo que o fabricante indica um valor de 15,9 mm. Já para o Silver Tape o diâmetro ótimo é 15,71 mm, enquanto o fabricante declara 16,22 mm. Para o Rain-Tape, o diâmetro ótimo é 16,40 mm, sendo que o fabricante indica 16,00 mm.

Palavras-chave: Hidráulica de tubo gotejador, Tubos colapsáveis, Fator de atrito, Pressão de operação, Variação do diâmetro

ABSTRACT

Head loss in thin-walled emitting-pipes for microirrigation

The objective of this work was to investigate experimentally the friction factor and the head loss on thin-walled drip tapes with different emitting devices, operated under various pressures. Thin-walled drip tapes have been used for irrigation of vegetables and other short-cycle crops, especially due to their low cost. Models of commercial thin-walled drip tapes with continuous and molded labyrinths were evaluated. Non-perforated samples were used to determine the head-loss equations. The equations were adjusted as a function of flow rate and pressure head at the pipe inlet. Alternatively, the diameter in the Darcy-Weisbach equation was adjusted as a function of the pressure head by a power-law model. The possibility of using a mean diameter in the Darcy-Weisbach equation was also analyzed. Experimental investigation indicated that the friction factor in the Darcy-Weisbach equation can be accurately described using a power-law model, like the Blasius equation, but characterized by a coefficient $a = 0,3442$ for the Turbo Tape and $a = 0,3225$ for the Silver Tape. For Rain-Tape drip with molded emitters, the friction factor calculated by the Blasius equation can consider a coefficient $a = 0,3408$. The obtained values of a are larger than those generally used and available in the literature. The influence of the operating pressure on the pipe diameter can be neglected for the purpose of calculating the head loss. The two approaches, considering the variation of the diameter with the pressure head and considering an optimum average diameter for the calculation of head loss by the Darcy-Weisbach equation, produce similar results, allowing accurate prediction of head loss. Evaluating the proposed mathematical models, 95% of predictions presented relative errors of head loss smaller than 5%. For the Turbo Tape, the optimum diameter for the purpose of calculating the head loss is 16,01 mm, which is very close to the value indicated by its manufacturer (15,9 mm). For the Silver Drip, the optimum diameter is 15,71 mm, while the manufacturer gives a value of 16,22 mm. For Rain-Tape drip the optimum diameter is 16,4 mm, while the manufacturer gives a value of 16,0 mm.

Keywords: Thin-walled pipe hydraulics, Lay-flat drip, Friction factor, Operating pressure, Diameter variation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática da arquitetura do emissor soldado na parede interna do tubo (A) Turbo Tape (B) Silver Drip.....	36
Figura 2 – Representação esquemática da arquitetura do emissor moldado à parede interna do tubo Rain-Tape.....	37
Figura 3 – Representação esquemática da bancada automatizada utilizada nos ensaios de perda de carga. (1) Reservatório de água; (2) Conjunto moto-bomba; (3) Inversor de frequência; (4) Medidor eletromagnético de vazão; (5) Transmissor de temperatura; (6) Registro by-pass; (7) Transmissor de pressão de entrada; (8) Transmissor de pressão diferencial; (9) Material avaliado; (10) Tomadas de pressão a montante (a) e a jusante (b); (11) Válvula de retorno.....	39
Figura 4 – Concordância entre perdas de carga observadas e estimadas (A) para o modelo Turbo Tape (Eq. 15); (B) para o modelo Silver Drip (Eq. 16); Gráfico de análise de erros apresentando erros relativos em função da frequência de ocorrência (C) para o modelo Turbo Tape (Eq. 15); e (D) para o modelo Silver Drip (Eq.16)	46
Figura 5 – Fator de atrito (f) ajustado com $b = 0,25$; (A) para o modelo Turbo Tape, e (B) para o modelo Silver Drip	48
Figura 6 – Concordância entre perdas de carga observadas e estimadas (A) para o modelo Turbo Tape (Eq. 19); (B) para o modelo Silver Drip (Eq. 20); Gráfico de análise de erros apresentando erros relativos em função da frequência de ocorrência; (C) para o modelo Turbo Tape e (D) para o modelo Silver Drip	50
Figura 7 – Concordância entre perdas de carga observadas e estimadas (A) para o Turbo Tape (Eq. 19), com diâmetro médio $D = 16,01$ mm; (B) para o Silver Drip (Eq. 20), com diâmetro médio $D = 15,71$ mm. Gráfico de análise de erros relativos em função da frequência de ocorrência (C) para o modelo Turbo Tape; e (D) para o modelo Silver Drip	51
Figura 8 – Concordância entre perdas de carga observadas e estimadas com diâmetro informado pelo fabricante (A) Turbo Tape com $D = 15,9$ mm (Eq. 19); e (B) Silver Drip com $D = 16,22$ mm (Eq. 20); Gráfico de análise de erros relativos em função da frequência de ocorrência (C) para o modelo Turbo Tape; e (D) para o modelo Silver Drip	53
Figura 9 – J ($m\ m^{-1}$) estimado (Eq. 14) com o valor de a obtido experimentalmente ($a = 0,3442$ para Turbo tape; e $a = 0,3225$ para Silver Drip) e J estimado para tubos lisos colapsáveis por Provenzano et al. (2016) ($a = 0,285$) em função da velocidade de escoamento V ($m\ s^{-1}$)	55
Figura 10 – Perda de carga causada pelo emissor contínuo (ΔJ) ($m\ m^{-1}$) em função da carga cinética ($V^2/2g$) (m); (A) para o modelo Turbo Tape e (B) para o modelo Silver Drip	56
Figura 11 – Concordância entre perdas de carga observadas e perdas de carga estimadas pela equação ajustada (Eq. 21) para o tubo Rain-Tape	58
Figura 12 – Fatores de atrito (f) experimentais ajustados com $b = 0,25$ para o tubo Rain-Tape	58
Figura 13 – Concordância entre perdas de carga observadas e perdas de carga calculadas pela equação ajustada (Eq. 22) para o tubo Rain-Tape	59
Figura 14 – Concordância entre perdas de carga observadas e estimadas (Eq. 22), com diâmetro médio $D = 16,4$ mm para o tubo Rain-Tape	60
Figura 15 – Concordância entre perdas de carga observadas e estimadas (Eq. 22), com diâmetro informado pelo fabricante $D = 16$ mm para o tubo Rain-Tape	60
Figura 16 – J ($m\ m^{-1}$) estimado (Eq. 22) com o valor de a obtido experimentalmente ($a = 0,3408$) e J estimado para tubos lisos colapsáveis por Provenzano et al. (2016) ($a = 0,285$) em função da velocidade de escoamento ($m\ s^{-1}$) para o tubo Rain-Tape	62

Figura 17 – Perda de carga causada pelo emissor moldado (ΔJ) ($m\ m^{-1}$) em função da carga cinética ($V^2/2g$) (m) para o tubo Rain-Tape62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comprimentos máximos calculados para linhas laterais com tubos gotejadores Turbo Tape (TT) e Silver Drip (SD), para diferentes valores de a relatados na literatura com $b = 0,25$, utilizando diâmetros médios estimados e equação de Darcy-Weisbach.....	54
Tabela 2 – Comprimentos máximos calculados para linhas laterais para o tubo gotejador Rain-Tape, para diferentes valores de a relatados na literatura com $b = 0,25$, utilizando diâmetro médio estimado e equação de Darcy-Weisbach.....	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características operacionais dos tubos gotejadores com emissores contínuos utilizados nos ensaios	36
Quadro 2 – Características operacionais do tubo gotejador com emissor moldado utilizado nos ensaios	37
Quadro 3 – Equações de perda de carga unitária ($m\ m^{-1}$) em função da vazão ($m^3\ s^{-1}$), para os tubos Turbo Tape (TT) ($\xi = 150\ \mu m$) e Silver Drip (SD) ($\xi = 200\ \mu m$)	44
Quadro 4 – Equações de perda de carga unitária ($m\ m^{-1}$) em função vazão ($m^3\ s^{-1}$) para o tubo Rain-Tape	57

LISTA DE SÍMBOLOS

- c: expoente da relação potencial diâmetro vs carga de pressão;
- D: diâmetro do tubo (m);
- d: coeficiente da relação potencial diâmetro vs carga de pressão;
- f: fator de atrito (adimensional);
- g: aceleração da gravidade ($m\ s^{-2}$);
- H - carga de pressão na entrada do tubo (mca);
- hf : perda de carga (mca);
- hfl – perda localizada de carga (mca);
- J: perda de carga unitária ($m\ m^{-1}$);
- ΔJ : perda de carga causada pelo emissor contínuo ($m\ m^{-1}$);
- m: expoente da velocidade (ou da vazão) na equação de perda de carga;
- n: expoente do diâmetro interno da tubulação na equação de perda de carga;
- P: pressão nominal de operação (kPa);
- k: coeficiente de ajuste da equação experimental de perda de carga;
- K_L : coeficiente de carga cinética (adimensional);
- K' : coeficiente angular obtido pela regressão entre valores de ΔJ e $V^2/2g$;
- L: comprimento da canalização (m);
- $L_{m\acute{a}x}$: comprimento máximo da linha lateral (m);
- P/γ : energia de pressão (m);
- Q: vazão ($m^3\ s^{-1}$);
- q: vazão nominal do orifício ($L\ h^{-1}$);
- r^2 : coeficiente de determinação;
- R: número de Reynolds (adimensional);
- R_H : raio hidráulico (m);
- S: espaçamento entre orifícios (m);
- T: temperatura da água ($^{\circ}C$);
- V: velocidade média de escoamento ($m\ s^{-1}$);
- $V^2/2g$: energia cinética (m);
- Z: energia potencial (m);
- α : coeficiente, menor que zero, que expressa o efeito da carga de pressão sobre diâmetro interno do tubo;

ρ : massa específica do fluido (kg m^{-3});

μ : viscosidade dinâmica da água ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$);

ν : viscosidade cinemática da água ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$);

ε : rugosidade da superfície interna do tubo (m);

β' : constante que combina coeficientes de unidades, de rugosidade e de viscosidade para uma determinada fórmula de perda de carga;

1 INTRODUÇÃO

A irrigação por gotejamento apresenta potencial para ser a forma mais eficiente de aplicação de água quando comparada com outros métodos de irrigação (PROVENZANO et al., 2013; BAIAMONTE et al., 2015; PROVENZANO et al., 2016), permitindo minimizar as perdas de água, economizar energia e manter altos níveis de produção das culturas.

A estimativa das perdas contínuas e localizadas de carga em condutos pressurizados constitui um problema importante em estudos hidráulicos de sistemas de irrigação (BARDESTINI et al., 2017). O desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento depende, entre outros fatores, da variação de pressão na linha lateral. Esta é ocasionada pela perda de carga distribuída ao longo da tubulação, pelas perdas localizadas que ocorrem nos emissores e conexões e por variações de nível (FRIZZONE et al., 2012).

Um dos principais objetivos no dimensionamento do sistema de irrigação por gotejamento é manter equilíbrio hidráulico para garantir vazão uniforme. Os emissores ou gotejadores são os elementos centrais desses sistemas e representam um papel importante em relação à aplicação de água de forma uniforme e com alta eficiência, constituindo-se num componente que requer estudos avançados sobre seu comportamento hidráulico (HEZARJARIBI et al., 2008).

Os avanços tecnológicos aplicados à irrigação por gotejamento estão voltados à redução da pressão de operação, ao aumento da uniformidade de distribuição de água, à possibilidade de automação, à redução do investimento de capital em tubos gotejadores e à simplificação do sistema. Existe atualmente uma forte tendência para a produção e uso de tubos gotejadores colapsáveis flexíveis de polietileno de baixa densidade e baixo custo de produção.

O uso de tubos gotejadores colapsáveis de polietileno, com emissores integrados (i.e., fitas gotejadoras), tem recebido ampla atenção nos últimos anos para irrigar culturas hortícolas. Isso decorre principalmente do baixo custo desse material associado ao adequado desempenho hidráulico, eficiência de aplicação e reduzidos custos de instalação do sistema de irrigação (PROVENZANO et al., 2016).

Parte das pesquisas voltadas à engenharia de irrigação se concentra na caracterização hidráulica de materiais tradicionais, como tubos gotejadores rígidos, e foram propostas diferentes metodologias de dimensionamento hidráulico com o objetivo de alcançar elevados níveis de uniformidade de emissão. Devido a esse fato há relativamente pouca informação sobre as propriedades hidráulicas de tubos gotejadores colapsáveis de polietileno, tornando

necessária a determinação específica das características hidráulicas desse tipo de material, para que se possa aprimorar o dimensionamento do sistema de forma eficiente buscando altos níveis de desempenho e uniformidade de emissão (PROVENZANO et al., 2014).

Recentemente a indústria vem difundindo uma opção de tubo-emissor com custo ainda menor para a irrigação de hortaliças e outras culturas sazonais. Comercialmente, o material é denominado cinta gotejadora, sendo caracterizado por apresentar labirintos contínuos, soldados na parede interna de tubos de polietileno colapsáveis. Esses tubos, geralmente fornecidos em bobinas, têm diâmetros internos de aproximadamente 16 mm, espessura da parede de 6 mil (150 μm), 8 mil (200 μm) e 10 mil (250 μm) e operam a pressões inferiores a 100 kPa. A forma geométrica da seção transversal depende da pressão de trabalho. Quando não pressurizados, os tubos tendem a ser planos e o grau de circularidade aumenta com a pressão de trabalho. Devido à elasticidade do material, o diâmetro tende a aumentar até certo limite com o aumento da pressão de trabalho (MELO et al., 2019; ARAÚJO, 2019).

Outro tipo de material comum na irrigação por gotejamento é o tubo gotejador de baixo custo, com emissores do tipo labirinto moldados à parede interna em espaçamentos regulares (MELO et al., 2019). Em virtude do tipo de material utilizado, do diâmetro da fita, da espessura de parede e da geometria do emissor, torna-se necessário analisar as características hidráulicas da fita gotejadora, visando fornecer informações para projeto e operação do sistema de irrigação.

Embora os procedimentos de projeto hidráulico dos sistemas de irrigação por gotejamento estejam razoavelmente bem estabelecidos, ainda é necessário conhecer o efeito das pressões de operação sobre o diâmetro dos tubos gotejadores de pequenas espessuras de parede, bem como as consequências relacionadas à perda de carga. No caso de cintas gotejadoras, o fator de atrito e a perda de carga podem ser aumentados pela presença do labirinto contínuo soldado no interior do tubo.

1.1 Objetivos

O presente estudo objetiva analisar as relações hidráulicas em tubos gotejadores colapsáveis de polietileno, com diferentes dispositivos de emissão de água para irrigação por gotejamento. Os objetivos específicos são:

- (a) Investigar e modelar a perda contínua de carga e o fator de atrito em fitas gotejadoras colapsáveis com labirintos contínuos soldados à parede interna do tubo, submetidas a diferentes pressões de operação;

- (b) Investigar e modelar a perda contínua de carga e o fator de atrito em fitas gotejadoras colapsáveis com labirintos moldados na parede interna do tubo em espaçamentos regulares, submetidas a diferentes pressões de operação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Irrigação por gotejamento

A irrigação por gotejamento consiste em um sistema de aplicação de água com baixa vazão, por tempo relativamente grande, com alta frequência, na superfície do solo ou subsuperfície, mantendo alto grau de umidade em um pequeno volume de solo que contém o sistema radicular das plantas (FRIZZONE et al., 2012).

Quando manejado adequadamente, o sistema oferece muitas vantagens sobre os demais, tais como: maior uniformidade de distribuição de água, melhor eficiência do uso da água, diminuição das perdas por percolação e por escoamento superficial e baixa perda por evaporação. Ainda, segundo Ayars et al. (2006), a irrigação por gotejamento aumenta a produtividade da água (kg m^{-3}) e o rendimento (kg ha^{-1}), a qualidade do produto, melhorar a gestão de nutrientes e diminuir requerimentos energéticos. Contudo, o desempenho desses sistemas depende de um projeto hidráulico em que o objetivo seja minimizar a variação de vazão dos emissores ao longo da linha lateral e possibilitar o aumento da uniformidade de aplicação de água, com redução dos custos de operação do sistema e aumento da eficiência produtiva (CLARK et al., 2006).

Embora apresente inúmeras vantagens, fatores relacionados ao projeto desses sistemas, tais como variações de pressão, temperatura da água e obstrução de emissores, exercem considerável influência quanto ao seu uso, pois refletem na vazão dos emissores e conseqüentemente na uniformidade de distribuição de água (KANDA et al., 2018).

Definidos pelo dispositivo de emissão de água, os sistemas de gotejamento possuem dispositivos que variam desde simples orifícios em tubos plásticos de paredes finas até os mais elaborados e mais eficientes emissores de fluxo turbulento, compensadores de pressão e antidrenantes (FRIZZONE et al., 2012).

A utilização da irrigação por gotejamento vem crescendo em um ritmo acelerado em todo o mundo, destacando-se pela ocupação de áreas anteriormente irrigadas por sistemas de irrigação por superfície. De acordo com o Atlas Irrigação publicado pela Agência Nacional de Água (ANA, 2017), entre os métodos e sistemas de irrigação, verifica-se que os grupos mais eficientes no uso da água são a microirrigação e aspersão por pivô central, que, juntos, representam cerca de 70% do incremento da área irrigada no Brasil entre 2006 e 2016.

De acordo com Frizzone et al. (2018) no ano de 2017 houve uma expansão da área irrigada em 209.500 hectares, sendo 40% dessa área em sistemas pivô central e 38% pela

irrigação localizada. Ainda, de acordo com autor em 11 anos o número de estabelecimentos com irrigação cresceu 52%, enquanto que a área irrigada cresceu 51%, chegando a 6,9 milhões de hectares irrigados.

O desenvolvimento tecnológico na área de gotejamento tem papel fundamental devido ao aumento da demanda produtiva, à competitividade dos setores de produção, à limitação de recursos hídricos e à constante necessidade de minimizar impactos ambientais, permitindo ganhos de eficiência do sistema, uma vez que o avanço tecnológico busca solucionar problemas como a obstrução de gotejadores (FRIZZONE et al., 2012).

O dimensionamento de um sistema por gotejamento baseia-se geralmente em permitir uma variação máxima de vazão dos emissores na subunidade na ordem de 10%, representando uma variação de carga de pressão em emissores convencionais de até 21%. Assim, esse critério de dimensionamento do sistema deve estimar rigorosamente a perda de carga que ocorre em um projeto hidráulico (BOMBARDELLI et al., 2017).

2.2 Emissores

Os emissores são projetados para aplicar água na forma de gotas, com vazão geralmente inferior a 12 L h^{-1} por emissor, ou com vazão não superior a 12 L h^{-1} por metro de tubo emissor a uma pressão média de operação de 100 kPa (ASABE, 2008). A dissipação de energia nos emissores se dá por meio de um bocal estreito ou por um caminho de fluxo longo, que diminui a pressão da água e permite a descarga de apenas alguns litros por hora (FRIZZONE et al., 2012).

Para linhas laterais de gotejamento, existem duas categorias: as fitas e os tubos gotejadores, ambos de polietileno. As fitas gotejadoras são tubos colapsáveis com espessura de parede variando de 0,1 mm a 0,64 mm e diâmetro interno entre 10,0 mm e 18,0 mm. Podem ser constituídas por gotejadores integrados às paredes internas do tubo, por labirintos modelados no próprio tubo e por pequenos orifícios espaçados uniformemente ao longo do tubo. Já os tubos gotejadores possuem parede espessa, geralmente variando entre 0,25 mm a mais de 0,9 mm, com diâmetro interno de 9 mm a mais de 25 mm. Os emissores planos e cilíndricos são pré-instalados no interior do tubo durante o processo de fabricação, integrados ou não à parede do tubo e têm espaçamentos uniformes (FRIZZONE et al., 2012).

A ABNT NBR ISSO 9261 (2006) categoriza os gotejadores e os tubos gotejadores de acordo com os seguintes critérios:

- 1) Quanto à reutilização, existem duas categorias de tubos gotejadores:
 - a) Tubos gotejadores não-reutilizáveis
 - b) Tubos gotejadores reutilizáveis
- 2) Quanto ao tipo de regulagem de pressão, existem duas categorias de operação:
 - a) Gotejadores ou tubos gotejadores não-regulados
 - b) Gotejadores ou tubos gotejadores regulados
- 3) Quanto ao tipo de operação a baixa pressão, são duas categorias:
 - a) Gotejador ou tubo gotejador regular
 - b) Gotejador antidrenante
- 4) Quanto ao tipo de conexão do gotejador no tubo, existem três tipos de conexão:
 - a) Gotejador on-line
 - b) Gotejador in-line
 - c) Gotejadores formados ou integrados no tubo (tubo gotejador)
- 5) Quanto ao tipo de gotejador de múltiplas saídas, existem duas categorias:
 - a) Gotejador múltiplo
 - b) Gotejador regular de múltiplas saídas.

As seguintes definições são importantes para distinguir os tipos de gotejadores e os tubos gotejadores (ABNT/CE-04:015.08-16, 2006):

Gotejador in-line é o emissor projetado para se instalar entre dois trechos de tubo em uma linha lateral de irrigação.

Gotejador on-line é o emissor projetado para se instalar sobre a parede de uma lateral de irrigação, quer diretamente, quer indiretamente, por meio de um microtubo.

Gotejador de múltiplas saídas é o emissor no qual a vazão é dividida e direcionada, de forma distinta, a vários pontos de emissão. Emissor múltiplo é o emissor de múltiplas saídas, no qual cada saída é um emissor secundário com sua própria vazão. A relação vazão-pressão e a vazão de cada saída não são dependentes da vazão de outros emissores.

Tubo gotejador compreende um tubo contínuo ou microtubo, incluindo tubos colapsáveis (fitas), com perfurações ou outros dispositivos hidráulicos modelados ou integrados no tubo ou no microtubo durante o processo de fabricação e projetados para proporcionar a vazão na forma de gotas ou fluxo contínuo.

Os gotejadores provocam perda localizada de carga na linha lateral (Al-AMOUD, 1995; JUANA et al., 2002; REDDY, 2003; PROVENZANO; PUMO, 2004; PALAU-SALVADOR et al, 2006; YILDIRIM, 2007). Os autores reconhecem que as turbulências são geradas pela contração que os gotejadores e suas conexões provocam no diâmetro interno da linha lateral,

reduzindo a seção de passagem da água. A introdução de gotejadores na linha lateral modifica o curso das linhas de fluxo, causando turbulência local, que resulta em perdas adicionais de carga às perdas distribuídas no tubo. A turbulência é devida à presença de um elemento na parede interna do tubo, que causa um grau de obstrução na seção de escoamento, causando redução da seção (FRIZZONE et al., 2012).

2.3 Balanço de energia

Devido ao escoamento através de tubulações, a energia se modifica conforme as variações de posição, de velocidade de escoamento, de pressão da água, de energia de bombeamento ou de perdas de carga dentro das tubulações e nos componentes associados ao sistema. O sistema de irrigação deve ser projetado de forma a incluir uma análise de energia que garanta o dimensionamento apropriado de todos os componentes e assegure que a vazão desejada seja uniformemente distribuída, sem excesso ou falta de pressão (FRIZZONE et al., 2012).

Daniel Bernoulli estabeleceu que para um líquido ideal, ao longo de qualquer linha de corrente, é constante a soma da energia de posição (potencial), de velocidade (cinética) e de pressão, sendo esta soma denominada de carga total. Os termos da equação são comumente expressos em termos de cargas (energia em relação ao peso), obtendo um conjunto contabilizado por carga hidráulica (H), que é simplificado unicamente por dimensões lineares ($M^0L^1T^0$). A equação da energia resulta da aplicação do princípio da conservação de energia ao longo do escoamento. A energia que um fluido em escoamento possui é composta da energia interna e das energias devidas à pressão, à velocidade e à posição (AZEVEDO NETTO; FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ, 2015).

Nos fluidos ideais, as cargas totais se mantêm constantes ao longo das seções, não havendo nem ganhos nem perdas de carga. Contudo, nos fluidos reais há de se considerar a resistência do atrito interno entre dois pontos de um trecho. Com base no princípio de que a energia não pode ser criada nem destruída, mas transformada, faz-se necessário estabelecer uma equação que represente o balanço das energias, por meio da equação da continuidade. O conceito de perda de carga é introduzido para balancear essa equação, sem o objetivo de explicar o destino dessa energia, contabilizando qualquer perda de energia associada com o escoamento (AZEVEDO NETTO; FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ, 2015). A equação de Bernoulli (apud BRUNETTI, 2008) para fluídos reais (Eq. 1) pode ser representada

considerando o atrito interno, e nela ainda são mantidas as hipóteses de regime permanente, fluido incompressível, propriedades uniformes na seção e sem trocas de calor induzidas (BRUNETTI, 2008).

$$Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + hf \quad 1$$

em que: Z – energia potencial (m); P/γ – energia de pressão (m); $V^2/2g$ – energia cinética (m) e hf – perda de carga (m).

2.4 Perda de carga

A uniformidade de distribuição de água de um sistema de irrigação é importante para o uso eficiente da água. Para que seja possível atingir níveis adequados de uniformidade, torna-se necessário quantificar a perda de carga que ocorre ao longo da linha (FRIZZONE et al., 2012). A caracterização hidráulica relaciona-se diretamente com a qualidade de um sistema de irrigação (YILDIRIM, 2007). A perda de carga ocasionada pelo escoamento do fluido em tubulações influencia na potência e no consumo de energia do conjunto motobomba e, portanto, interfere nos custos do sistema. A perda de carga admitida pelo projetista definirá o diâmetro da canalização. O custo fixo de aquisição do sistema aumenta com o acréscimo de diâmetro, e o custo operacional diminui e reduz a exigência de energia de bombeamento requerida (FRIZZONE et al., 2012; PRADO, 2015).

Partindo da equação de Bernoulli (Eq. 1), quando um fluido escoar de uma seção (1) para outra (2) em canalização uniforme, parte da energia inicial é dissipada na forma de energia térmica, e a soma das três cargas na seção (2) não se iguala à carga total em (1). Essa diferença denomina-se perda total de carga. Tratando-se de um regime de escoamento laminar, a resistência ao escoamento deve-se inteiramente à viscosidade. Embora essa perda seja comumente designada como perda por fricção ou por atrito, não se deve supor que ela seja devida a uma forma de atrito como a que ocorre com sólidos. Não existe movimento do fluido junto à parede de tubo; o módulo da velocidade de escoamento é zero na camada limite (FRIZZONE et al., 2012).

De acordo com Brunetti (2008), a perda de carga refere-se à energia dissipada por unidade de peso de um fluido real quando este escoar. No escoamento de um fluido real, as partículas se propagam em velocidade crescente oposta ao contato da parede, mantendo uma camada com velocidade nula, mas que passa a influir nas partículas vizinhas, com um

gradiente de velocidade expresso pela tensão de cisalhamento relacionado com a viscosidade do fluido.

Frizzone et al. (2012) comentam que a perda de carga se deve à viscosidade do fluido e seus efeitos, que representam uma resistência ao escoamento. No regime laminar, a resistência ao escoamento deve-se inteiramente à viscosidade; já no regime turbulento, a resistência ao escoamento é o resultado do efeito combinado das forças devidas à viscosidade e à inércia. Nesse caso, a distribuição de velocidades na canalização depende da turbulência, maior ou menor, influenciada pelas condições das paredes. Um tubo com paredes rugosas causa maior turbulência. No escoamento laminar, a perda por resistência é uma função da primeira potência da velocidade, enquanto que no escoamento turbulento ela varia aproximadamente com a segunda potência da velocidade.

Existe um predomínio do uso de materiais de polietileno de baixa densidade colapsáveis na produção de tubos emissores utilizados em sistemas de microirrigação, devido ao fato de esse material ser economicamente mais competitivo, uma vez que os tubos possuem pequenos diâmetros e transportam pequenas vazões. Em razão da produção dos tubos ser com este tipo de material, seus diâmetros podem variar em decorrência da pressão de operação, fato este que pode influenciar na perda de carga real, o que resultaria em alterações das condições hidráulicas do projeto (RETTORE NETO et al., 2009).

O dimensionamento do diâmetro dos tubos depende da perda de carga admitida no sistema pelo projetista. O custo operacional é afetado inversamente pelo diâmetro dos tubos: com o aumento do diâmetro, para uma determinada vazão, a perda de carga por unidade de comprimento diminui, reduzindo a energia de bombeamento requerida, porém proporciona o aumento do capital necessário para a aquisição dos tubos (MELO et al., 2019).

2.4.1 Escoamento viscoso em condutos forçados – Número de Reynolds

Osborne Reynolds, em 1883, estabeleceu que os fluidos reais escoam sob regimes distintos: o regime laminar, uma zona de transição mista e o regime turbulento (AZEVEDO NETTO; FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ, 2015). Hidraulicamente, estabelece-se um adimensional para classificação do escoamento conhecido como número de Reynolds (R), apresentando-se como solução a problemas tradicionais de mecânica dos fluidos. O número de Reynolds é um parâmetro importante nos escoamentos em condutos forçados, sendo definido como a razão entre os efeitos de inércia e os viscosos no escoamento. O escoamento de um fluido é denominado laminar quando suas partículas se movem ao longo de trajetórias

bem definidas, na forma de camadas ou lâminas. Cada partícula do fluido em movimento descreve uma trajetória retilínea e unidimensional, com todos os vetores de velocidade posicionados unicamente no sentido do escoamento. Nesse regime, qualquer tendência à ocorrência de turbulência no escoamento de um fluido devida à ação de forças inerciais é amortecida pela ação das forças viscosas do fluido, e como tais forças viscosas são dissipadas, elas acabam estabilizando o escoamento.

No regime turbulento, o deslocamento das partículas de um fluido não se faz de maneira unidimensional, como ocorre no regime laminar, uma vez que as partículas de fluido, além da velocidade no sentido da trajetória do escoamento, também apresentam velocidades que transversais. Essas velocidades são as responsáveis pela movimentação caótica das partículas do fluido durante o escoamento (AZEVEDO NETTO; FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ, 2015).

Partindo da segunda lei de Newton, conhecida como Princípio Fundamental da Dinâmica, a força de inércia em um fluido pode ser apresentada de forma direta considerando-se a massa específica (ρ), a vazão (Q) como o produto da velocidade média de escoamento (V) pela área de seção transversal (A) e a aceleração como uma taxa de variação de velocidade em um dado intervalo de tempo. A tensão de cisalhamento média refere-se ao quociente entre o módulo da força tangencial pela área em que a força é aplicada (A). De acordo com a Lei da Viscosidade de Newton, certos fluidos possuem uma proporcionalidade entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade entre camadas de uma seção genérica. A resistência de um fluido ao escoamento se dá pela viscosidade absoluta ou dinâmica (μ), e esta refere-se ao coeficiente de proporcionalidade (AZEVEDO NETTO; FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ, 2015).

O número de Reynolds, para seções circulares, é obtido pelo quociente entre as forças de inércia e a força tangente da tensão de cisalhamento de um fluido newtoniano (Eq. 2).

$$R = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu} = \frac{4 Q}{\pi \nu D} \quad 2$$

em que: R – número de Reynolds (adimensional); ρ – massa específica do fluido (kg m^{-3}); V – velocidade média de escoamento (m s^{-1}); D – diâmetro do tubo (m); μ – viscosidade dinâmica do fluido ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$); ν – viscosidade cinemática da água ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) e Q – vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

A viscosidade cinemática da água (ν) varia de acordo com a temperatura da água (T), e pode ser calculada a partir da equação de Poiseuille (Eq.3) de acordo com Rodríguez-Sinobas et al. (1999).

$$\nu = 0,000006177T^{-0,603}$$

A aplicação de Reynolds, conforme Eq. 2, restringe-se a condutos de seção circular, cuja dimensão linear característica é o diâmetro interno. Em casos de seções não circulares, a dimensão linear característica é o raio hidráulico (R_H). Números de Reynolds elevados indicam que as forças de inércia são mais relevantes que as tensões viscosas do fluido.

O escoamento em regime laminar ocorre em valores do número de Reynolds abaixo de 2000. O escoamento que ocorre com número de Reynolds entre 2000 e 4000 oscila entre laminar e turbulento, consolidando uma zona crítica. Valores do número de Reynolds acima de 4000 são consolidados como regime turbulento, no qual o deslocamento sofre perturbações de velocidades transversais que conferem uma movimentação caótica; a dissipação de energia é função do efeito combinado das forças de inércia, tensões viscosas e rugosidade dos tubos (PORTO, 2006).

2.4.2 *Perda de carga total*

Hidraulicamente, pode-se classificar a perda de carga como perda contínua de carga (ou distribuída) e perda localizada de carga (ou singular). A perda de carga contínua refere-se à perda por resistência ao longo das canalizações, ocasionadas pelo movimento da água na própria tubulação. Admite-se que essa perda seja uniforme em qualquer trecho de uma canalização de dimensões constantes, conduzindo vazão constante, independentemente da posição da canalização (PORTO, 2006).

Nas perdas ocasionadas por peças especiais e demais singularidades, a energia dissipada é caracterizada pontualmente e está relacionada com a carga cinética do escoamento. Essa perda possui grande importância em canalizações com alto número de peças especiais.

De acordo com Frizzone et al. (2012), a perda de carga total corresponde à soma da perda de carga contínua ao longo das seções uniformes de tubo com a perda localizada provocada por peças especiais e demais singularidades em uma canalização. A maioria das canalizações utilizadas em sistemas de engenharia de irrigação possui seção circular e opera em regime de escoamento turbulento; devido a esse fato, a maior parcela da perda de carga está associada à perda de carga contínua (PORTO, 2006).

2.4.3 Perda contínua de carga

Como visto no item 2.4.2, a perda contínua de carga refere-se à dissipação de energia por resistência ao escoamento do fluido ao longo das canalizações, ocasionada pelo movimento da água na própria tubulação. A equação geral para calcular a perda de carga contínua (h_f , mca), ao longo das canalizações com seção circular, conduzindo vazão constante, em regime de escoamento uniforme, conforme apresentada por Frizzone et al. (2018), é expressa pela Eq.4:

$$h_f = \beta' \frac{Q^m}{D^n} L \quad 4$$

ou, tratando-se da perda de carga unitária (J , $m^{-1} m^{-1}$) (Eq.5):

$$J = \beta' \frac{Q^m}{D^n} \quad 5$$

em que: D – diâmetro do tubo (m); Q – vazão ($m^3 s^{-1}$); L – comprimento da canalização (m); m – expoente da velocidade (ou da vazão) na equação de perda de carga ($m = 1$ para regime de escoamento laminar; $m = 2$ para escoamento completamente turbulento quando se utiliza a equação de Darcy-Weisbach; $m = 1,852$ para escoamento completamente turbulento quando se utiliza a equação de Hazen-Williams); n – expoente do diâmetro interno da tubulação na equação de perda de carga ($n = 4$ para escoamento laminar; $n = 5$ para escoamento completamente turbulento quando se utiliza a equação de Darcy-Weisbach e $n = 4,871$ para Hazen-Williams); β' – constante que combina coeficientes de unidades, de rugosidade e de viscosidade para uma determinada fórmula de perda de carga; quando se utiliza a equação de Darcy-Weisbach tem-se $\beta' = 0,08271$.

Embora existam métodos mais simples para o cálculo da perda de carga no escoamento em tubos, a equação de Darcy-Weisbach pode ser considerada o método padrão para tais estimativas, pois não assume um fator de atrito constante para todos os tipos de diâmetros e velocidades de escoamento (YASMINA; RACHID, 2015). As variáveis envolvidas no cálculo da perda de carga (J , $m m^{-1}$) pela equação de Darcy-Weisbach (Eq. 6) são: o fator de atrito (f , adimensional), que é uma função do número de Reynolds (R , adimensional) e da rugosidade da superfície interna do tubo (ϵ , m), a vazão (Q , $m^3 s^{-1}$) e o diâmetro interno do tubo (D , m).

$$J = f \frac{1}{D} \frac{V^2}{2g} = \frac{8f}{g \pi^2} \frac{Q^2}{D^5} \quad 6$$

A alteração do diâmetro interno do tubo com a pressão de operação influencia a perda de carga, podendo resultar em alterações nas condições hidráulicas do sistema. Frizzone et al. (1998) e Melo et al. (2019) estudaram a perda de carga em tubos de polietileno de pequenos diâmetros com baixa espessura de parede e mostraram que variações do diâmetro da tubulação com variações da pressão de entrada afetam a perda de carga e o comprimento máximo calculado para a linha lateral do sistema de irrigação.

Rettore Neto et al. (2014) desenvolveram um procedimento para determinar a perda de carga ao longo de um tubo elástico, com base na (Eq. 6), considerando a variação da seção transversal do tubo com a pressão de operação. A nova equação permite estimar variações no diâmetro interno do tubo em função do módulo de elasticidade do material, da espessura da parede e da pressão de operação. De qualquer forma, a proposta metodológica não leva em conta que tubos colapsáveis, quando operados sob pressões baixas, podem não apresentar seção de escoamento perfeitamente circular, o que ocasiona imprecisão nas estimativas.

2.4.4 Perda localizada de carga

Algumas canalizações utilizadas em sistemas de irrigação por gotejamento não são constituídas exclusivamente por tubos retilíneos com o mesmo diâmetro. Normalmente possuem peças especiais e conexões. A inserção desses elementos na linha lateral resulta numa perda localizada de carga na tubulação, com alterações bruscas na velocidade de escoamento do fluido, em módulo, direção e conseqüentemente de pressão. Isso implica aumento da turbulência que produz perdas de cargas, somadas às perdas contínuas ao longo dos trechos retilíneos da tubulação. A presença dos acessórios na tubulação altera a uniformidade de escoamento e, embora se trate como localizada, a influência do acessório sobre a linha de energia é refletida em trechos a montante e a jusante da canalização. Isso contribui para um acréscimo na turbulência do escoamento principal, a expensas da energia do fluido, que se transforma em calor quando o processo de turbulência cessa, após o regime de escoamento ser novamente restabelecido (FRIZZONE et al., 2018).

Não há um tratamento analítico para cálculo da perda localizada de carga (hfl), constituindo-se um estudo essencialmente experimental. A carga de velocidade é usada para

quantificar essa perda de carga nos acessórios (Eq.7), utilizando-se um coeficiente de resistência adimensional (K_L) que depende da geometria da peça, do número de Reynolds, da rugosidade da parede e em alguns casos das condições de escoamento (FRIZZONE et al., 2018).

$$h_{fl} = K_L \frac{V^2}{2g} \quad 7$$

em que: K_L – coeficiente de carga cinética (adimensional); h_{fl} – perda localizada de carga (m); V – velocidade média de escoamento ($m\ s^{-1}$); g – aceleração da gravidade ($m\ s^{-2}$).

O trabalho realizado por Perboni et al. (2015) teve como objetivo determinar o coeficiente de carga cinética K_L para tubos com gotejadores integrados do tipo cilíndrico e relacionar K_L com a razão entre áreas de escoamento do gotejador e do tubo. Foram avaliados 12 tubos gotejadores de diferentes modelos e marcas, testados em uma bancada específica para a estimativa da perda de carga. Para todos os modelos avaliados, a perda de carga no gotejador aumentou linearmente com a carga cinética, de modo que uma equação foi ajustada aos dados, sendo K_L o coeficiente angular da reta ajustada. Negligenciando o efeito das forças viscosas, uma vez que para $R \geq 10^4$, o valor do coeficiente K_L passa a ser influenciado pela forma e tamanho do elemento obstrutor (GOMES et al., 2010), foi possível estimar o coeficiente de carga cinética médio através da razão entre a área do gotejador (A_g) com a área total (A_t) do escoamento, procedendo-se então ao ajuste do modelo ($r^2 = 0,905$) para o intervalo de $0,735 \leq A_g/A_t \leq 0,842$.

2.4.5 Perda de carga em tubos de polietileno colapsáveis

O uso de fitas gotejadoras colapsáveis de polietileno, com pequena espessura de parede, com a presença ou não de emissores do tipo labirinto, moldados ou perfurados a laser na parede do tubo em espaçamentos regulares, é comum na irrigação por gotejamento devido ao baixo custo desse tipo de material (MELO et al., 2019). Em virtude do tipo de material utilizado, do diâmetro da fita, da espessura de parede e da geometria do emissor, torna-se necessário analisar as características hidráulicas da fita gotejadora colapsável, visando fornecer informações que possam subsidiar o dimensionamento do projeto e operação do sistema de irrigação.

Grande parte das pesquisas voltadas à engenharia de irrigação se concentram na caracterização hidráulica de materiais tradicionais, como tubos gotejadores rígidos de polietileno (BERNUTH; WILSON, 1989; BAGARELLO et al., 1995; YASMINA; RACHID, 2015; CARDOSO, 2008; SOUSA; DANTAS NETO, 2014), e com base nessas pesquisas foram propostas diferentes metodologias de dimensionamento hidráulico com o objetivo de alcançar elevados níveis de uniformidade de emissão. Por outro lado, existe relativamente pouca informação sobre as propriedades hidráulicas de cintas gotejadoras colapsáveis de polietileno, tornando necessária a determinação específica das características hidráulicas deste tipo de material, para que se possa dimensionar o sistema de forma eficiente buscando altos níveis de desempenho e uniformidade de emissão (PROVENZANO et al., 2016).

O dimensionamento de linhas laterais de irrigação utiliza critérios para atingir alta uniformidade de distribuição de água (PERBONI et al., 2015). Para tubos com diâmetro definido, o objetivo é determinar o comprimento máximo da tubulação. Geralmente, os projetistas de sistema de irrigação utilizam as equações de perda de carga existentes na literatura, considerando-se os diâmetros internos das tubulações informados pelos fabricantes. Pelo fato de os tubos colapsáveis serem produzidos com materiais plásticos flexíveis, seus diâmetros podem ser alterados em decorrência das variações na pressão ao longo da linha lateral (ANDRADE, 1990; VILELA et al., 2003; PROVENZANO et al., 2016). Essa alteração do diâmetro influencia a perda de carga, resultando alterações hidráulicas do sistema.

Frizzone et al. (1998) estudaram a perda de carga em tubos gotejadores de polietileno de baixa espessura de parede, e demonstraram a variação do diâmetro da tubulação e da perda de carga com a pressão de entrada e sua influência no cálculo do comprimento máximo da linha lateral. Considerando a importância da variação de diâmetro de tubos de polietileno em função da pressão de operação, Rettore Neto et al. (2014) desenvolveram modelo para determinação da perda de carga ao longo de tubos elásticos, introduzindo na equação universal o módulo de elasticidade do material utilizado na fabricação do tubo. Melo et al. (2019) estudaram a perda de carga em tubos de polietileno flexíveis, perfurados a laser, com diâmetro especificado pelo fabricante de 28 mm e espessura de parede 200 μm , e encontram 19,34% de redução na perda de carga com um aumento de 50% na pressão de operação.

Thompson et al. (2011) realizaram investigação experimental para determinação das propriedades hidráulicas em sistemas de baixa pressão utilizando tubos colapsáveis com diferentes espessuras de parede. De acordo com os autores, o fator de atrito (f) expresso na equação de Darcy-Weisbach para tubos colapsáveis pode ser acuradamente estimado com as

esquações propostas na literatura, utilizando-se um diâmetro efetivo baseado na espessura de parede e na pressão de entrada. Os autores concluíram ainda que a perda de carga por atrito medida nos tubos colapsáveis foi praticamente a mesma, independentemente de qual estimativa de diâmetro efetivo tenha sido utilizada (diâmetro igual a quatro vezes o raio hidráulico ou o diâmetro médio efetivo do tubo). Em todos os casos, o uso do raio hidráulico tendeu a subestimar a perda de carga por atrito. Na maioria dos casos, o uso do diâmetro efetivo do tubo em função da carga de pressão tornou a estimativa da perda de carga mais acurada. Diogo et al. (2014) estudaram a perda contínua de carga e o fator de atrito em tubos fabricados com diferentes materiais plásticos com diâmetro nominal de 110 mm sob regime de fluxo turbulento. Os dados obtidos foram analisados utilizando escala logarítmica com os pares de valores fator de atrito *vs* número de Reynolds. No estudo foram utilizados vários materiais com diferentes rugosidades absolutas e os autores concluíram que a análise de distribuição dos pontos experimentais pôde ser bem representada pela equação de Colebrook-White, para todas as rugosidades estudadas. Foi analisado também o uso das equações de Blasius e da equação empírica de Scimemi e estas mostraram-se satisfatórias para estimar o fator de atrito em tubos plásticos.

Provenzano et al. (2016) estudaram as relações geométricas de fitas lisas colapsáveis de pequenos diâmetros submetidas a diferentes pressões de operação e suas consequências no fator de atrito (*f*). Encontraram o valor do coeficiente da equação de Blasius para cálculo do fator de atrito (Eq. 8) igual a 0,285, e evidenciou-se que estimativas adequadas de *J* devem considerar as variações do diâmetro efetivo do tubo com a pressão de operação. Por outro lado, valores incorretos do diâmetro do tubo combinados com valores inexatos do fator de atrito geram estimativas não acuradas da perda de carga, com consequências negativas ao projeto das linhas laterais de irrigação. Ainda de acordo com os autores, devido ao aumento da pressão de operação, a seção transversal do tubo se expande e, partindo-se de uma seção plana, tende a assumir uma forma circular. Essas mudanças afetam as distribuições de velocidades do escoamento no tubo, que são diferentes ao longo das direções vertical e horizontal. Como o coeficiente de atrito depende da rugosidade relativa e da distribuição de velocidade, alterações na forma da seção do tubo afetam essas duas variáveis e, consequentemente, as perdas de carga por atrito. Ao mesmo tempo, a carga de pressão ao longo de uma linha de gotejadores é influenciada pela perda de carga por atrito e pela energia de posição. Assim, a geometria do tubo varia de uma seção para outra ao longo da direção do fluxo, de acordo com as reduções da carga de pressão, tornando complexo o cálculo da perda de carga ao longo da linha lateral.

Recentemente a indústria lançou no mercado tubos gotejadores colapsáveis com emissor contínuo de fluxo turbulento não compensador de pressão, integrado na parede interna do tubo. Esse material vem ganhando mercado na irrigação de hortaliças e de outras culturas de ciclo curto, especialmente devido ao baixo custo. A forma geométrica da seção transversal desses tubos depende da pressão de trabalho. Quando não pressurizados, os tubos tendem a ser planos e o grau de circularidade aumenta com a pressão de trabalho. Devido à elasticidade do material, o diâmetro tende a aumentar até certo limite com o aumento da pressão de trabalho (MELO et al., 2019; ARAÚJO, 2019).

Mesmo que os procedimentos hidráulicos de projeto de sistemas por gotejamento estejam bem estabelecidos, ainda é necessário saber como os labirintos contínuos, soldados à parede interna do tubo, podem afetar o fator de atrito e como as pequenas espessuras de paredes operando sob diferentes pressões podem afetar o diâmetro, e as consequências relacionadas à perda de carga.

2.5 Fator de atrito

Na equação de Darcy-Weisbach, a resistência hidráulica ao escoamento, expressa por um fator de atrito (f) é essencial para o cálculo da perda de carga em tubulações.

Nikuradse (1950) realizou experiências com o objetivo de estudar os regimes de escoamento em condutos. Experiências essas orientadas por Kármán em (1946) e por Prandtl (1934), que consistiam na determinação da perda de carga contínua provocada pelo escoamento do fluido no interior de condutos circulares com rugosidade artificial. Foram utilizados tubos de vidro e a rugosidade artificial foi estabelecida pela inserção de grãos de areia na parede do tubo. Os grãos eram selecionados de forma a obter rugosidade uniforme. Os resultados foram dispostos em diagrama que figurava o logaritmo do coeficiente de perda de carga em função do logaritmo do número de Reynolds. Nikuradse (1950) observou a existência de três regimes distintos. O regime laminar, no qual o fator de atrito depende apenas do número de Reynolds (R), existindo uma relação linear entre ambas as grandezas expressa pela equação de Hagen-Poiseuille, em que $f = \frac{64}{R}$. Para o regime de escoamento turbulento liso, Nikuradse afirma que f depende somente de R , e pode ser devidamente definido pela equação de Prandtl e Kármán, em que $\frac{1}{\sqrt{f}} = \left(-2 \log \frac{2,51}{R\sqrt{f}}\right)$. Para regime turbulento rugoso, f independe de R , dependendo somente da rugosidade relativa $\left(\frac{\varepsilon}{D}\right)$, podendo ser

expresso por Kármán: $\frac{1}{\sqrt{f}} = \left(-2 \log \frac{\varepsilon}{3,7 D}\right)$. Posteriormente, Colebrook-White (1937) desenvolveu experiências com condutos comerciais com o objetivo de estudar o comportamento de f na transição entre o regime turbulento liso e o regime turbulento rugoso.

O fator de atrito é geralmente determinado pela equação de Colebrook-White, que é uma combinação implícita das equações de Prandtl e Kármán. A solução é atingida por iteração ou por referência ao diagrama do Moody. Para facilitar o cálculo de f , foram desenvolvidas e avaliadas várias aproximações explícitas (PIMENTA et al., 2018), cuja acurácia é analisada em relação à equação de Colebrook-White, assumida como padrão.

Para tubos plásticos de pequenos diâmetros, a acurácia do método de Colebrook-White tem sido questionada por alguns pesquisadores. Bernuth e Wilson (1989) mostraram dados de várias fontes indicando que o método não funcionou bem para esses tubos. Os tubos de polietileno apresentam rugosidade pequena ($\varepsilon \cong 8,116 \mu\text{m}$) (ROCHA et al., 2017) e, dados os limites práticos de velocidade de escoamento adotados no dimensionamento de linhas laterais de irrigação por gotejamento, o regime de escoamento que predomina é hidraulicamente liso e f depende apenas de R .

Para escoamento turbulento hidraulicamente liso, com $4000 \leq R \leq 10^5$, o fator f geralmente é calculado pela equação de Blasius ou por equações similares (Eq. 8), especificamente obtidas para tubos de polietileno ou PVC (BERNUTH; WILSON, 1989; JUANA et al., 2002; PROVENZANO; PUMO, 2004; CARDOSO et al., 2008):

$$f = \frac{a}{R^b} \quad 8$$

em que, na equação de Blasius, $a = 0,3164$ e $b = 0,25$ para tubos lisos rígidos. O fator f não é independente do diâmetro do tubo, pois é função do número de Reynolds.

Bernuth e Wilson (1989) mostraram que a equação de Blasius apresenta adequado desempenho para tubos de plástico de pequeno diâmetro quando o número de Reynolds é inferior a 100.000, sendo, inclusive, mais acurada que a equação de Colebrook-White.

Para tubos de polietileno não colapsáveis de diâmetros nominais 16, 20 e 25 e $2000 < R < 36000$, Bagarello et al. (1995) propuseram $a = 0,302$ e, para diâmetros nominais de 12, 15, 18, 20 e 22 e $6000 < R < 72000$, Cardoso et al. (2008) propuseram $a = 0,300$. Para tubos de polietileno lisos colapsáveis, com espessuras de paredes de 150, 200

e 250 μm (6, 8 e 10 Mil), estudos de Provenzano et al. (2016) indicaram $a = 0,285$. Ambos os estudos assumem $b = 0,25$.

Sousa e Dantas Neto (2014) apresentaram uma adaptação para os coeficientes da equação de Blasius para o cálculo do fator de atrito em tubos de polietileno não colapsáveis. Propuseram que a e b sejam expressos por uma função potência dos diâmetros do tubo, de tal forma que os valores de a e b reduzem com o aumento do diâmetro. Nesse modelo, para diâmetros variando de 13 mm a 16 mm, o valor de a reduz de 0,3068 para 0,2923 (4,73%) e de b reduz de 0,249 para 0,244 (2,01%). Com essa aproximação, os autores relatam que o modelo apresenta maior grau de exatidão em comparação com os modelos consolidados na literatura.

2.6 Teste de aderência

Os testes de aderência ou de qualidade do ajuste consistem em testes estatísticos que permitem verificar a adequabilidade de um modelo teórico, semiteórico ou empírico aos dados observados da variável em estudo, considerando um certo nível de significância no ajuste. Do conjunto total de dados obtidos experimentalmente, 70% dos dados são utilizados para ajustes do modelo, enquanto que os 30% restantes, que não foram utilizados no ajuste, são utilizados para o teste de aderência.

Os testes estatísticos utilizados largamente pela comunidade científica para validação e análise de desempenho de modelos referem-se à raiz quadrada do erro médio (RMSE) e à frequência acumulada dos erros relativos das estimativas (ALI; ABUSTAN, 2014; DEVORE, 2006). O RMSE quantifica a dispersão entre valores observados e estimados e, idealmente, seu valor tende a zero.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material avaliado

3.1.1 Tubos gotejadores colapsáveis com labirintos contínuos integrados à parede interna do tubo

Foram estudados dois modelos de tubos gotejadores com labirintos contínuos integrados à parede interna do tubo fabricados pela NaanDanJain® e pela Golden Tree®. As características operacionais declaradas pelo fabricante são apresentadas no Quadro 1. As arquiteturas dos emissores contínuos são representadas na Figura 1.

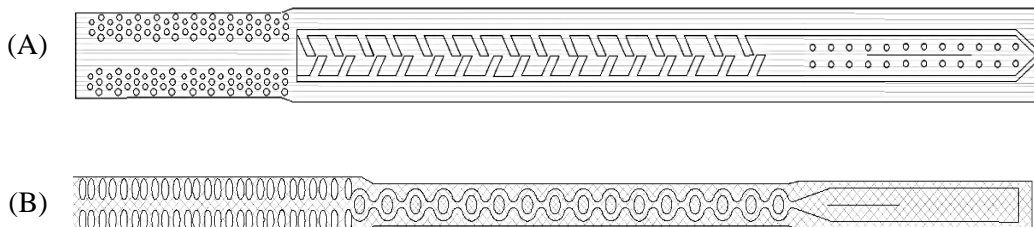
Quadro 1 – Características operacionais dos tubos gotejadores com emissores contínuos utilizados nos ensaios

Fabricante	Modelo	D ⁽¹⁾ (mm)	ξ ⁽²⁾ (µm)	P ⁽³⁾ (kPa)	q ⁽⁴⁾ (L h ⁻¹)	S ⁽⁵⁾ (m)
NaanDanJain	Turbo Tape	15,90	150	80	1,1	0,10
Golden Tree	Silver Drip	16,22	200	80	1,1	0,20

⁽¹⁾ Diâmetro interno do tubo declarado pelo fabricante, ⁽²⁾ Espessura da parede do tubo; ⁽³⁾ Pressão nominal de operação; ⁽⁴⁾ Vazão nominal do orifício; ⁽⁵⁾ Espaçamento entre orifícios.

Fonte: Elaborado pela autora com dados do fabricante NaanDanJain e Golden Tree.

Figura 1 – Representação esquemática da arquitetura do emissor soldado na parede interna do tubo (A) Turbo Tape (B) Silver Drip



Fonte: Autora

Mediram-se com paquímetro digital com resolução de 0,01 mm a largura e a altura dos emissores contínuos para ambos os modelos, encontrando-se, respectivamente, 7,90 mm e 0,07 mm para o modelo Turbo Tape, e 4,60 mm e 1,08 mm para o modelo Silver Drip.

3.1.2 *Tubo gotejador com emissores moldados na parede interna do tubo*

Foi estudado o tubo gotejador colapsável de polietileno Rain-Tape® fabricado pela Rain Bird®, com emissores tipo labirinto, espaçados de 0,30 m, disponíveis comercialmente na bobina de 1000 m. As características operacionais declaradas pelo fabricante são apresentadas no Quadro 2. A arquitetura do emissor moldado é representada na Figura 2.

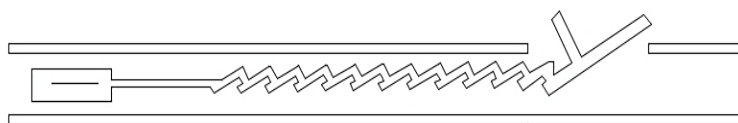
Quadro 2 – Características operacionais do tubo gotejador com emissor moldado utilizado nos ensaios

Fabricante	Modelo	D ⁽¹⁾ (mm)	ξ ⁽²⁾ (μm)	P ⁽³⁾ (kPa)	q ⁽⁴⁾ (L h ⁻¹)	S ⁽⁵⁾ (m)
Rain Bird®	Rain-Tape®	16,00	225	55	1,0	0,30

⁽¹⁾ Diâmetro interno do tubo declarado pelo fabricante, ⁽²⁾ Espessura da parede do tubo; ⁽³⁾ Pressão nominal de operação; ⁽⁴⁾ Vazão nominal do orifício; ⁽⁵⁾ Espaçamento entre orifícios.

Fonte: Elaborado pela autora com dados do fabricante Rain-Bird.

Figura 2 – Representação esquemática da arquitetura do emissor moldado à parede interna do tubo Rain-Tape



Fonte: Autora

3.2 Estrutura dos ensaios hidráulicos

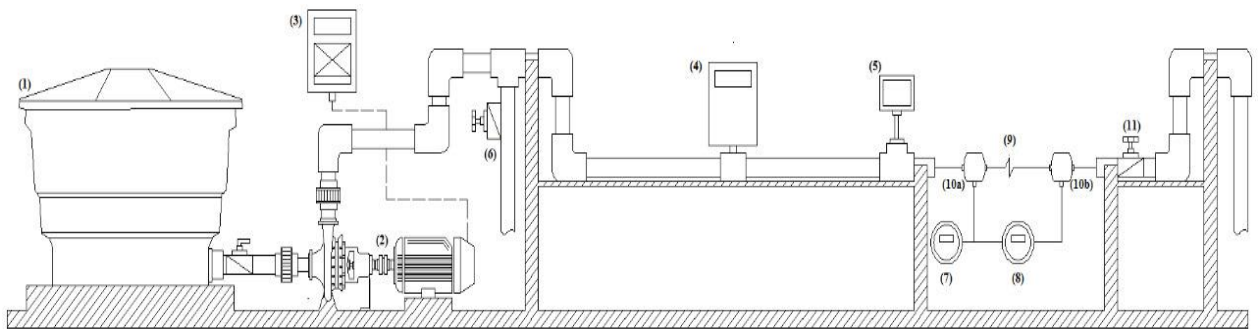
O trabalho foi conduzido no Laboratório de Ensaio de Material de Irrigação do Departamento de Engenharia de Sistemas Agrícolas da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo (Piracicaba, SP, Brasil). A estrutura e o procedimento experimental executados foram os mesmos para todos os modelos de tubos gotejadores colapsáveis estudados neste trabalho.

Utilizou-se uma bancada de ensaios automatizada, desenvolvida e validada por Bombardelli et al. (2017), para determinação da perda de carga nos tubos. Os procedimentos experimentais foram realizados em laboratório utilizando-se segmentos em nível, com orifícios vedados, obtidos, não sequencialmente, de bobinas de 700, 1000 e 1000 m, respectivamente para os modelos Turbo Tape, Silver Drip e Rain-Tape, obtidas aleatoriamente no comércio. A estrutura da bancada consiste de um circuito eletrônico microcontrolado que dispõe de funcionalidades para aquisição e condicionamento de sinais e sensores, controle de inversor de frequência, válvula proporcional e controle através de rede RS-485. Um reservatório de água de 4800 L é conectado a um conjunto motobomba responsável pela pressurização do sistema. A validação da bancada foi efetuada a partir de ensaios de estabilidade que permitiram confirmar o seu adequado funcionamento. O controle da pressão de ensaio operou em malha fechada, utilizando a lógica de controle Proporcional-Derivativo (PID). De acordo com Bombardelli et al. (2017), o uso do controlador PID visa assegurar acurácia no controle das pressões de ensaio.

O ajuste da vazão foi realizado pelo controle eletrônico da válvula proporcional Belimo® LRB24-3, com passagem de ½”, instalada a jusante do segmento do tubo ensaiado. Para o monitoramento da vazão, utilizou-se um medidor eletromagnético de vazão Krohne®, modelo IFC 010 D, com resolução de 0,01 m³ h⁻¹, faixa de vazão de 0 a 4 m³ h⁻¹ e incerteza expandida de 0,5% em relação ao fundo de escala (FE). A diferença de pressão proporcionada pelo escoamento através dos tubos foi mensurada por um transmissor de pressão diferencial Novus®, modelo NP800H, resolução de 0,01 kPa, faixa de medição de 1 a 100 kPa, exatidão de 0,075% informada pelo fabricante. A bancada possui um circuito eletrônico microcontrolado gerenciado por um aplicativo supervisão, sendo este responsável pela aquisição de dados dos sensores e controle do processo experimental. O monitoramento da pressão de ensaio foi realizado por um transmissor de pressão, marca Zurich®, modelo Z.10.B.420, faixa de medição de 0 a 5 bar, com incerteza de medição de 0,1% FE.

Durante os ensaios, monitorou-se a temperatura da água por um transmissor de temperatura da marca Zurich®, modelo TZD 420, com resolução de 0,1 °C, faixa de medição entre 0 e 50 °C, incerteza de medição de 0,5% FE. A temperatura média da água durante os ensaios foi registrada para posterior correção da perda de carga para a temperatura de 23 °C. A estrutura da bancada é representada na Figura 3.

Figura 3 – Representação esquemática da bancada automatizada utilizada nos ensaios de perda de carga. (1) Reservatório de água; (2) Conjunto moto-bomba; (3) Inversor de frequência; (4) Medidor eletromagnético de vazão; (5) Transmissor de temperatura; (6) Registro by-pass; (7) Transmissor de pressão de entrada; (8) Transmissor de pressão diferencial; (9) Material avaliado; (10) Tomadas de pressão a montante (a) e a jusante (b); (11) Válvula de retorno



Fonte: Bombardelli (2017).

Para os tubos gotejadores colapsáveis com emissor contínuo Turbo Tape e Silver Drip, foram obtidas equações de perda de carga para pressões de entrada de 40 a 100 kPa, em incrementos de 20 kPa. Em função do espaço disponível no laboratório, foram ensaiadas duas amostras de tubo de 20 m para cada modelo. Para o tubo gotejador com emissor moldado Rain-Tape, foram obtidas equações de perda de carga para as pressões de entrada de 40, 50, 60, 70, 80 e 90 kPa e foram utilizados dois segmentos de tubo de 20,87 m. Para cada pressão de entrada e para cada segmento de tubo com emissores vedados, mediu-se a perda de carga com vazões crescentes e decrescentes, em incrementos de $0,2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Para cada seção de abertura da válvula proporcional, foram registrados 30 pares de pontos vazão x perda de carga. Foram feitas medições em 20 seções de abertura, totalizando 600 pares de pontos para cada amostra em cada pressão de entrada.

A correção da massa específica da água em função da temperatura, especificada para a pressão atmosférica de 101,3 kPa e aceleração da gravidade de $9,807 \text{ m s}^{-2}$, foi feita pela

equação proposta por Tanaka (2001) (Eq. 9). O coeficiente de viscosidade cinemática da água (ϑ , $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), em função da temperatura (T , $^{\circ}\text{C}$), foi calculado de acordo com Rodríguez-Sinobas et al. (1999) (Eq. 3).

$$\rho(T) = a_5 \left[1 - \frac{(T + a_1)^2 (T + a_2)}{a_3 (T + a_4)} \right] \quad 9$$

em que:

$\rho(T)$: massa específica da água para temperaturas entre 0 e 40 $^{\circ}\text{C}$, à pressão atmosférica de 101,325 kPa, (kg m^{-3});

T : temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$);

a_1 : -3,983035 $^{\circ}\text{C}$;

a_2 : 301,796 $^{\circ}\text{C}$;

a_3 : 522528,9 $^{\circ}\text{C}$;

a_4 : 69,34881 $^{\circ}\text{C}$;

a_5 : 999,974950 kg m^{-3} .

A perda de carga registrada experimentalmente na temperatura T_{ensaio} foi corrigida para a temperatura T_{23} utilizando-se o seguinte fator de multiplicação (Eq. 10):

$$\lambda = \frac{\vartheta_{T_{23}}}{\vartheta_{T_{\text{ensaio}}}} \quad 10$$

Para cada pressão de entrada, foram ensaiados dois segmentos distintos de tubo, obtendo-se um conjunto de 1200 pares de pontos $Q \times J$.

3.3 Análise dos dados

Considerando o diâmetro constante para a tubulação em nível, foram estudadas as relações entre vazão e perda de carga para cada uma das pressões de entrada. Ajustaram-se equações empíricas de perda de carga unitária em função da vazão, utilizando-se um modelo do tipo potência, na forma da Eq. 11:

$$J = \beta Q^m \quad 11$$

sendo, J - perda de carga unitária no tubo, $m\ m^{-1}$; Q - vazão, $m^3\ s^{-1}$; β - constante de regressão que depende do tubo estudado em - constante de regressão que depende do regime de escoamento. Para o ajuste manteve-se $m = 1,75$ para possibilitar a comparação com a equação de Darcy-Weisbach, com f calculado por Blasius.

Para relacionar o diâmetro interno do tubo (D , m) com a carga de pressão (H , mca) utilizou-se um modelo potencial (Eq. 12) cujos valores dos coeficientes para os tubos estudados, à temperatura de $23\ ^\circ C$, foram obtidos experimentalmente por Araújo (2019).

$$D = cH^d \quad 12$$

sendo para o tubo Turbo Tape $c = 0,0156$ e $d = 0,013$ ($r^2 = 0,9968$); para o Silver Drip $c = 0,0155$ e $d = 0,007$ ($r^2 = 0,9962$); e para Rain-Bird $c = 0,0157$ e $d = 0,0352$ ($r^2 = 0,9968$).

Assumindo-se que o diâmetro do tubo (D) aumenta com a carga de pressão (H) e a perda de carga reduz-se com o aumento do diâmetro, ajustou-se um modelo empírico de perda de carga para o escoamento na forma da Eq. 13.

$$J = k Q^m H^\alpha \quad 13$$

sendo J - perda de carga unitária no tubo, $m\ m^{-1}$; Q - vazão, $m^3\ s^{-1}$; k - coeficiente de ajuste; H - carga de pressão na entrada do tubo, mca; m - expoente da vazão que caracteriza o regime de escoamento e, α - coeficiente, menor que zero, que expressa o efeito da carga de pressão sobre diâmetro interno do tubo. Para esse ajuste manteve-se $m = 1,75$.

Para a determinação dos valores experimentais de f , em cada carga de pressão, utilizaram-se os valores experimentais de J e os respectivos diâmetros internos do tubo em função da carga de pressão, especificados para a temperatura de $23\ ^\circ C$, aplicando-se a Eq. 6. O número de Reynolds (R) foi calculado a partir da Eq. 2 com os dados experimentais. Os valores de f assim obtidos foram relacionados a $R^{-0,25}$ através de uma regressão linear para obter o parâmetro da Eq. 8, cujo valor corresponde ao coeficiente angular da reta tangente (a).

Analísou-se também a possibilidade de se calcular a perda de carga por atrito pela equação de Darcy-Weisbach expandindo-se a Eq. 6 para a Eq. 14, utilizando-se f expresso pela Eq. 8 e D pela Eq. 12.

$$J = \frac{8 (4)^{-b}}{\pi(2-b)} \left(\frac{a}{g}\right) g^b \frac{Q^{(2-b)}}{(cH^d)^{(5-b)}} \quad 14$$

Do conjunto total de dados obtidos experimentalmente, 70% foram utilizados para ajustes dos coeficientes das Eqs. 11, 13 e 14, enquanto que 30% dos dados foram utilizados para validação e análise de desempenho das equações.

A inferência sobre a precisão das estimativas da perda de carga em relação aos valores observados foi analisada em uma reta 1:1, pela raiz quadrada do erro médio (RMSE) e por frequência acumulada dos erros relativos das estimativas (ALI & ABUSTAN, 2014; DEVORE, 2006). O RMSE quantifica a dispersão entre valores observados e estimados e, idealmente, seu valor tende a zero.

Para verificar o efeito da presença do emissor integrado na parede interna do tubo colapsável sobre a perda de carga, foram estimados os valores de J (m m^{-1}) utilizando a Eq. 14, com o valor de a obtido experimentalmente para cada modelo de tubo e, também, estimou-se J (m m^{-1}) utilizando-se o valor de a obtido por Provenzano et al. (2016) ($a = 0,285$) para tubos lisos colapsáveis. Para comparação, foram obtidas as curvas de perda de carga J (m m^{-1}) em função da velocidade de escoamento V (m s^{-1}) para os distintos valores de a estudados. A diferença entre as curvas experimentais e obtidas com $a = 0,285$ representa o efeito da presença do emissor integrado na parede interna do tubo sobre a perda de carga. Obteve-se a diferença (ΔJ) entre os valores de J estimados a partir do valor de a experimental, com os valores de J estimados utilizando-se o valor de $a = 0,285$. Os valores de (ΔJ) obtidos foram relacionados à carga cinética ($\frac{V^2}{2g}$) por uma regressão linear cujo valor corresponde ao coeficiente angular da reta tangente (K').

Para aplicação, foram calculados os comprimentos máximos de linhas laterais de irrigação utilizando as fitas Turbo Tape, Silver Drip e Rain-Tape, com variação máxima de carga de pressão de 10%, de acordo com metodologia utilizada por Melo et al. (2019). Para comparação com outros comprimentos, utilizaram-se valores de a encontrados neste trabalho e os valores mais comuns disponíveis na literatura.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Tubos gotejadores colapsáveis com labirintos contínuos integrados à parede interna do tubo

Analisando-se a perda de carga no tubo sem orifícios, para cada uma das cargas de pressão ensaiadas foram obtidas equações ajustadas para o cálculo da perda de carga J (m m^{-1}) em função da vazão Q ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) (Quadro 3). Ajustaram-se também equações de perda de carga independente da carga de pressão. Para o modelo Turbo Tape, os ajustes apresentaram $r^2 \geq 0,9977$ e para o modelo Silver Drip foram obtidos $r^2 \geq 0,999$.

Quadro 3 – Equações de perda de carga unitária (m m^{-1}) em função da vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), para os tubos Turbo Tape (TT) ($\xi = 150 \mu\text{m}$) e Silver Drip (SD) ($\xi = 200 \mu\text{m}$)

Tubo modelo	Pressão de ensaio (kPa)	Intervalo de Q ($\times 10^{-5} \text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Intervalo de R	Equação $J = J(Q)$ (m m^{-1})	r^2
TT	40	4,33 – 19,66	4818 - 17383	$J = 287455,85 Q^{1,75}$	0,998
TT	60	8,38 – 26,25	6454 - 23177	$J = 282964,87 Q^{1,75}$	0,998
TT	80	7,77 – 32,33	6887 - 29092	$J = 281889,13 Q^{1,75}$	0,999
TT	100	14,36 – 37,25	12741 - 32855	$J = 279015,61 Q^{1,75}$	0,998
SD	40	14,16 – 41,44	6275 - 15337	$J = 289183,70 Q^{1,75}$	0,999
SD	60	9,38 – 36,86	8947 - 22490	$J = 288884,16 Q^{1,75}$	0,999
SD	80	13,72 – 32,08	11731 - 27427	$J = 288696,89 Q^{1,75}$	0,999
SD	100	7,38 – 18,00	7954 - 31414	$J = 287183,70 Q^{1,75}$	0,999

Fonte: Elaborada pela autora.

As equações apresentadas no Quadro 3 revelam pequena redução do coeficiente β da equação de perda de carga com o aumento da pressão, o que indica fraca dependência do diâmetro interno em relação à pressão de operação. Essa dependência é maior para o tubo Turbo Tape, que possui menor espessura de parede. No tubo Silver Drip, o coeficiente β reduziu-se de 289183,70 para 287183,70 (0,69%) enquanto a carga de pressão (H) aumentou de 4 mca para 10 mca (60%). Nesse intervalo de carga de pressão, o diâmetro aumentou de 15,65 mm para 15,75 mm (0,64%). Já para o tubo Turbo Tape, o coeficiente β reduziu-se 2,94% nesse mesmo acréscimo de carga de pressão, enquanto o diâmetro aumentou de 15,88 mm para 16,07 mm (1,18%). Melo et al. (2019) estudaram a perda de carga em tubos de polietileno flexíveis, perfurados a laser, com D especificado pelo fabricante de 28 mm e $\xi =$

200 μm , e encontram 19,34% de redução na perda de carga com um aumento de 50% na pressão de operação.

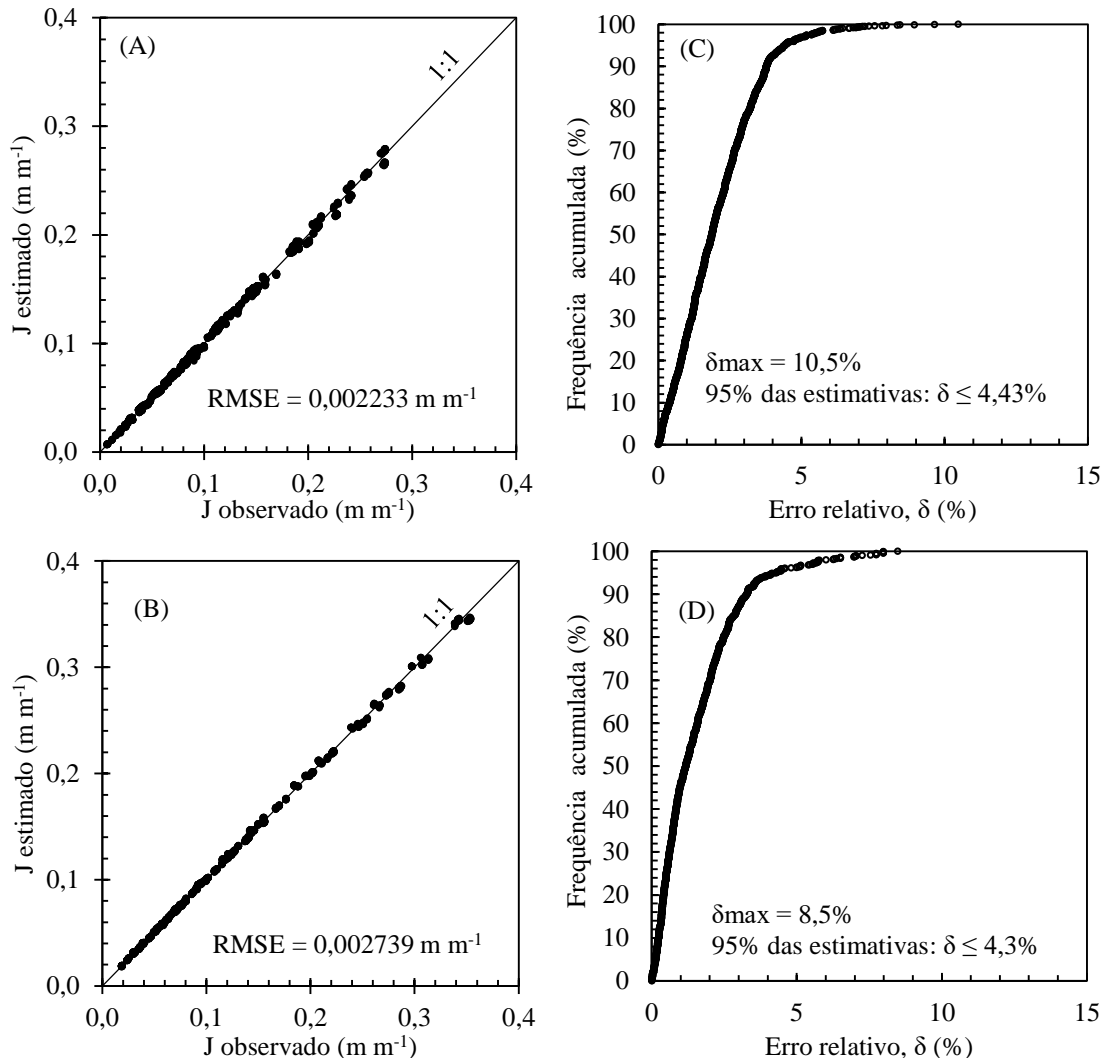
Utilizando-se os dados experimentais de perda de carga (J , m m^{-1}) em função da vazão (Q , $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) e da carga de pressão (H , mca), ajustaram-se equações empíricas de perda de carga para os dois modelos de tubos estudados, obtendo-se a Eq. 15 para o modelo Turbo Tape e a Eq. 16 para o modelo Silver Drip.

$$J = 297553,1 Q^{1,75} H^{-0,02706} \quad r^2 = 0,998 \quad 15$$

$$J = 289934,4 Q^{1,75} H^{-0,00221} \quad r^2 = 0,999 \quad 16$$

A concordância entre as perdas de carga observadas e estimadas pelas Eqs. 15 e 16 é apresentada na Figura 4. Nos dois modelos avaliados, para o conjunto de dados, observa-se boa distribuição entre os pares de pontos em torno da reta 1:1. O RMSE é próximo de zero para os dois modelos. A carga de pressão apresenta pequeno efeito na perda de carga, pois são pequenos os valores dos expoentes da carga de pressão. Esse efeito é maior para o Turbo Tape.

Figura 4 – Concordância entre perdas de carga observadas e estimadas (A) para o modelo Turbo Tape (Eq. 15); (B) para o modelo Silver Drip (Eq. 16); Gráfico de análise de erros apresentando erros relativos em função da frequência de ocorrência (C) para o modelo Turbo Tape (Eq. 15); e (D) para o modelo Silver Drip (Eq.16)



Fonte: Elaborada pela autora.

As estimativas com a Eq. 15 (Turbo Tape) apresentaram erro relativo máximo de 10,5%, sendo que 95% das estimativas apresentam erro relativo de até 4,43%. As estimativas com a Eq. 16 (Silver Drip) apresentaram erro relativo máximo de 8,5%, sendo que 95% das estimativas apresentam erro relativo de até 4,3%. Essa análise indica que as Eq. 15 e 16 são aptas para calcular a perda de carga nos tubos estudados.

Pela fraca dependência de J em relação a H , ajustaram-se equações empíricas de perda de carga (J , m m^{-1}), em função da vazão (Q , $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$), independente da carga de pressão de

operação. Foram encontrados altos coeficientes de determinação, sendo 0,9984 para o modelo Turbo Tape (Eq. 17) e 0,9994 para o modelo Silver Drip (Eq. 18).

$$J = 281028,74 Q^{1,75} \quad 4818 \leq R \leq 32855 \quad 17$$

$$J = 288849,08 Q^{1,75} \quad 6276 \leq R \leq 35626 \quad 18$$

Considerando que a pressão de operação do tubo Turbo Tape, especificada pelo fabricante, é 80 kPa, o uso da Eq. 17, em substituição à Eq. 15, resulta super-estimativa de 0,334% na perda de carga. Já para o tubo Silver Drip, que possui espessura de parede maior e expande-se menos com a pressão de operação, o uso da Eq. 18, ao invés da Eq. 16, proporciona super-estimativa de apenas 0,053%.

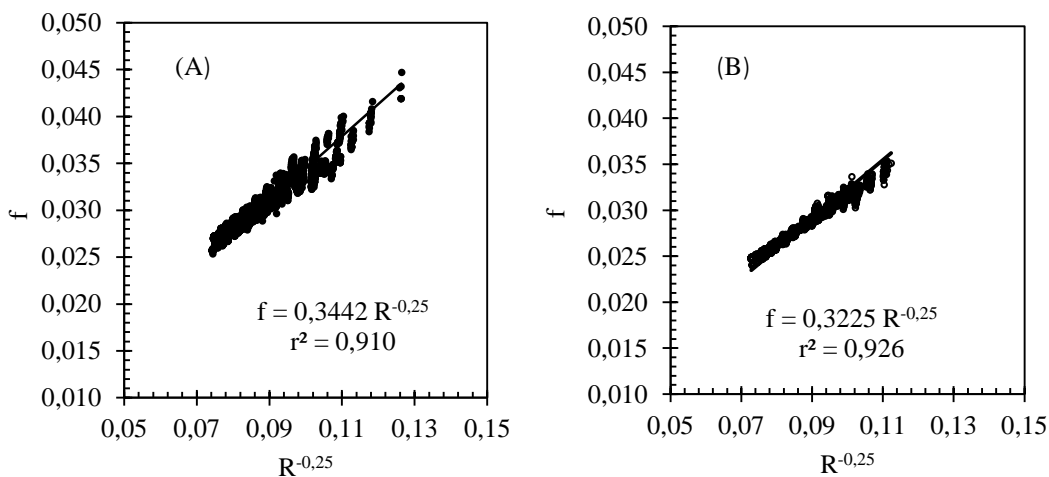
Provenzano et al. (2016) apontam que a carga de pressão ao longo da linha lateral de gotejamento é influenciada pela perda de carga e pelas mudanças de elevação. Ainda, a geometria de um tubo colapsável varia de uma seção para outra ao longo da direção do fluxo, de acordo com as reduções da carga de pressão, de forma que o cálculo da perda de carga ao longo de um determinado comprimento da linha torna-se complexo (RETTORE NETO et al., 2014). Para efeitos de aplicação, o uso de um diâmetro médio constante ao longo da linha de gotejamento pode constituir uma aproximação razoável para a previsão da perda de carga, pois, o comprimento máximo dessa linha é projetado para uma pequena variação de pressão (por exemplo 5%). Se considerarmos que a carga máxima de pressão de operação na entrada da lateral é 80 kPa, então a carga mínima será 76 kPa. Isso produzirá uma redução de diâmetro para o tubo Silver Drip de apenas 0,064% (15,73 mm para 15,72 mm) e para o tubo Turbo Tape de 0,125% (16,03 mm para 16,01 mm). Para melhorar a estimativa da perda de carga ao longo da linha lateral de gotejamento, pode-se utilizar um procedimento trecho a trecho, e calcular o diâmetro em função da carga de pressão nos extremos de cada trecho.

Tompson et al. (2011), por determinações experimentais utilizando tubos de polietileno colapsáveis, mostraram que a perda de carga por atrito medida é praticamente a mesma, independente de qual estimativa de diâmetro efetivo é usada (diâmetro igual a quatro vezes o raio hidráulico ou o diâmetro médio efetivo do tubo). Em todos os casos, o uso do raio hidráulico tendeu a subestimar a perda de carga por atrito. Na maioria dos casos, o uso do diâmetro efetivo do tubo em função da carga de pressão tornou a estimativa da perda de carga mais acurada.

Na Figura 5 são apresentadas as curvas relacionando o fator de atrito (f) em função do número de Reynolds (R) para os dois tubos estudados, utilizando os dados experimentais,

independentes da pressão de operação, com $b = 0,25$. Foram encontrados valores do coeficiente $a = 0,3442$ para o tubo Turbo Tape e $a = 0,3225$ para o tubo Silver Drip, correspondentes à inclinação da reta $f(R^{-0,25})$. Analisando-se pelo valor modal, correspondente ao centro da classe de maior frequência, obteve-se $a = 0,3467$ para o tubo Turbo Tape e $a = 0,3233$ para o Silver Drip. Como esses valores convergem para os valores correspondentes aos coeficientes angulares, pode-se inferir que a distribuição de probabilidades dos coeficientes aproxima-se da normal.

Figura 5 – Fator de atrito (f) ajustado com $b = 0,25$; (A) para o modelo Turbo Tape, e (B) para o modelo Silver Drip



Fonte: Elaborada pela autora.

Nesta pesquisa, os valores de a são superiores aos de Blasius proposto para tubos lisos (0,3164), e também aos encontrados por Bagarello et al. (1995) (0,302) e Cardoso et al. (2008) (0,300), para tubos de polietileno não colapsáveis, e por Provenzano et al (2016) (0,285), para tubos de polietileno colapsáveis. Embora os tubos estudados sejam de polietileno colapsáveis, possuem no seu interior um labirinto contínuo integrado na parede interna do tubo, causando aumento do fator de atrito. Nota-se que o modelo Turbo Tape apresentou coeficiente superior ao modelo Silver Drip. Esse fato se justifica pela diferença na largura da fita contínua de emissores, sendo que o modelo Turbo Tape apresenta maior largura (7,9 mm) que o Silver Drip (4,6 mm). O modelo de cálculo de a e b proposto por Sousa e Dantas Neto (2016) relaciona esses parâmetros com o diâmetro do tubo. Considerando-se a pressão de operação de 80 kPa, recomendada pelos fabricantes, os

diâmetros dos tubos, determinados hidraulicamente, são 16,03 mm e 15,73 mm, para o Turbo Tape e Silver Drip, respectivamente. Nesse caso, de acordo com Sousa e Dantas Neto (2016), para o Turbo Tape $a = 0,2918$ e $b = 0,2440$; para o tubo Silver Drip $a = 0,2931$ e $b = 0,2444$. Esses valores também são inferiores aos obtidos neste trabalho.

Aplicaram-se os parâmetros das Eq. 8 e 12 na Eq. 14 para cada modelo de tubo, para analisar o uso da equação de Darcy-Weisbach para o cálculo da perda de carga nos tubos estudados, com $b = 0,25$ e D uma função da carga de pressão. Para o tubo Turbo Tape foram utilizados $a = 0,3442$, $c = 0,0156$ e $d = 0,013$, encontrando-se a Eq. 19. Para o tubo Silver Drip foram utilizados $a = 0,3225$, $c = 0,0155$ e $d = 0,07$, obtendo-se a Eq. 20. Essas equações são expressões da equação de Darcy-Weisbach, reescritas com os valores experimentais dos coeficientes, especificadas para a temperatura de 23 °C ($\vartheta = 0,932515 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$).

$$J = 8,3199 \times 10^{-4} \frac{Q^{1,75}}{(0,0156 H^{0,013})^{4,75}} \quad 19$$

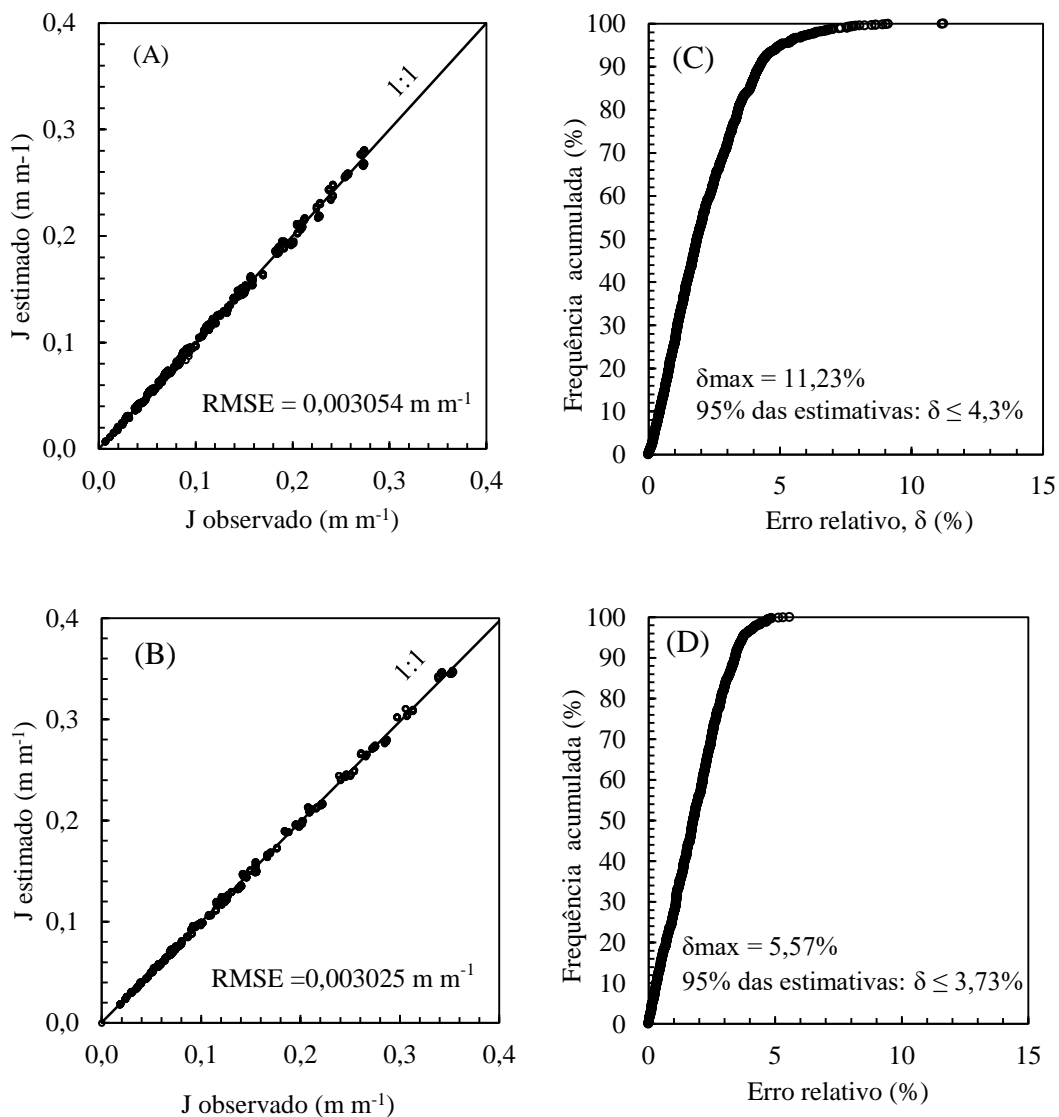
$$J = 7,7954 \times 10^{-4} \frac{Q^{1,75}}{(0,0155 H^{0,007})^{4,75}} \quad 20$$

Na Figura 6, apresenta-se a concordância entre os valores de perda de carga estimada (Eq. 19 e 20) e observada. O RMSE é baixo, indicando pequeno desvio médio entre valores observados e preditos. A distribuição de frequências acumuladas dos erros relativos indicou que, para o tubo Turbo Tape, o erro máximo da estimativa é 11,23% e 95% das estimativas apresentam erro de até 4,3%. Para o modelo Silver Drip, o erro máximo encontrado foi 5,57% e 95% das estimativas apresentam erros relativos iguais ou inferiores a 3,73%.

Analisou-se também o desempenho da equação de Darcy-Weisbach quando se utiliza um diâmetro médio ótimo, independente da carga de pressão de operação, nas Eq. 19 e 20. Nesse caso, os diâmetros que minimizaram RMSE foram 16,01 mm para o Turbo Tape e 15,71 mm para o Silver Tape. Na Figura 7 observa-se a concordância entre valores estimados e observados de J para os dois modelos de tubos, para os quais foram encontrados bons índices de desempenho. Para o Turbo Tape, a distribuição de frequências acumuladas indicou erro máximo mantendo-se em 11,23% e que 95% dos erros são iguais ou inferiores a 5%. Para o modelo Silver Drip, o erro máximo foi 8,5% e 95% dos erros foram de até 4,16%. Propõe-se, portanto, que a perda de carga nos tubos estudados seja calculada pela equação de Darcy-Weisbach, com os diâmetros médios apresentados e fator de atrito (f) calculado com $b = 0,25$ e $a = 0,3442$ para o Turbo Tape e $a = 0,3225$ para o Silver Drip, independente da carga de

pressão de operação nos limites de pressão analisados. Observa-se que o diâmetro de 16,01 mm para o Turbo Tape corresponde àquele que seria obtido com $H = 7,36$ mca e, para o Silver Drip, o diâmetro de 15,71 mm seria obtido para $H = 6,84$ mca.

Figura 6 – Concordância entre perdas de carga observadas e estimadas (A) para o modelo Turbo Tape (Eq. 19); (B) para o modelo Silver Drip (Eq. 20); Gráfico de análise de erros apresentando erros relativos em função da frequência de ocorrência; (C) para o modelo Turbo Tape e (D) para o modelo Silver Drip

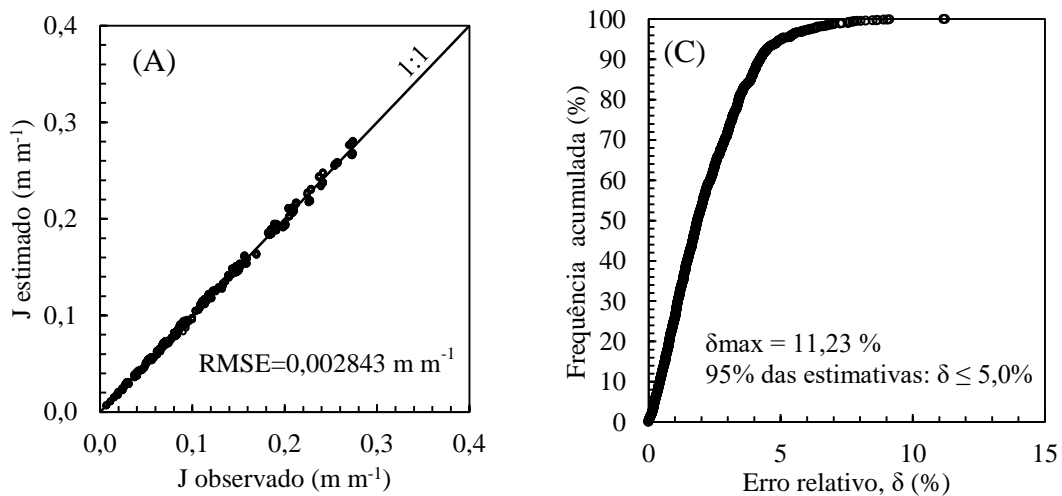


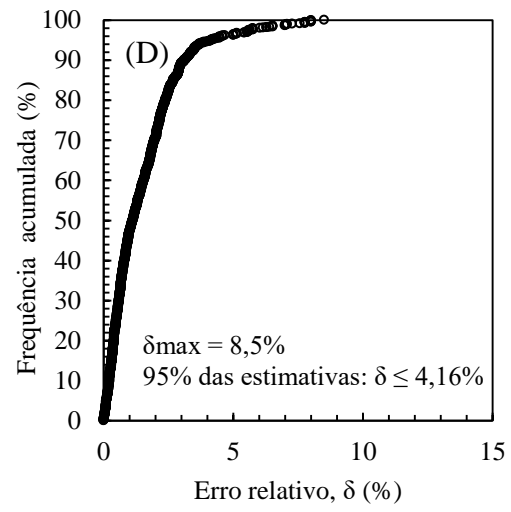
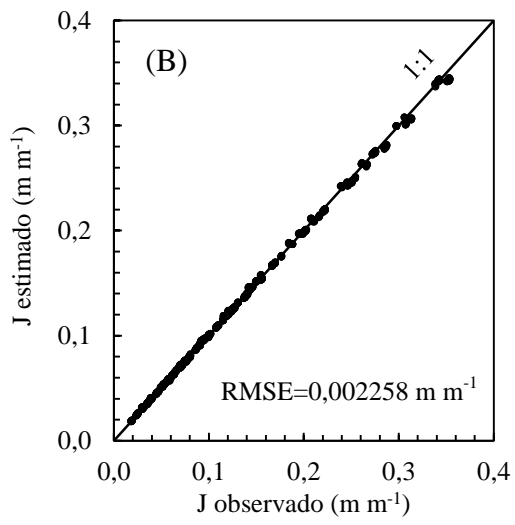
Fonte: Elaborada pela autora.

Os fabricantes desses tubos recomendam pressão de operação de 80 kPa e informam diâmetros de 15,90 mm para o Turbo Tape e 16,22 mm para o Silver Drip. Nesses casos, o

erro decorrente do cálculo da perda de carga pela equação de Darcy-Wiesbach pode ser considerável (Figura 8). Para o tubo Silver Drip, o erro foi maior que para o tubo Turbo Tape. Observa-se na Figura 8, especialmente para o Silver Drip, que os pontos desalinham-se em relação à reta identidade e o RMSE aumentou em relação ao encontrado para o diâmetro ótimo. Já o Turbo Tape apresentou desvios menores porque o diâmetro informado pelo fabricante é próximo do diâmetro ótimo. Para o Turbo Tape, a distribuição de frequências acumuladas indicou erro máximo de 13,3% e que 95% dos erros são iguais ou inferiores a 7,57%. Para o modelo Silver Drip, o erro máximo foi 16,39% e 95% dos erros foram de até 15,54%.

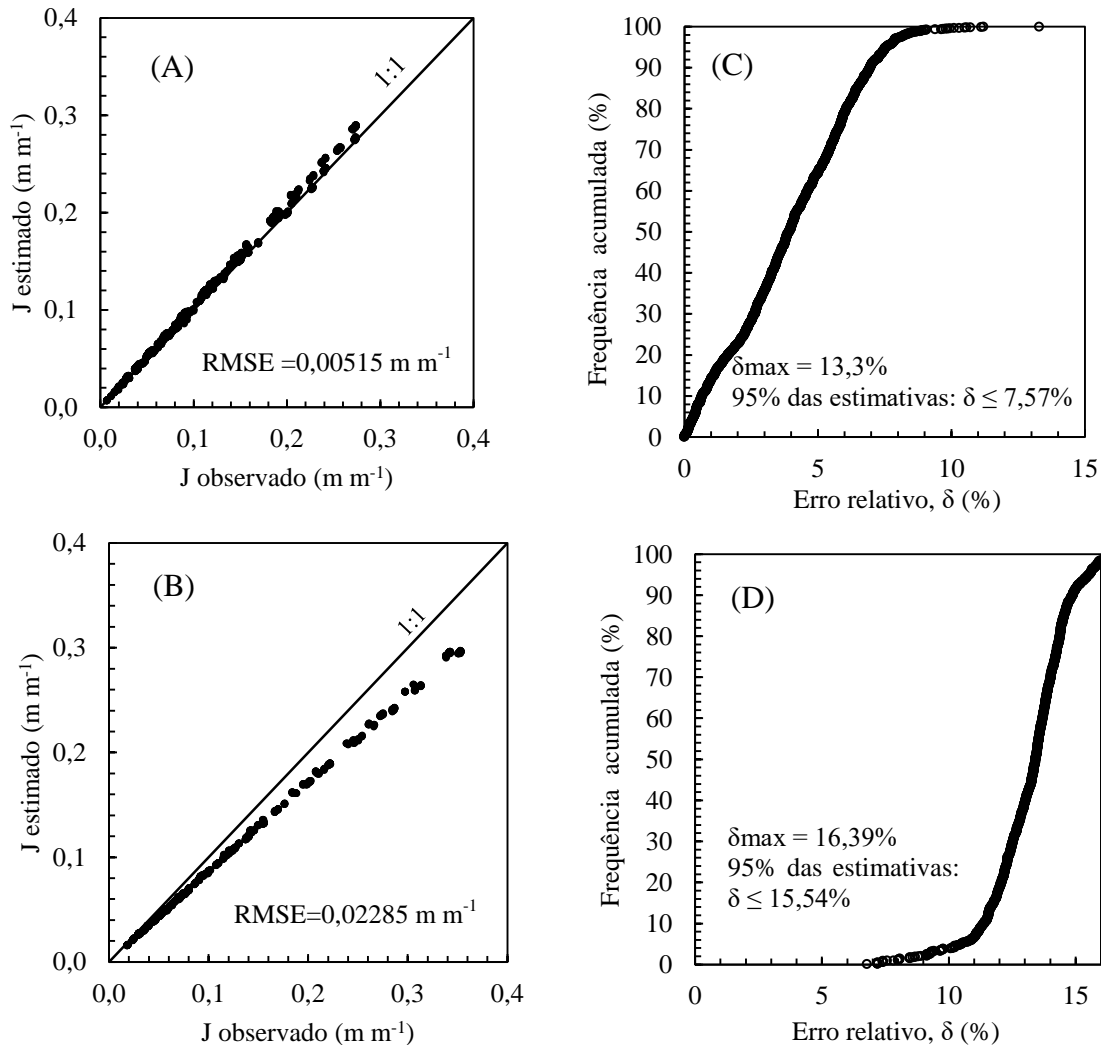
Figura 7 – Concordância entre perdas de carga observadas e estimadas (A) para o Turbo Tape (Eq. 19), com diâmetro médio $D = 16,01$ mm; (B) para o Silver Drip (Eq. 20), com diâmetro médio $D = 15,71$ mm. Gráfico de análise de erros relativos em função da frequência de ocorrência (C) para o modelo Turbo Tape; e (D) para o modelo Silver Drip





Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 8 – Concordância entre perdas de carga observadas e estimadas com diâmetro informado pelo fabricante (A) Turbo Tape com $D = 15,9$ mm (Eq. 19); e (B) Silver Drip com $D = 16,22$ mm (Eq. 20); Gráfico de análise de erros relativos em função da frequência de ocorrência (C) para o modelo Turbo Tape; e (D) para o modelo Silver Drip



Fonte: Elaborada pela autora.

Na Tabela 1 observa-se a comparação entre os comprimentos máximos de linhas laterais com Turbo Tape e Silver Drip, calculados com os valores de a obtidos nesta pesquisa e alguns valores disponíveis na literatura. Os comprimentos máximos das linhas laterais foram estimados adotando o critério de 10% de variação máxima de pressão na linha lateral sob a carga de pressão na entrada de 8 mca. Verifica-se que para $a = 0,285$, indicado por Provenzano et al. (2016), para tubos de polietileno colapsáveis, o comprimento máximo calculado para a linha lateral com o Turbo Tape foi 7,1% superior ao comprimento calculado com $a = 0,3442$ indicado neste trabalho e 3,1% maior que o calculado com $a = 0,3164$

comumente referenciado na literatura. O Tubo Silver Drip apresentou menores diferenças no cálculo do comprimento máximo, isto porque o valor de a para este tubo é menor em relação ao Turbo Tape.

Tabela 1 – Comprimentos máximos calculados para linhas laterais com tubos gotejadores Turbo Tape (TT) e Silver Drip (SD), para diferentes valores de a relatados na literatura com $b = 0,25$, utilizando diâmetros médios estimados e equação de Darcy-Weisbach

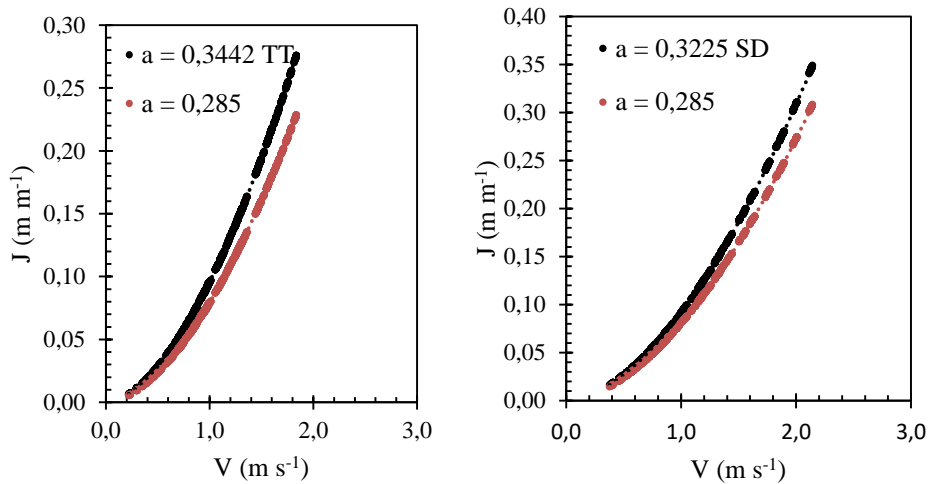
Tubo modelo	D (mm)	a	$L_{\text{máx}}$ (m)	Varição de comprimento máximo (%)
TT	16,01	0,285	69,5	+ 7,1
TT	16,01	0,3164	66,9	+ 3,1
TT	16,01	0,3442	64,9	---
SD	15,71	0,285	104,6	+ 4,7
SD	15,71	0,3164	100,6	+ 0,7
SD	15,71	0,3225	99,9	---

Fonte: Elaborada pela autora.

A Figura 9 apresenta as curvas obtidas com os valores estimados de J (m m^{-1}) utilizando a Eq. 14 com o valor de a obtido experimentalmente ($a = 0,3442$ para Turbo tape; e $a = 0,3225$ para Silver Drip) e J estimado utilizando o valor de a obtido para tubos lisos colapsáveis por Provenzano et al. (2016) ($a = 0,285$). Para comparação, foram obtidas as curvas de perda de carga unitária J (m m^{-1}) em função da velocidade de escoamento V . A diferença entre as curvas (ΔJ) representa o efeito da presença do emissor contínuo na perda de carga.

Na Figura 9 observa-se que a perda de carga unitária J em função da velocidade de escoamento V (m s^{-1}) é maior quando se utiliza o valor de a obtido neste trabalho para ambos os modelos de tubos. Esse comportamento deve-se à presença do emissor contínuo soldado na parede interna dos tubos estudados, responsáveis por causar um aumento no fator de atrito. Verifica-se que esse efeito foi maior para Turbo Tape, o que pode ser justificado pela maior largura do emissor contínuo quando comparado ao Silver Drip. Para ambos, a diferença entre as curvas aumenta conforme aumenta velocidade de escoamento.

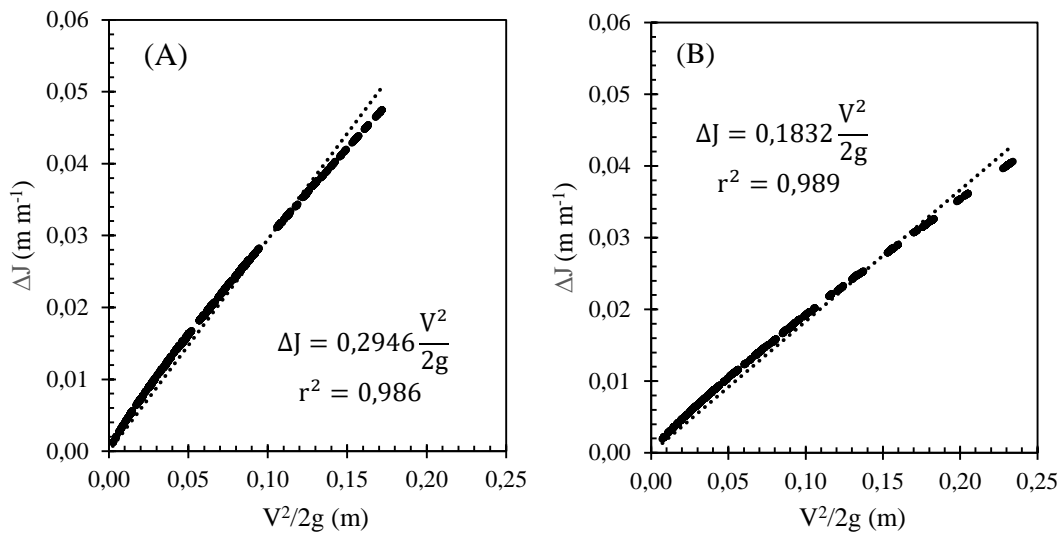
Figura 9 – J (m m^{-1}) estimado (Eq. 14) com o valor de a obtido experimentalmente ($a = 0,3442$ para Turbo tape; e $a = 0,3225$ para Silver Drip) e J estimado para tubos lisos colapsáveis por Provenzano et al. (2016) ($a = 0,285$) em função da velocidade de escoamento V (m s^{-1})



Fonte: Elaborada pela autora.

Foram obtidas as diferenças (ΔJ) entre os valores de J estimados com os valores de a experimentais e os valores de J estimados utilizando-se $a = 0,285$. Os valores de perda de carga decorrentes da presença do emissor contínuo (ΔJ) foram relacionados a $\left(\frac{V^2}{2g}\right)$ por regressão linear para obter o parâmetro K' , cujo valor corresponde ao coeficiente angular da reta tangente (Figura 10). Da análise resultou $K' = 0,2946$ ($r^2 = 0,986$) e $K' = 0,1832$ ($r^2 = 0,989$) respectivamente para o Turbo Tape e o Silver Drip. Para uma velocidade de referência de $1,0 \text{ m s}^{-1}$, esses coeficientes proporcionaram acréscimos de perda de carga de $0,015 \text{ m m}^{-1}$ e $0,009 \text{ m m}^{-1}$ nas perdas de carga contínuas dos tubos Turbo Tape e Silver Drip, respectivamente.

Figura 10 – Perda de carga causada pelo emissor contínuo (ΔJ) (m m^{-1}) em função da carga cinética ($V^2/2g$) (m); (A) para o modelo Turbo Tape e (B) para o modelo Silver Drip



Fonte: Elaborada pela autora.

4.2 Tubo gotejador com emissores moldados na parede interna do tubo

No Quadro 4, apresenta-se, para cada uma das pressões ensaiadas e para o tubo com orifícios vedados, as equações ajustadas para cálculo da perda de carga unitária (J , m m^{-1}) em função da vazão (Q , $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$). Nos ajustes foram obtidos $r^2 \geq 0,993$.

As equações apresentadas no Quadro 4 revelam redução do coeficiente β da equação de perda de carga com o aumento da pressão, o que indica dependência do diâmetro interno em relação à pressão de operação. O coeficiente β reduziu-se de 269663,5 para 243988,9 (10,52%) enquanto a carga de pressão (H) aumentou de 4 mca para 9 mca (55,55%). Nesse intervalo de carga de pressão, o diâmetro interno aumentou de 16,56 mm para 17,04 mm (2,82%). Melo et al. (2019) estudaram a perda de carga em tubos de polietileno flexíveis, perfurados a laser, com D especificado pelo fabricante de 28 mm e espessura de parede 200 μm , e encontram 19,34% de redução na perda de carga com um aumento de 50% na pressão de operação.

Quadro 4 – Equações de perda de carga unitária (m m^{-1}) em função vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) para o tubo Rain-Tape

Pressão de ensaio (kPa)	Intervalo de Q ($\times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$)	Intervalo de R	Equação $J = J(Q)$ (m m^{-1})	r^2
40	7,55 – 19,38	6668 - 17111	$J = 269663,5 Q^{1,75}$	0,993
50	11,94 – 22,33	7323 - 24274	$J = 249187,6 Q^{1,75}$	0,999
60	8,30 – 27,53	7700 - 10706	$J = 247611,9 Q^{1,75}$	0,999
70	11,20 – 30,30	9908 - 26730	$J = 246220,9 Q^{1,75}$	1,000
80	12,50 – 33,72	10893 - 29306	$J = 243988,9 Q^{1,75}$	0,999
90	13,30 – 36,20	11572 - 31536	$J = 243617,9 Q^{1,75}$	0,999

Fonte: Elaborado pela autora.

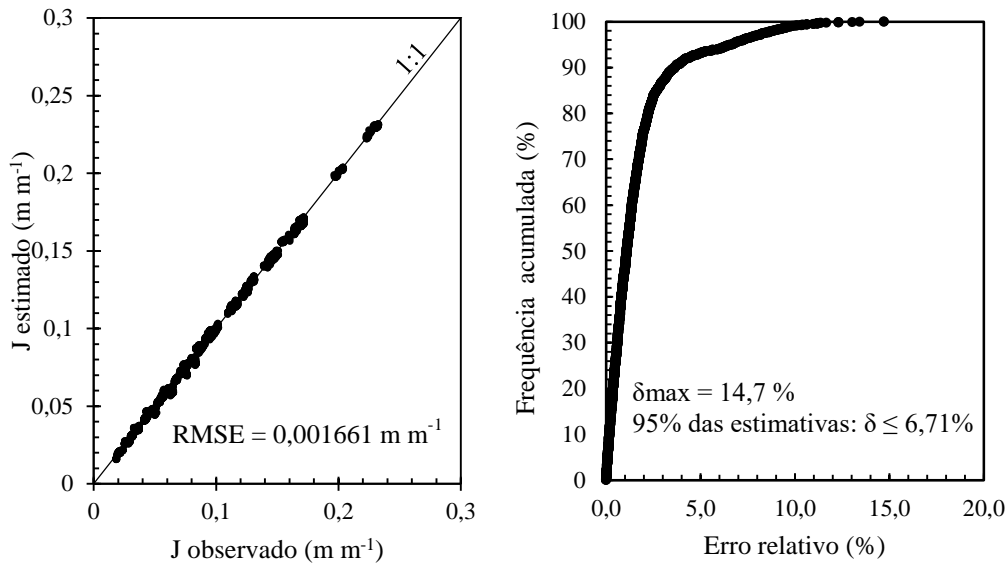
Ajustou-se uma equação empírica de perda de carga, com os dados experimentais de perda unitária de carga (J , m m^{-1}) em função da vazão (Q , $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) e da pressão de entrada (H , m), obtendo-se a equação (21).

$$J = 280625,9 Q^{1,75} H^{-0,06652} \quad r^2 = 0,999 \quad 21$$

A concordância entre as perdas de carga observadas nos ensaios e as perdas de carga estimadas pela equação ajustada é apresentada na Figura 11. Para o conjunto de dados utilizados, observa-se boa distribuição entre os pares de pontos em torno da reta 1:1. O RMSE é próximo de zero, indicando boa acurácia nas estimativas realizadas pelo modelo empírico. As estimativas realizadas com a equação (21) indicam erro relativo máximo de 14,7%, sendo que 95% das estimativas apresentam erro relativo de até 6,71%.

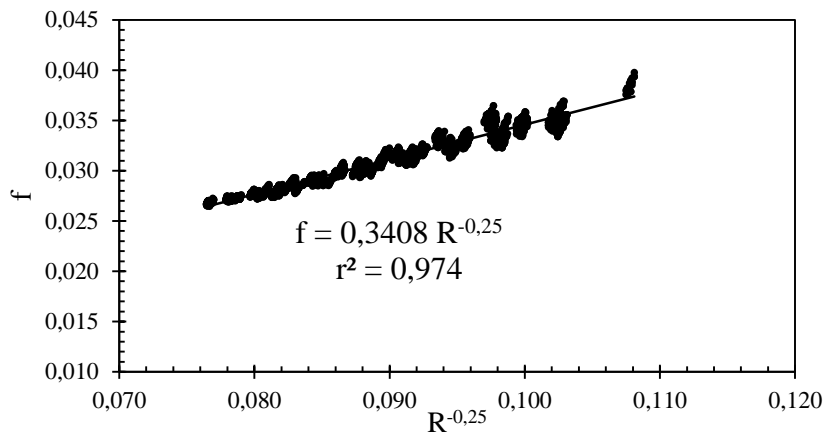
Na Figura 12 apresenta-se a curva f em função de $R^{-0,25}$ para os dados experimentais, independentes da pressão de operação. O coeficiente angular obtido foi $a = 0,3408$ ($r^2 = 0,974$), superior ao proposto por Blasius (0,3164), como esperado por se tratar de um tubo gotejador com emissores moldados na parede interna do tubo, causando o aumento do fator de atrito. Bernuth e Wilson (1989) encontraram $a = 0,345$ para tubos de PVC. Para tubos de polietileno não colapsáveis, Alves (2000) encontrou $a = 0,295$, Bagarello et al. (1995) 0,302 e Cardoso et al. (2008) encontraram 0,300.

Figura 11 – Concordância entre perdas de carga observadas e perdas de carga estimadas pela equação ajustada (Eq. 21) para o tubo Rain-Tape



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 12 – Fatores de atrito (f) experimentais ajustados com $b = 0,25$ para o tubo Rain-Tape



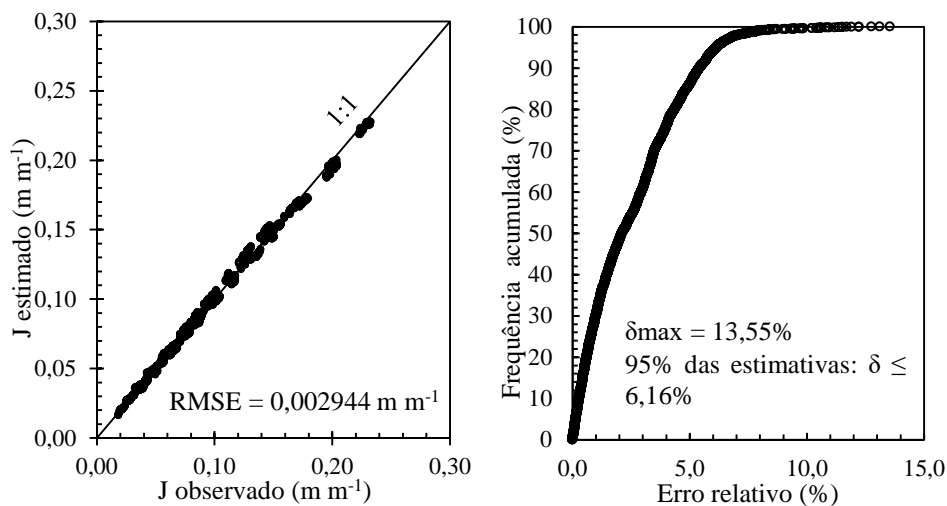
Fonte: Elaborada pela autora.

Aplicaram-se os parâmetros das Eq. 8 e 12 na Eq. 14 para analisar o uso da equação de Darcy-Weisbach para o cálculo da perda de carga no tubo Rain-Tape, com $b = 0,25$ e D uma função da carga de pressão. Foram utilizados $a=0,3408$, $c=0,0157$ e $d=0,0352$, encontrando-se a Eq. 22. Essa equação é a expressão da equação de Darcy-Weisbach, reescrita com os valores experimentais dos coeficientes, para a temperatura de 23 °C ($\vartheta = 0,932515 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$).

$$J = 8,2377 \times 10^{-4} \frac{Q^{1,75}}{(0,0157 H^{0,0352})^{4,75}} \quad 22$$

Na Figura 13, apresenta-se a concordância entre os valores de perda de carga estimada (Eq. 22) e observada. O RMSE é baixo, indicando pequeno desvio médio entre valores observados e preditos. A distribuição de frequências acumuladas dos erros relativos indicou erro máximo da estimativa de 13,55% e 95% das estimativas apresentam erro de até 6,16%.

Figura 13 – Concordância entre perdas de carga observadas e perdas de carga calculadas pela equação ajustada (Eq. 22) para o tubo Rain-Tape



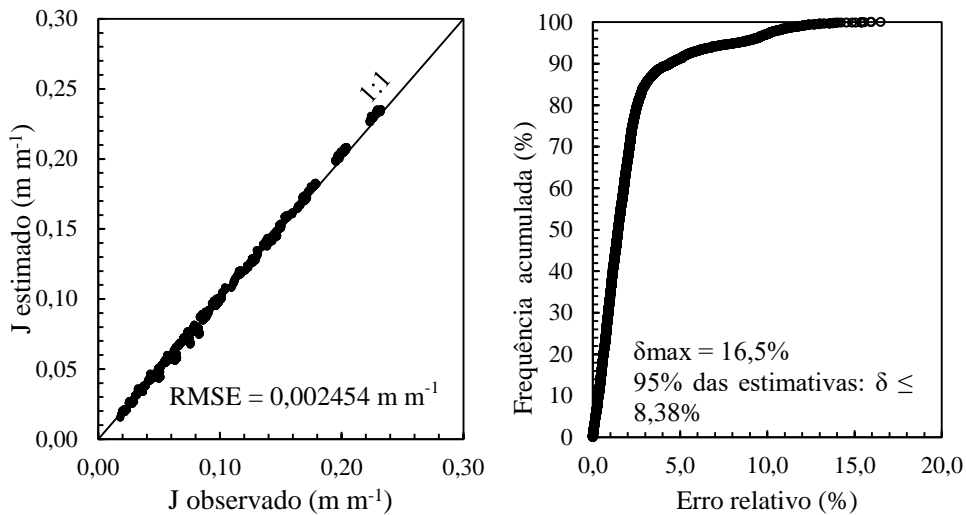
Fonte: Elaborada pela autora.

Analisou-se também o desempenho da equação de Darcy-Weisbach quando se utiliza um diâmetro médio ótimo, independente da carga de pressão de operação, na Eq. 22. Nesse caso, o diâmetro que minimizou RMSE foi 16,4 mm. Na Figura 14, observa-se a concordância entre valores de J estimados e observados nos quais foi encontrado bom índice de desempenho. A distribuição de frequências acumuladas indicou erro máximo de 16,5% e que 95% dos erros são iguais ou inferiores a 8,38%. Propõe-se, portanto, que a perda de carga no tubo Rain-Tape seja calculada pela equação de Darcy-Weisbach, com o diâmetro médio apresentado e fator de atrito f com $b = 0,25$ e $a = 0,3408$, independente da carga de pressão de operação nos limites de pressão analisados.

Os fabricantes desses tubos recomendam pressão de operação de 55 kPa e informam diâmetros de 16 mm. Utilizando-se esse diâmetro, o erro decorrente no cálculo da perda de carga pela equação de Darcy-Wiesbach pode ser considerável (Figura 15). Observa-se que os

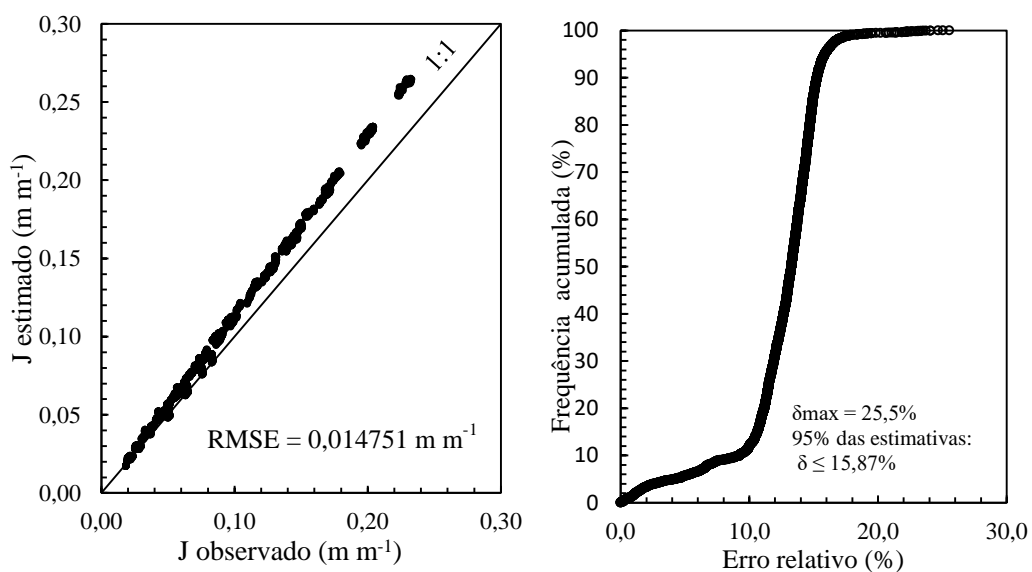
pontos desalinham-se em relação à reta identidade e o RMSE aumentou em relação ao encontrado para o diâmetro ótimo. A distribuição de frequências acumuladas indicou erro máximo de 25,5% e que 95% dos erros são iguais ou inferiores a 15,87%.

Figura 14 – Concordância entre perdas de carga observadas e estimadas (Eq. 22), com diâmetro médio $D = 16,4$ mm para o tubo Rain-Tape



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 15 – Concordância entre perdas de carga observadas e estimadas (Eq. 22), com diâmetro informado pelo fabricante $D = 16$ mm para o tubo Rain-Tape



Fonte: Elaborada pela autora.

Na Tabela 6, observa-se a comparação entre os comprimentos máximos de linhas laterais calculados com os valores de a obtidos nesta pesquisa e alguns valores disponíveis na literatura. Os comprimentos máximos das linhas laterais foram estimados adotando o critério de 10% de variação máxima de pressão na linha lateral sob a carga de pressão na entrada de 5,5 mca. Verifica-se que para $a = 0,285$, indicado por Provenzano et al. (2016), para tubos lisos de polietileno colapsáveis, o comprimento máximo calculado para a linha lateral foi 6,6% superior ao comprimento calculado com $a = 0,3408$ indicado neste trabalho e 3,0% maior que o calculado com $a = 0,3164$ comumente referenciado na literatura.

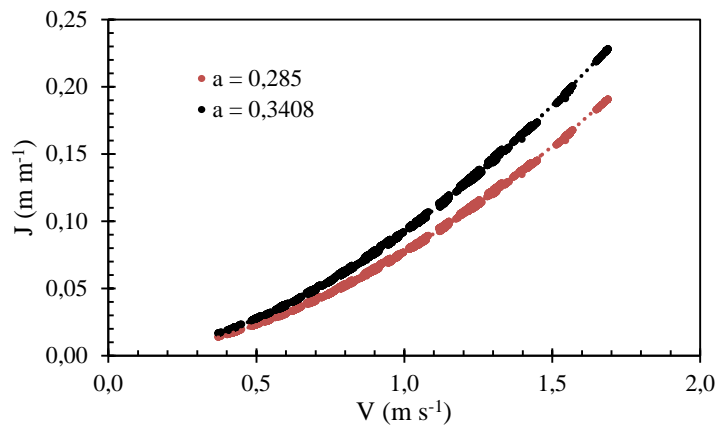
Tabela 2 – Comprimentos máximos calculados para linhas laterais para o tubo gotejador Rain-Tape, para diferentes valores de a relatados na literatura com $b = 0,25$, utilizando diâmetro médio estimado e equação de Darcy-Weisbach

a	$L_{\text{máx}} \text{ (m)}$	Varição de comprimento máximo (%)
0,285	135,0	+ 6,6
0,3164	129,9	+ 3,0
0,3408	126,0	---

Fonte: Elaborada pela autora.

A Figura 16 apresenta as curvas obtidas com os valores estimados de J (m m^{-1}) utilizando a Eq. 22 com o valor de a obtido experimentalmente ($a = 0,3408$) e J estimado pelo valor de a obtido para tubos lisos colapsáveis $a = 0,285$. Para fins de comparação, foram obtidas as curvas de perda de carga unitária J (m m^{-1}) em função da velocidade de escoamento V (m s^{-1}). A diferença entre as curvas (ΔJ) representa o efeito da presença do dispositivo moldado na perda de carga por atrito. Na Figura 16 observa-se que a perda de carga unitária J (m m^{-1}) em função da velocidade de escoamento V (m s^{-1}) foi superior quando se utilizou o valor de a obtido neste trabalho. Isso se deve à presença do emissor moldado na parede interna do tubo, responsável por causar um aumento no fator de atrito. Pode-se observar ainda que a diferença entre os valores de J aumenta com o aumento da velocidade de escoamento.

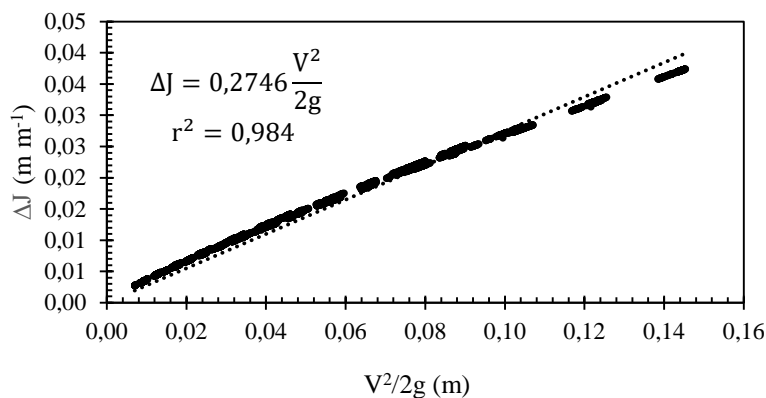
Figura 16 – J (m m⁻¹) estimado (Eq. 22) com o valor de a obtido experimentalmente (a = 0,3408) e J estimado para tubos lisos colapsáveis por Provenzano et al. (2016) (a = 0,285) em função da velocidade de escoamento (m s⁻¹) para o tubo Rain-Tape



Fonte: Elaborada pela autora.

Calculou-se a diferença entre os valores de J estimados com os dados experimentais e os valores de J estimados utilizando-se $a = 0,285$, para se obter a perda de carga causada pelo emissor moldado (ΔJ). Os valores de ΔJ obtidos foram relacionados a $\left(\frac{V^2}{2g}\right)$ por regressão linear para obter um parâmetro semelhante da Eq. 7, cujo valor corresponde ao coeficiente angular da reta tangente (K') (Figura 17). Obteve-se $K' = 0,2746$ com $r^2 = 0,984$. Para uma velocidade de referência de 1 m s^{-1} , o emissor moldado proporciona perda de carga de $0,014 \text{ m m}^{-1}$.

Figura 17 – Perda de carga causada pelo emissor moldado (ΔJ) (m m⁻¹) em função da carga cinética ($V^2/2g$) (m) para o tubo Rain-Tape



Fonte: Elaborada pela autora.

5 CONCLUSÕES

1. Para os tubos gotejadores com emissor contínuo soldado à parede interna do tubo, a investigação experimental indicou que o fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach pode ser acuradamente descrito usando uma relação potência, semelhante à equação de Blasius, mas caracterizada por um coeficiente $a = 0,3442$ para o tubo Turbo Tape e $a = 0,3225$ para o tubo Silver Tape. Para o tubo gotejador Rain-Tape, com emissores moldados, o fator de atrito calculado pela equação de Blasius deve considerar um coeficiente angular $a = 0,3408$.
2. Para o tubo Turbo Tape, o diâmetro ótimo para fins de cálculo da perda de carga é 16,01 mm, e o fabricante indica valor muito próximo (15,90 mm). Já para o tubo Silver Drip, o diâmetro ótimo é 15,71 mm, enquanto o fabricante declara 16,22 mm. Para o tubo Rain-Tape, o diâmetro ótimo para fins de cálculo da perda de carga é 16,40 mm, e o fabricante declara 16,00 mm.
3. Para todos os modelos de tubos estudados, a influência da carga de pressão no diâmetro é pequena e pode ser desconsiderada. As duas abordagens, considerando a variação do diâmetro com a carga de pressão e um diâmetro médio ótimo para o cálculo da perda de carga pela equação de Darcy-Weisbach, produzem resultados semelhantes, permitindo estimativas caracterizadas por pequeno erros.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR ISO 9261**: Equipamentos de irrigação agrícola – emissores e tubos emissores – especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2006.
- AL-AMOUD, A. I. Significance of energy losses due to emitter connections in trickle irrigation lines. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.60, n.1, p.1-5, 1995.
- ALI, M. H.; ABUSTAN, I. A new novel index for evaluating model performance. **Journal of Natural Resources and Development**, v.4, n.1, p.1-9, 2014.
- ALVES, P. R. L. **Análise de um coeficiente geométrico para estimativa da perda de carga localizada em linhas laterais de irrigação por gotejamento**. Dissertação (Mestrado). EESC/USP, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000. 163p.
- ATLAS IRRIGAÇÃO: **Uso da agricultura irrigada**. Agência Nacional das Águas. Brasília: ANA, 2017. 86 p.
- ANDRADE, D. V. **Avaliação hidráulica de tubos flexíveis de polietileno perfurados a laser, utilizados na irrigação**. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, ESALQ/USP, Piracicaba, 1990. 147p.
- ARAÚJO, A. C. S. de. **Desempenho hidráulico de fitas gotejadoras operando sob diferentes temperaturas da água**. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, ESALQ/USP, Piracicaba, 2019. 77p.
- ASABE. American Society of Agriculture and Biological Engineers. **Design and Installation of Microirrigation System**. ASABE STANDARDS 2008, EP405.1 APR1988(R2008). Sty.Joseph: ASABE, 2008.
- AYARS, J. E.; BUCKS, D. A.; LAMM, F. R.; NAKAYAMA, F. S. Chapter 1: Introduction. 1, In: LAMM, F. R.; AYARS, J. E.; NAKAYAMA, F. S. **Microirrigation for crop production: Design, operation and management**. Amsterdam: Elsevier, 2006. p. 1-26.
- AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ, M. **Manual de Hidráulica**. 9. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2015. 631p.
- BAGARELLO, V.; FERRO, V.; PROVENZANO, G; PUMO, D. Experimental study on flow resistance law for small-diameter plastic pipes. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.121, n.5, p.313-316, 1995. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(1995)121:5(313).
- BAIAMONTE, G.; PROVENZANO, G.; RALLO, G. Analytical approach determining the optimal length of paired drip laterals in uniformly sloped fields. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.141, n.1, 2015: 04014042-1. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000768.

BARDESTANI, S.; GIVEHCHI, M.; YOUNESI, E.; SAJJADI, S.; SHAMSHIRBAND, S.; PETKOVIC, D. Predicting turbulent flow friction coefficient using ANFIS technique. **Signal, Image and Video Processing**, v.11, p.341-347, 2017. DOI: 10.1007/s11760-016-0948-8.2017

BERNUTH, R. D. von; WILSON, T. Friction factor for small diameter plastic pipe. **Journal of Hydraulic Engineering**, v.115, n.2, p.183-192, 1989. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1989)115:2(183).

BOMBARDELLI, W. A.; CAMARGO, A. P., LAVANHOLI, R., ARAÚJO, A. C. S., TALAMINI JÚNIOR, M. V. T., FRIZZONE, J. A. Projeto e validação de uma bancada de ensaios de perda de carga localizada. **Irriga - Edição especial**, v.1, n.1, p. 1-10, 2017.

BRUNETTI, F. **Mecânica dos Flúidos**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. 571p.

CARDOSO, G. G. G; FRIZZONE, J. A.; REZENDE, R. Fator de atrito em tubos de polietileno de pequenos diâmetros. **Acta Scientiarum: Agronomy**, v.30, n.3, p.299-305, 2008.

CLARK, G. A.; HAMAN, D. Z.; PROCHASKA, J. F.; YITAYEW, M. General system design principles. In: LAMM, F. R; AYARS, J. E.; NAKAYAMA, F. S. **Microirrigation for crop production: Design, operation and management**. Amsterdam: Elsevier, 2006. p. 161-220.

COLEBROOK, C. F; WHITE, C. M. Experiments with fluid friction in roughened pipes. **Proceedings of the Royal Society A**, v.161, n.906, p.367-381, 1937. DOI: 10.1098/rspa.1937.0150.

DEVORE, J. L. **Probabilidade e Estatística para Engenharia e Ciências**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2006. 692p.

DIOGO, A. FREIRE; VILELA, FÁBIA A. Head losses and friction factors of steady turbulent flows in plastic pipes. **Urban Water Journal**, v.11, n.5, p.414-425, 2014.

FRIZZONE, J. A.; FREITAS, P. S. L.; REZENDE, R.; FARIA, M. A. **Microirrigação: gotejamento e microaspersão**. Maringá: Eduem, 2012. 356p.

FRIZZONE, J. A.; REZENDE, R.; CAMARGO, A. P.; COLOMBO, A. **Irrigação por aspersão**. Sistema pivô central. Maringá: Eduem, 2018. 353p.

FRIZZONE, J. A.; VIEIRA, A. T.; PAZ, V. P. S.; BOTREL, T. A. Caracterização hidráulica de um tubo gotejador. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.2, n.3, p.278-283, 1998.

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

HEZARJARIBI, A.; DEHGHANI, A. A.; MEFTAH HELGHI, M.; KIANI, A. Hydraulics Performances of Various Trickle Irrigation Emitters. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.7, n. 3, p.265-271, 2008.

JUANA, L., RODRIGUEZ-SINOBAS, L., LOSADA, A. Determining minor head losses in drip irrigation laterals. I: Methodology. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.128, n.6, 376-384, 2002. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2002)128:6(376).

KANDA, E. K.; MABHAUDHI, T.; SENZANJE, A. Hydraulic and clogging characteristics of Moistube irrigation as influenced by water quality. **Journal of Water Supply: Research and Technology - Aqua**, v. 67, n. 5, p. 438-446, 2018.

KÁRMÁN, T. von. **On laminar and turbulent friction**. National Advisory Committee for Aeronautics. Technical Memorandum No. 1092. Washington: NACA, 1946. 36p.

MELO, V. G. M.; CAMARGO, A. P. FRIZZONE, J. A. et al. Head loss in laser perforated thin-walled polyethylene pipes for irrigation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, n.5, p.317–323, 2019.

NIKURADSE, J. **Laws of flow in rough pipes**. National Advisory Committee for Aeronautics. Technical Memorandum No. 1292. Washington: NACA, 1950. 64p.

PALAU-SAVADOR, G.; SANCHIS, L. H.; GONZÁLEZ-ALTOZANO, P.; ARVIZA-VALVERDE, J. Real local losses estimation for on-line emitters using empirical and numerical procedures. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.132, n.6, p.522-530, 2006. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2006)132:6(522).

PERBONI, A; FRIZZONE, J.A; CAMARGO, AP; PINTO, M.F;. Modelling head loss along emitting pipes using dimensional analysis. **Engenharia Agrícola**, v.35, n.3, p.442–457, 2015.

PIMENTA, B. D.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; MEZZOMO, W.; KIRCHNER, J. H.; BEM, L. H. B. Performance of explicit approximations of the coefficient of head loss for pressurized conduits. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.22, n.5, p.301-3017, 2018. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v22n5p301-307.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. São Carlos: USP/EESC, 2006. 540 p.

PRADO, G. do. Decréscimo da energia de pressão devido a instalação de conexões e peças especiais nas tubulações. **Enciclopédia Biosfera**, v.11, n.21, p.2542–2555, 2015.

PRANDTL, L. **Fundamentals of Hydro-and Aeromechanics**. Translated by L. Rosenhead. New York: Dover Publications, Inc. 1934, 265p.

PROVENZANO, G.; ALAGNA, V.; AUTOVINO, D.; JUAREZ, J. M.; RALLO, G. Analysis of geometrical relationships and friction losses in small-diameter lay-flat polyethylene pipes. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.142, n.2, 2016: 04015041. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000958, 04015041. 2016.

PROVENZANO, G.; DI DIO, PIETRO; LEONE, R. Assessing a local losses evaluation procedure for low-pressure lay-flat drip laterals, **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.140, n.6, 2014: V. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000731.

PROVENZANO, G.; PUMO, D. Experimental analysis of local pressure losses for microirrigation laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.130, n.4, p.318–324, 2004. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2004)130:4(318).

REDDY, K.Y. Evaluation of on-line trickle irrigation emitter barb losses. **Journal of the Institution Engineers – AG**, v.84, n.1, p.42-47, 2003.

RETTORE NETO, O., BOTREL, T. A., FRIZZONE, J. A., CAMARGO, A. P. Method for determining friction head loss along elastic pipes. **Irrigation Science**, v.32, n.5, p.329–339, 2014.

RETTORE NETO, O.; FRIZZONE, A. J.; MIRANDA, J. H.; BOTREL, T. A. Perda de carga localizada em emissores não coaxiais integrados tubos de polietileno. **Engenharia Agrícola**, v. 29, n.1, p. 28–39, 2009.

ROCHA, H. S.; MARQUES, P. A. A.; CAMARGO, A. P.; FRIZZONE, J. A.; SARETTA, E. Internal surface roughness of plastic pipes for irrigation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, n.3, p.143-149, 2017. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v21n3p143-149v.21.

RODRÍGUEZ-SINOBAS, L.; JUNA, L.; LOSADA, A. Effects of temperature changes of emitter discharge. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.125, n.2, p.64-73, 1999.

SOUSA, J.S.C. DE; DANTAS NETO, J. Equação explícita para cálculo do fator de atrito de Darcy Weisbach em projetos de irrigação. **Irriga**, v.19, n.1, p.137-148, 2014.

TANAKA, M.; GIRARD, G.; DAVIS, R.; PEUTO, A.; BIGNELL, N. Recommended table for the density of water between 0 °C and 40 °C based on recent experimental reports. **Metrologia**, v.38, p.301-309, 2001.

THOMPSON E. J, G. P. MERKLEY, A. A. KELLER, S. L. BARFUSS. Experimental determination of the properties of low-pressure, lay-flat drip irrigation systems. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.137, n.1, p.37-48, 2011. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000269.

VILELA, L. A. A.; SOCCOL, O. J.; GERVÁZIO, E. S.; FRIZZONE, J. A.; BOTREL, T. A. Alteração no diâmetro e na perda de carga em tubos de polietileno submetidos a diferentes pressões. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.1, p.182-185, 2003.

YASMINA, L.; RACHID, L. Evaluation of energy losses in pipes. **American Journal of Mechanical Engineering**, v.3, p.32-37, 2015.

YILDIRIM, G. An assessment of hydraulic design of trickle laterals considering effect of minor losses. **Irrigation and Drainage**, v.56, n. 4, p.399-421, 2007. DOI: 10.1002/ird.303.