

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos



Dissertação de Mestrado

Perda de carga em linhas laterais de sistemas de irrigação por gotejamento

Gustavo Borges Lima

Pelotas, 2023

Gustavo Borges Lima

Perda de carga em linhas laterais de sistemas de irrigação por gotejamento

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos.

Orientador: Lessandro Coll Faria
Coorientador: José Henrique Nunes Flores

Pelotas, 2023

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

L732p Lima, Gustavo Borges

Perda de carga em linhas laterais de sistemas de irrigação por gotejamento / Gustavo Borges Lima ; Lessandro Coll Faria, orientador ; José Henrique Nunes Flores, coorientador. — Pelotas, 2023.

68 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2023.

1. Fator de atrito. 2. Emissores on-line. 3. Coeficiente de carga cinética. 4. Número de reynolds. I. Faria, Lessandro Coll, orient. II. Flores, José Henrique Nunes, coorient. III. Título.

CDD : 627

Gustavo Borges Lima

Perda de carga em linhas laterais de sistemas de irrigação por gotejamento

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 28 de fevereiro de 2023

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Lessandro Coll Faria (Orientador)

Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais

Prof. Dr. José Henrique Nunes Flores (Co-orientador)

Doutor em Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais

Prof. Dr. Luis Carlos Timm

Doutor em Agronomia pela Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” pela Universidade de São Paulo, São Paulo

Prof. Dr. Ezequiel Saretta

Doutor em Engenharia de Sistemas Agrícolas pela Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” pela Universidade de São Paulo, São Paulo

Para todos aqueles que acreditam em mim

DEDICO

Agradecimentos

Aos meus pais, Vanilda Peres Borges e Olmar Amaral Lima por terem me dado tudo que possuo, pela melhor educação do mundo e acreditar em mim em todos os momentos da vida.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Lessandro Coll Faria por confiar no meu trabalho e orientação durante esse período.

Ao meu Co-orientador Prof. Dr. José Henrique Nunes Flores pela contribuição e auxílio neste trabalho.

Aos Professores Dr. Luis Carlos Timm e Dr. Ezequiel Saretta, por terem o aceite o convite para participarem da banca, avaliação e contribuição e nas correções para a melhoria deste trabalho.

Aos amigos Reginaldo Bonczynski e Kamila Martins Pitana pelo auxílio nos ensaios de laboratório, manutenção dos equipamentos e pelas horas de trabalho que geraram uma amizade que levarei para sempre.

Ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Pelotas pela estrutura e auxílio para que este trabalho se concretizasse.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudo neste período.

*“Se enxerguei mais longe é porque
me apoiei em ombros de gigantes” Isaac Newton*

Resumo

LIMA, Gustavo Borges **Perda de carga em linhas laterais de sistemas de irrigação por gotejamento**. 2023. 68f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2023.

O objetivo geral do trabalho foi estudar a perda de carga distribuída (h_f) e localizada (h_l) em linhas laterais de irrigação, constituindo-se de dois objetivos específicos: (i) Identificar o melhor equacionamento para estimar o valor do fator de atrito de Darcy (f), oriundas de distintas abordagens, para tubos de polietileno de pequeno diâmetro utilizados em linhas laterais de sistemas de irrigação por gotejamento; e, (ii) Quantificar a influência da obstrução e do Número de Reynolds (Re) no coeficiente de carga cinética (k) em tubos de polietileno com emissores online. Para isto, foi utilizada uma bancada experimental desenvolvida para estudos de irrigação localizada para controle do sistema e obtenção das variáveis relevantes ao estudo (vazão, temperatura, perdas de carga total (h_t) e (h_f)). Os diâmetros (D) utilizados neste estudo foram 14,2192, 16,0026 e 18,6009 mm e um modelo de emissor on-line. Foram avaliadas equações para estimativa de f disponíveis na literatura, para os diversos regimes de escoamento. A partir h_f e h_t , foi determinada h_l ocasionada pela inserção dos emissores na tubulação. Foram estimados quatro valores de k através de distintas abordagens, considerando ou não a influência das forças viscosas, através de Re . Os tubos estudados neste trabalho apresentaram comportamento de tubos lisos. Todas as equações para estimativa de f utilizadas apresentaram coeficientes de correlação acima de 0.99. Os equacionamentos que apresentaram menores erros possuem maior grau de complexidade. A definição da equação para estimativa de f deve levar em consideração o grau de complexidade da própria equação. A h_l pode representar até 40% de h_t em uma linha lateral, a depender da velocidade de escoamento. Quanto maior D , menor a relação $h_l h_t^{-1}$. Para $Re < 4000$, k apresenta comportamento inverso a Re , ao passo que para $Re > 4000$, k apresenta relação positiva com Re . Os valores de k reduziram com o aumento de D . As distintas abordagens para determinação de k apresentam erros em função de Re . Valores de k apresentaram dependência de Re e da obstrução causada pelo emissor. Considerar Re na estimativa de k eleva a complexidade no equacionamento da h_l . O equacionamento de f e de k podem apresentar distintos graus de complexidade, sendo necessário que o projetista tenha em mente o que busca. Os equacionamentos de f e de k ainda podem ser ajustados para garantir um melhor e mais fácil de dimensionamento de linhas laterais de irrigação por gotejamento.

Palavras-chave: Fator de atrito. Emissores on-line. Coeficiente de carga cinética. Número de Reynolds.

Abstract

LIMA, Gustavo Borges. **Head loss in lateral lines of drip irrigation systems**. 2023. 68f. Dissertation (Master Degree em Recursos Hídricos) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2023.

The general objective of this work was to study the friction head loss (h_f) and local head loss (h_l) in irrigation lateral lines, consisting of two specific objectives: (i) Compare several explicit equations to estimate the value of the Darcy friction factor (f), arising from different approaches, for small diameter polyethylene pipes used in lateral lines of drip irrigation systems; and, (ii) Evaluate the influence of obstruction and Reynolds Number (Re) on Kinect head coefficient (k) in polyethylene pipes with online emitters. For this, an experimental bench developed for studies of localized irrigation was used to control the system and collect the variables relevant to the study (flow, temperature, total head losses (h_t) and (h_f)). The diameters (D) used in this study were 14.2192, 16.0026 and 18.6009 mm. Equations for estimating f available in the literature were evaluated for the different flow regimes. From h_f and h_t , h_l caused by the obstruction of emitters in the pipe was determined. Four values of k were estimated through different approaches, considering or not the influence of viscous forces, through Re . The pipes studied in this work presented the behavior of smooth pipes. All equations for estimating f used showed correlation coefficients above 0.99. The equations that presented smaller errors have a higher degree of complexity. The definition of the equation for estimating f must consider the degree of complexity of the equation itself. The h_l can represent up to 40% of the h_t in a lateral line, depending on the flow velocity. The higher D , the lower the h_l/h_t ratio. For $Re < 4000$, k has an inverse behavior to Re , whereas for $Re > 4000$, k has a positive relationship with Re . The values of k decreased with the increase of D . The different approaches for determination of k present errors as a function of Re . Values of k showed dependence on Re and the obstruction caused by the emitter. Considering Re in estimating k increases the complexity in equating h_l . Equating f and k can present different degrees of complexity, requiring the designer to keep in mind what he is looking for. The equations for f and k can still be adjusted to ensure better and easier sizing of drip irrigation lines.

Keywords: Friction factor. On-line emitters. Kinect head coefficient, Reynolds Number

Lista de Figuras

Figura 1 - Incremento Anual da irrigação no Brasil	16
Figura 2 – Modelo Croqui da bancada experimental para determinação de perda de carga.	34
Figura 3 - Relação entre vazão e perda de carga	37
Figura 4 - Ábaco de Moody com os dados ensaiados.....	39
Figura 5 - Fator de atrito de Darcy e diferença relativa entre valores estimados e observados.....	42
Figura 6 - Diagrama de Taylor para análise de eficiência das estimativas do fator de atrito dos modelos estudados.....	43
Figura 7 - Diferença de raiz quadrada média (RMS).....	44
Figura 8 – Dimensões dos tubos ensaiados e emissor.	49
Figura 9 - Perda de carga total no tubo emissor (h_t), perda de carga distribuída (h_f) e perda de carga localizada (h_l) em função da vazão (Q), nos três diâmetros ensaiados.	53
Figura 10 – Perda de carga unitária (h_{l_u}) em função da carga cinética ($v^2/2g$).....	54
Figura 11 – Coeficiente de carga cinética (k) e erro relativo em função do Número de Reynolds (Re)	55

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Modelo, capacidade e precisão dos equipamentos da bancada experimental.....	34
Tabela 2 - Dados exploratórios dos ensaios e repetições.....	36
Tabela 3 - Modelo, capacidade e precisão dos equipamentos da bancada experimental.....	48
Tabela 4 – Características geométricas dos tubos e emissores ensaiados.	49
Tabela 5 - Dados exploratórios dos ensaios e repetições.....	52
Tabela 6 – Valores de RMSE dos coeficientes de carga cinética calculados.....	57

Lista de Símbolos

h_t é a perda de carga total na tubulação

T é a temperatura em °C

h_f é a perda de carga contínua na tubulação

f é o fator de atrito de Darcy

L é o comprimento da tubulação

D é o diâmetro da tubulação

V é a velocidade de escoamento

g é a aceleração da gravidade

ε é a rugosidade absoluta

c coeficientes de ajuste

m coeficiente de ajuste

Q vazão de escoamento

C coeficiente de rugosidade

h_l é a perda de carga localizada na tubulação

k é o coeficiente de carga cinética

Re é o número de Reynolds

ν é a viscosidade cinemática do fluido

α Parâmetro intermediário da equação de Serghides (1984)

β Parâmetro intermediário da equação de Serghides (1984)

γ Parâmetro intermediário da equação de Serghides (1984)

d Parâmetro intermediário da equação de Serghides (1984)

s Parâmetro intermediário da equação de Goudar; Sonnad (2008)

q Parâmetro intermediário da equação de Goudar; Sonnad (2008)

g' Parâmetro intermediário da equação de Goudar; Sonnad (2008)

z Parâmetro intermediário da equação de Goudar; Sonnad (2008)

δ_{LA} Parâmetro intermediário da equação de Goudar; Sonnad (2008)

δ_{CFA} Parâmetro intermediário da equação de Goudar; Sonnad (2008)

x_1 Parâmetro intermediário da equação de Clamond (2009)

x_2 Parâmetro intermediário da equação de Clamond (2009)

Z_0 Parâmetro intermediário da equação de Clamond (2009)

k_0 Parâmetro intermediário da equação de Clamond (2009)

Z_1 Parâmetro intermediário da equação de Clamond (2009)
 k_1' Parâmetro intermediário da equação de Clamond (2009)
 Z_2 Parâmetro intermediário da equação de Clamond (2009)
 c_1' Parâmetro intermediário da equação de Mikata; Walczak (2016)
 x_1' Parâmetro intermediário da equação de Mikata; Walczak (2016)
 x_2' Parâmetro intermediário da equação de Mikata; Walczak (2016)
 a Parâmetro intermediário da equação de Biberg (2016)
 b Parâmetro intermediário da equação de Biberg (2016)
 c'' Parâmetro intermediário da equação de Biberg (2016)
 x'' Parâmetro intermediário da equação de Biberg (2016)
 z'' Parâmetro intermediário da equação de Biberg (2016)
 s Parâmetro intermediário da equação de Vatankhah (2018)
 λ_1 Parâmetro intermediário da equação de Vatankhah (2018)
 A' Parâmetro intermediário da equação de Brkic; Praks (2019 e 2020)
 B' Parâmetro intermediário da equação de Brkic; Praks (2019 e 2020)
 C''' Parâmetro intermediário da equação de Brkic; Praks (2019 e 2020)
 ξ Parâmetro intermediário da equação de Brkic; Praks (2019 e 2020)
 Y' Parâmetro intermediário da equação de Brkic; Praks (2019 e 2020)
 b' Parâmetro intermediário da equação de Lamri; Easa (2022)
 d' Parâmetro intermediário da equação de Lamri; Easa (2022)
 α' Parâmetro intermediário da equação de Lamri; Easa (2022)
 β' Parâmetro intermediário da equação de Lamri; Easa (2022)
 Y'' Parâmetro intermediário da equação de Lamri; Easa (2022)
 δ' Parâmetro intermediário da equação de Lamri; Easa (2022)
 θ Parâmetro intermediário da equação de Lamri; Easa (2022)
 f_{obs} é o fator de atrito de Darcy observado
 hl_u é a perda de carga localizada causada pelo emissor
 k_1 é o coeficiente de carga cinética calculado 1
 k_2 é o coeficiente de carga cinética calculado 2
 k_3 é o coeficiente de carga cinética calculado 3
 k_4 é o coeficiente de carga cinética calculado 4

SUMÁRIO

1. Introdução	13
1.1 Objetivos.....	15
1.1.1 Geral	15
1.1.2 Específicos	15
2. Revisão de literatura.....	16
2.1. Irrigação localizada	16
2.2. Distribuição de pressão e água em linhas laterais.....	17
2.3. Perda de carga em linhas laterais de gotejadores.....	18
2.3.1. Fator de atrito.....	18
3. Capítulo 1 - Estudo do fator de atrito para tubulações de polietileno de pequeno diâmetro	22
3.1. Introdução.....	22
3.2. Materiais e Métodos.....	33
3.3. Resultados e Discussão	36
3.4. Conclusão.....	45
4. Capítulo 2 – Coeficiente de carga cinética de emissores online para irrigação por gotejamento.....	46
4.1. Introdução.....	46
4.2. Materiais e Métodos.....	47
4.3. Resultados e discussão	51
4.4. Conclusões	57
5. Considerações finais	58
6. Referências	59

1. Introdução

A irrigação baseia-se numa prática agrícola que utiliza um conjunto de equipamentos e técnicas para suprir a deficiência de água para culturas agrícolas no momento certo e em quantidades adequadas. Para que isso ocorra da melhor forma, existem diversos métodos disponíveis, cada qual com suas vantagens e desvantagens.

Dentre tais métodos, que podem ser por superfície, aspersão e localizada, pode-se destacar a irrigação localizada, por ser um método que converge com a ideia de conservação de recursos hídricos, onde a aplicação de água é realizada com baixos volumes e diretamente na zona radicular da planta. Neste método é possível alcançar os mais altos níveis de eficiência de aplicação, considerando que o sistema de irrigação seja projetado e manejado corretamente.

Um obstáculo dos engenheiros de irrigação é elaborar um projeto que além de possuir alta precisão, represente a melhor solução para o sistema de irrigação. Considerando que um projeto de irrigação consiste em um investimento inicial, faz-se necessário investigar condições como: velocidade de escoamento que consuma menor energia de bombeamento, pressão hidráulica necessária, melhor locação das linhas de irrigação na área irrigada, projeto econômico, quantidade adequada de água e pressão hidráulica necessária.

O correto dimensionamento hidráulico de sistemas de irrigação é de suma importância para obter valores elevados de eficiência e uniformidade de irrigação. Um dos principais elementos em um dimensionamento hidráulico baseia-se na estimativa de perda de carga total do sistema, dividida em perda de carga contínua e perda de carga localizada. A perda de carga, por sua vez, é definida pela perda de energia pela turbulência da água na tubulação (contínua) e pela inserção de peças especiais ao longo do sistema (localizada).

A perda de carga é o parâmetro fundamental para dimensionamento de sistemas de irrigação. Sua determinação correta tem direta relação com os custos de material e com consumo de energia. A perda de carga localizada, causada pelo conector do emissor ou pelo próprio emissor no interior da tubulação, depende diretamente da área em que o conector ou o emissor ocupa internamente na tubulação

e de sua forma geométrica. As vezes ignorada por alguns projetistas, a perda de carga localizada pode ser representativa em sistemas de irrigação por gotejamento.

Diante um cenário de muitas variáveis e possibilidades de falhas que é o dimensionamento de linhas laterais de irrigação, se faz necessário analisar hidráulicamente um sistema de irrigação por gotejamento, que por sua vez possui detalhes que interferem diretamente na operação ideal do sistema.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Estudar a perda de carga distribuída e a perda de carga localizada em linhas laterais de irrigação com tubos de polietileno utilizados para irrigação localizada e emissores on-line.

1.1.2 Específicos

(i) Identificar o melhor equacionamento para estimar o valor do fator de atrito de Darcy (f), oriundas de distintas abordagens, para tubos de polietileno de pequeno diâmetro utilizados em linhas laterais de sistemas de irrigação por gotejamento (Capítulo 1);

(ii) Quantificar a influência da obstrução e do Número de Reynolds (Re) no coeficiente de carga cinética (k) em tubos de polietileno com emissores on-line (Capítulo 2).

2. Revisão de literatura

2.1. Irrigação localizada

A irrigação corresponde à prática agrícola que utiliza um conjunto de equipamentos e técnicas para suprir a deficiência total ou parcial de água para as plantas. A irrigação está no nosso cotidiano, seja nos gramados de campos de futebol e de condomínios residenciais; ou quando consumimos arroz, feijão, legumes, frutas (ANA, 2021). Conforme pode ser observado na Figura 1, há um incremento no crescimento da área irrigada nos últimos anos.

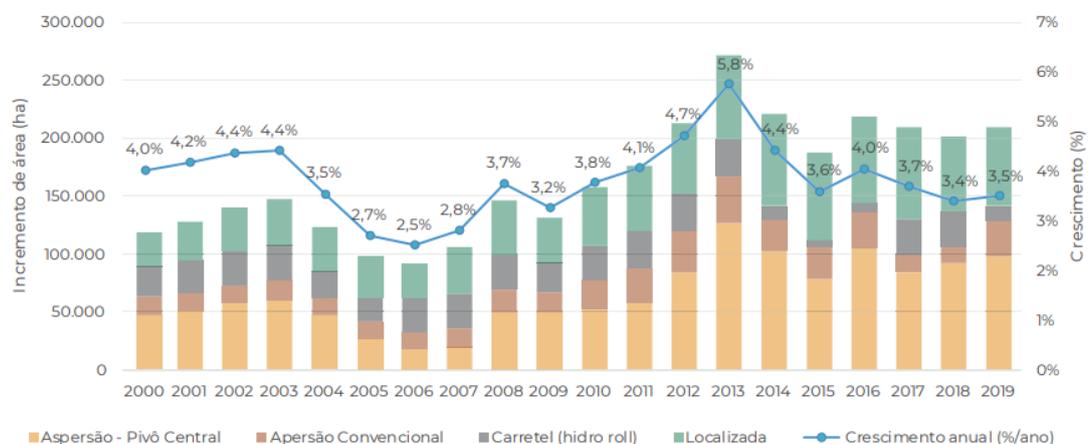


Figura 1 - Incremento Anual da irrigação no Brasil

A irrigação localizada vem crescendo na agricultura irrigada (Figura 1), isso pode ser atribuído ao fato de trazer economia de água devido aos valores de eficiência de irrigação, que podem ser elevados quando o sistema é bem manejado, aplicando a água diretamente na zona radicular da planta, possibilitando a automação e a fertirrigação. Os principais sistemas de irrigação localizada são o de microaspersão e gotejamento (CARRIJO *et al.*, 2004, FRIZZONE *et al.*, 2012, RAVINA *et al.*, 1992, SOUZA *et al.*, 2011). O sistema de irrigação por gotejamento pode alcançar valores de eficiência de uniformidade de aplicação de água da ordem de 85 a 95% (MANTOVANI *et al.*, 2009).

Um sistema de irrigação por gotejamento é um sistema de tubulação pressurizada que consiste em uma linha principal, linhas secundárias e linhas laterais. A variação de pressão nas laterais afetará diretamente a vazão do emissor no sistema de irrigação por gotejamento (WU, 1992).

A irrigação por gotejamento é um sistema de aplicação de uma quantidade uniforme e precisa de água às plantas em intervalos frequentes, no intuito de atender

o consumo de água necessário de plantas agrícolas e minimizar qualquer estresse hídrico. Linha principal, linhas laterais e emissores constituem a subunidade do sistema básico (ZERIJUN *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2020),

A irrigação por gotejamento oferece vantagens agronômicas e econômicas únicas para o uso eficiente da água. As principais desvantagens dos sistemas de irrigação por gotejamento são a sensibilidade ao entupimento e a acumulação de salinidade (KELLER; KARMELI, 1974).

2.2. Distribuição de pressão e água em linhas laterais

De acordo com Wu; Gitlin (1974), a distribuição de pressão ao longo de uma linha de irrigação por gotejamento, na linha principal e lateral, é controlada pela queda de energia através do atrito e o ganho ou perda de energia devido a ao aclave e declive das linhas.

Karmelli (1977) define que a forma de dissipação de pressão pode ser usada para categorizar os emissores em de longo percurso, de bicos ou orifícios e de vazamento de tubo lateral. Em emissores de longo percurso, a pressão é dissipada durante o escoamento através de um caminho longo e estreito. Outros meios são usados para aumentar a perda de pressão, como a rugosidade do caminho do escoamento e o uso de caminhos longos e tortuosos para produzir maior turbulência. Em emissores de bicos ou orifícios, a pressão é dissipada à medida que a água descarrega através de um pequeno bocal.

A vazão dos emissores pode ser caracterizada pela Equação 1 (KARMELLI, 1977; WARRICK; YITAYEW, 1988).

$$q = K \cdot H^x \quad (1)$$

sendo:

q é a descarga do emissor, $m^3 s^{-1}$;

K é a constante de proporcionalidade que caracteriza o emissor, adimensional;

H é pressão de trabalho no emissor, m;

x é o expoente da descarga do emissor que é caracterizado pelo regime de vazão, m.

Vários fatores estão associados a uniformidade de distribuição de água nos sistemas de irrigação localizada: pressão de operação, velocidade, entupimento de emissores, entre outros. Ressalta-se que uniformidade de aplicação de água em áreas irrigadas influencia diretamente o manejo, a eficiência e o custo da irrigação, assim como afeta a qualidade e produtividade da cultura (AZEVEDO; SAAD, 2012; COELHO, 2007).

A uniformidade de aplicação de água em sistemas de irrigação por gotejamento pode ser expressa por diversas formas, sendo o Coeficiente de uniformidade (CUC) de Christiansen (1942) ou a metodologia proposta por (KELLER; KARMELI 1975) as duas principais.

Diversos autores examinaram o comportamento hidráulico de linhas laterais (ABDRABOU *et al.*, 2022; BARROS *et al.*, 2018; FLORES *et al.*, 2021; KANG *et al.* 1996; LUQUE-ESCAMILLA 2001; MARTINEZ *et al.*, 2022; SHARU, RAZAK, 2020; VALIANTZAS, 2003; VALLESQUINO; WU 1992; ZAYANI *et al.*, 2001).

2.3. Perda de carga em linhas laterais de gotejadores

2.3.1. Fator de atrito

O fluxo de água em tubulações está sujeito a resistência hidráulica ao movimento e dissipação da energia (AZEVEDO NETTO; FERNANDEZ 2015). Conforme Bagarello *et al.* (1995), as perdas contínuas e localizadas eram fatores estudados separadamente. Com o passar do tempo, percebeu-se que estes fatores são indissociáveis e possuem um grau de complexidade. Para tubulações de secção transversal circular, transportando fluidos reais em escoamentos permanente, a dissipação da energia é representada pela perda de carga, podendo ser estimada por meio de diversas equações encontradas na literatura (AZEVEDO NETTO; FERNANDEZ, 2015; PORTO, 2006).

O correto dimensionamento e manejo dos sistemas de irrigação são imprescindíveis para atingir níveis adequados de eficiência de uso da água (HEERMANN *et al.*, 1992), que são primordiais para o enfrentamento do aumento da demanda dos recursos hídricos. Nesse sentido, o correto dimensionamento de sistemas de irrigação localizada requer o conhecimento das características hidráulicas dos tubos gotejadores (WU, 1992).

Cardoso (2008) ressalta que para obter sucesso no dimensionamento hidráulico, um dos pontos cruciais é que a contabilidade das perdas totais seja precisa, objetivando caracterizar o conjunto motobomba ideal para o sistema de irrigação.

A perda de carga em linhas laterais é uma consideração importante para o projeto correto de sistemas de irrigação pressurizados (YITAYEW, 1989). Em tubulações a dissipação de energia pode ser calculada pela perda de carga, sua estimativa é realizada através de diversas equações encontradas na literatura (PORTO, 2006). A perda de carga pode ser dividida em distribuída e localizada (AZEVEDO NETTO; FERNANDEZ, 2015). Conforme Rettore Neto *et al.* (2009b), a soma dessas duas parcelas é considerada a perda de carga total.

A equação Universal de Darcy-Weisbach (DARCY, 1857; WEISBACH, 1849), (Equação 2), por apresentar bases teóricas, pode ser considerada como a mais adequada para a estimativa da perda de carga contínua, mesmo apresentando dificuldades em sua resolução (BAGARELLO *et al.*, 1995; BERNUTH, 1990).

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

sendo:

hf é a perda de carga contínua na tubulação, m;

f é o fator de atrito de Darcy;

L é o comprimento da tubulação, m;

D é o diâmetro da tubulação, m;

V é a velocidade de escoamento, m s⁻¹; e

g é a aceleração da gravidade, m s⁻².

Para a estimativa do fator de atrito f, em escoamentos turbulentos, Re > 4000, a utilização da (Equação 3), de Colebrook-White, é a mais recomendada (RETTORE NETTO *et al.*, 2009b).

$$f = \left(-2 \cdot \log \left(\frac{e}{3.7 \cdot D} + \frac{2.51}{Re \cdot f^{0.5}} \right) \right)^{-2} \quad (3)$$

sendo:

f é o fator de atrito, adimensional;

ε é a rugosidade absoluta, m;

D é o diâmetro da tubulação, m;

Re é o número de Reynolds, adimensional.

Bernuth e Wilson (1989), afirmam que a equação de Colebrook-White não possui boa confiança para o cálculo do fator de atrito f em tubulações de diâmetros menores que 50 mm. A equação proposta por Blasius (1913), (Equação 4), mostrou-se satisfatória para tubulações lisas e de diâmetros pequenos (utilizadas na irrigação localizada).

$$f = c \cdot Re^m \quad (4)$$

sendo:

f é o fator de atrito, adimensional;

Re é o número de Reynolds, adimensional; e

c e m são coeficientes de ajustes, adimensional.

Os valores descritos originalmente por Blasius são $c = 0,316$ e $m = 0,25$ (BERNUTH; WILSON, 1989). Os mesmos autores ainda citam outros resultados de estudos com tubulações de polietileno de diferentes diâmetros, apresentando valores de c entre 0,281 a 0,345. Para um coeficiente m de 0,25 e em comparação a equação de Colebrook-White, a equação de Blasius não possui boa acurácia para tubulações de diminutos tamanhos, sendo os valores originais são mais indicados.

A equação de Hazen-Willians (Equação 5), empiricamente estima a perda de carga continua em determinadas tubulações, considerando a rugosidade como fixa em diferentes diâmetros para um mesmo material, e desconsiderando o regime de escoamento (LIOU, 1998). Conforme Azevedo Netto *et al.* (1998), os seus limites de aplicação são os mais amplos: diâmetros de 50 a 3500 mm e velocidades de até 3 m s⁻¹.

$$hf = 10,643 \cdot \frac{L}{D^{4,871}} \cdot \left(\frac{Q}{C} \right)^{1,852} \quad (5)$$

sendo:

h_f é a perda de carga contínua na tubulação, m;

L é o comprimento da tubulação, m;

D é o diâmetro da tubulação, m;

Q é a vazão de escoamento, $m^3 s^{-1}$;

C é o coeficiente de rugosidade, adimensional.

A perda de carga localizada causada por emissores pode ser estimada por meio da equação geral da perda de carga localizada, que apresenta uma parcela “ k ” da carga cinética de Bernoulli, conhecido como princípio da similaridade de Reynolds, e é representada pela Equação 6 (AZEVEDO NETTO; FERNANDEZ, 2015; RETTORE NETO *et al.*, 2009a).

$$h_l = k \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (6)$$

sendo:

h_l é a perda de carga localizada na tubulação, m;

k é o coeficiente de carga cinética, adimensional;

V é a velocidade de escoamento, $m s^{-1}$;

g é a aceleração da gravidade, $m s^{-2}$.

Em ensaios experimentais, Al-Amound (1995), identificou que a perda de carga localizada pode assumir valores na ordem de 15% a 33% da perda de carga total de linhas laterais com diâmetros de 13 mm, e de 5% a 15% em diâmetros de 25 mm. Laperuta Neto *et al.* (2011), em estudos com um tubo emissor? de diâmetro interno de 14,45 mm, com emissores tipo pastilha, obtiveram perdas de carga localizada causadas pelo emissor na ordem de 23% da perda de carga total. Flores *et al.* (2017) cita que alguns projetistas desprezam as perdas de carga localizada pelos gotejadores, ou na maioria das vezes, a consideram como 5% da perda de carga contínua da linha principal.

3. Capítulo 1 - Estudo do fator de atrito para tubulações de polietileno de pequeno diâmetro

3.1. Introdução

O principal elemento dentro de um sistema de irrigação por gotejamento são os emissores. Através dos emissores há uma dissipação de pressão ao longo do labirinto onde a água passa. A qualidade da água é um fator crucial em sistemas de irrigação por gotejamento, pois a precipitação de sais dentro do emissor pode ocasionar obstrução física e uma diminuição de pressão no ponto, afetando a uniformidade de irrigação e entupimento dos emissores (FARIA; 2000; MANTOVANI, 2009; ZHOU *et al.*, 2017).

Wu (1974) define que a distribuição de pressão ao longo de uma linha de irrigação por gotejamento, na linha principal e lateral, é controlada pela queda de energia através do atrito e o ganho ou perda de energia devido a aclive ou declive. Estimar a perda de carga em condutos pressurizados é uma problemática recorrente em estudos na área de hidráulica (BARDESTANI *et al.*, 2017). A equação universal de Darcy-Weisbach, Equação 7, por apresentar bases teóricas, pode ser considerada como a mais adequada para a estimativa da perda de carga continua mesmo apresentando dificuldades em sua resolução (BAGARELLO *et al.*, 1995).

$$hf = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (7)$$

sendo:

hf é a perda de carga continua na tubulação, m;

f é o fator de atrito de Darcy, adimensional;

L é o comprimento da tubulação, m;

D é o diâmetro da tubulação, m;

V é a velocidade de escoamento, m s⁻¹; e,

g é a aceleração da gravidade, m s⁻² (g = 9,8 m s⁻²)

A estimativa do fator de atrito de Darcy (f), por exemplo, é tópico de estudo de diversos autores ao longo do tempo (PIMENTA *et al.*, 2018; SHAIKH *et al.*, 2019; VATANKHAH, 2018; ZEYU *et al.*, 2020). A determinação de f é essencial e complexa,

pois depende da rugosidade do tubo e do número de Reynolds (Equação 8) (ROMEO *et al.*, 2002; SONNAD, GOUDAR, 2006).

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (8)$$

sendo:

Re é o número de Reynolds, adimensional;

V é a velocidade de escoamento, m s⁻¹;

D é o diâmetro da tubulação, m;

ν é a viscosidade cinemática do fluido, m² s⁻¹.

A equação de Colebrook; White (COLEBROOK, 1939), equação 9, têm sido a equação mais utilizada para calcular f, sendo uma combinação empírica de duas bases teóricas, a equação de Von Karman para escoamento em tubos rugosos e a equação de Prandtl para escoamento turbulento em tubos lisos (COLEBROOK, 1939; COLEBROOK; WHITE, 1937).. Diversos autores têm apresentados trabalhos com equacionamentos a fim de explicitar f na equação de Colebrook; White, buscando reduzir a complexidade desta, além de reduzir o tempo computacional necessário para resolvê-la (PRAKS; BRKIC, 2020).

$$f = \left(-2 \cdot \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7 \cdot D} + \frac{2.51}{Re \cdot f^{0.5}} \right) \right)^{-2} \quad (9)$$

sendo:

f é o fator de atrito de Darcy, adimensional;

ε é a rugosidade absoluta da tubulação, m;

D é o diâmetro da tubulação, m; e,

Re é o número de Reynolds, adimensional.

Dentre as aproximações presentes na literatura, podem ser elencadas as aproximações de Serghides (1984), Goudar; Sonnad (2008), Clamond (2009), Mikata; Walczak (2016), Biberg (2016), Vatankhah (2018), Brkic; Praks (2019), Pracks; Brkic

(2020) e Lamri; Easa (2022). Serghides (1984) apresenta uma aproximação matemática para a equação de Colebrook; White (Equação 10).

$$f = \left(\alpha - \frac{(\beta - \alpha)^2}{\gamma - 2 \cdot \beta + \alpha} \right)^{-2} \quad (10)$$

Onde:

$$\alpha = -2 \cdot \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D} + \frac{12}{Re} \right)$$

$$\beta = -2 \cdot \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D} + \frac{2,51 \cdot \alpha}{Re} \right)$$

$$\gamma = -2 \cdot \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D} + \frac{2,51 \cdot \beta}{Re} \right)$$

sendo:

f é o fator de atrito de Darcy, adimensional;

ε é a rugosidade absoluta da tubulação, m;

D é o diâmetro da tubulação, m; e,

Re é o número de Reynolds, adimensional.

Goudar; Sonnad (2008) desenvolveram uma aproximação extremamente precisa, baseada em uma reformulação eficiente da equação de Colebrook; White e uma expansão de fração contínua (Equação 11). Ressalta-se ainda, que estes autores apresentam três formulações distintas, sendo que neste trabalho foi utilizada a formulação com maior precisão.

$$f = \left(\frac{2}{\ln(10)} \cdot \left(\ln \left(\frac{d}{q} \right) + \delta_{CFA} \right) \right)^{-2} \quad (11)$$

Onde:

$$d = \left(\frac{\ln(10)}{5,02} \right) \cdot Re$$

$$s = \frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D} \cdot d + \ln(d)$$

$$q = s \left(\frac{s}{s+1} \right)$$

$$g' = \frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D} \cdot d + \ln\left(\frac{d}{q}\right)$$

$$z = \ln\left(\frac{q}{g}\right)$$

$$\delta_{LA} = \left(\frac{g}{g+1}\right) \cdot z$$

$$\delta_{CFA} = \delta_{LA} \cdot \left(1 + \frac{\frac{z}{2}}{(g+1)^2 + \left(\frac{z}{3}\right) \cdot (2 \cdot g' - 1)}\right)$$

sendo:

f é o fator de atrito de Darcy, adimensional;

ε é a rugosidade absoluta da tubulação, m;

D é o diâmetro da tubulação, m; e,

Re é o número de Reynolds, adimensional.

Clamond (2009) desenvolveu um esquema iterativo altamente eficiente para a função ômega de Wright na solução de Keady, que resolve a equação Colebrook; White com duas etapas de iteração. Para efeitos deste trabalho, o modelo de Clamond (2009) já está apresentado em forma de equações, sem a necessidade de cálculo iterativo (Equação 12).

$$f = \left(\frac{\ln(10)}{2 \cdot z_2}\right)^{-2} \quad (12)$$

Onde:

$$x_1 = \frac{\ln(10) \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D}\right) \cdot Re}{18,574}$$

$$x_2 = \ln\left(\frac{\ln(10) \cdot Re}{5,02}\right)$$

$$z_0 = x_2 - \left(\frac{1}{5}\right)$$

$$k_0 = \frac{z_0 + \ln(x_1 + z_0) - x_2}{1 + x_1 + z_0}$$

$$z_1 = z_0 - \left(\frac{\left(1 + x_1 + z_0 + \left(\left(\frac{1}{2}\right) \cdot k_0\right)\right) \cdot k_0 \cdot (x_1 + z_0)}{1 + x_1 + z_0 + \left(\left(\frac{1}{3}\right) \cdot (k_0^2)\right)}\right)$$

$$k_{1'} = \frac{z_1 + \ln(x_1 + z_1) - x_2}{1 + x_1 + z_1}$$

$$z_2 = z_1 - \left(\frac{\left(\left(1 + x_1 + z_1 + \left(\frac{1}{2} \right) \cdot k_1 \right) \right) \cdot k_1 \cdot (x_1 + z_1)}{1 + x_1 + z_1 + \left(\frac{1}{3} \right) \cdot (k_1^2)} \right)$$

sendo:

f é o fator de atrito de Darcy, adimensional;

ε é a rugosidade absoluta da tubulação, m;

D é o diâmetro da tubulação, m; e,

Re é o número de Reynolds, adimensional.

Mikata; Walczak (2016) propuseram uma aproximação através da Função Wright Ômega. A equação 13 apresenta a enésima fórmula truncada na terceira aproximação.

$$f = \left(c_1 \cdot \left(x_2' - \ln \left(x_1' - \ln \left(x_1' - \ln \left(x_1 - \ln(x_1') \right) \right) \right) \right) \right)^{-2} \quad (13)$$

Onde:

$$c_1' = \frac{2}{\ln(10)}$$

$$x_1' = \ln \left(\frac{\ln(10)}{2} \cdot \frac{Re}{2,51} \right) + \frac{\ln(10)}{2} \cdot \frac{Re}{2,51} \cdot \frac{\varepsilon}{3,71 \cdot D}$$

$$x_2' = \ln \left(\frac{\ln(10)}{2} \cdot \frac{Re}{2,51} \right)$$

sendo:

f é o fator de atrito de Darcy, adimensional;

ε é a rugosidade absoluta da tubulação, m;

D é o diâmetro da tubulação, m; e,

Re é o número de Reynolds, adimensional.

Já Biberg (2016) propôs uma aproximação através da Função W de Lambert aplicando a solução de Keady (Equação 14).

$$f = \left(a \cdot \left(\left(\ln \left(\frac{Re}{a \cdot b} \right) \right) + G \right) \right)^{-2} \quad (14)$$

Onde:

$$a = \frac{2}{\ln(10)}$$

$$b = 2,51$$

$$c = 3,7$$

$$x'' = \ln \left(\frac{Re}{a \cdot b} \right) + \frac{Re}{a \cdot b \cdot c} \cdot \frac{\varepsilon}{D}$$

$$z'' = \frac{1}{x}$$

$$G = \ln(x) \cdot \left(z'' \cdot (1 + z'' \cdot (z'' - 1)) - 1 + \left(\frac{z''^2}{6} \right) \cdot \ln(x) \cdot (3 + z'' \cdot (2 \cdot \ln(x) - 9)) \right)$$

sendo:

f é o fator de atrito de Darcy, adimensional;

ε é a rugosidade absoluta da tubulação, m;

D é o diâmetro da tubulação, m; e,

Re é o número de Reynolds, adimensional.

Vatankhah (2018) propôs a resolução matemática para explicitar f na equação de Colebrook; White, através da aproximação da função $\ln(x-1)$. Em sua proposta, o autor utilizou uma aproximação assintótica simples, que apresentou erros maiores, porém, é indicada devido a sua simplicidade (Equação 15). Ao passo que, para aumentar a precisão, o mesmo autor indica que pode ser utilizada um equacionamento baseado na primeira aproximação da fração contínua, porém, com isso, aumenta-se o esforço de cálculo (Equação 16).

$$f = \left(0,8686 \cdot \ln \left(\frac{0,3984 \cdot Re}{(0,8686 \cdot s)^{\frac{s-0,645}{s+0,39}}} \right) \right)^{-2} \quad (15)$$

$$f = \left(0,8686 \cdot \ln \left(\frac{0,3984 \cdot \text{Re}}{(0,8686 \cdot s)^{\frac{s}{s+\lambda_1}}} \right) \right)^{-2} \quad (16)$$

Onde:

$$s = 0,12363 \cdot \text{Re} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D} \right) + \ln(0,3984 \cdot \text{Re})$$

$$\lambda_1 = 1 + \frac{1}{\left(\frac{1+s}{0,5 \cdot \ln(0,8686 \cdot s)} \right) - \frac{1+4 \cdot s}{3 \cdot (1+s)}}$$

sendo:

f é o fator de atrito de Darcy, adimensional;

ε é a rugosidade absoluta da tubulação, m;

D é o diâmetro da tubulação, m; e,

Re é o número de Reynolds, adimensional.

Brkic; Praks (2019) propuseram uma aproximação baseada na função W de Wright (Equação 17)

$$f = \left(0,8686 \cdot \left(B' - C''' + \frac{1,0119 \cdot C'''}{B' + A'} + \frac{C''' - 2,3849}{(B' + A')^2} \right) \right)^{-2} \quad (17)$$

Onde:

$$A' = \frac{\text{Re}}{8,0878} \cdot \frac{\varepsilon}{D}$$

$$B' = \ln(\text{Re}) - 0,7794$$

$$C''' = \ln(B + A)$$

sendo:

f é o fator de atrito de Darcy, adimensional;

ε é a rugosidade absoluta da tubulação, m;

D é o diâmetro da tubulação, m; e,

Re é o número de Reynolds, adimensional.

Praks; Brkic (2020) propuseram aproximações baseadas na regressão simbólica e da função W de Lambert deslocada. Estes autores propõe uma série de equações, considerando diferentes metodologias para obtenção. A equação 18, foi obtida através de análise simbólica com parâmetros ajustados apresenta o menor

tempo de resolução, e seu erro só é superior a equação 19, que apresenta uma função de correção.

$$f = \left(0,8685972 \cdot \left(B - C + \frac{C}{(B + A) - 0,5588 \cdot C + 1,2079} \right) \right)^{-2} \quad (18)$$

Onde:

$$A' = \frac{Re}{8,0897} \cdot \frac{\varepsilon}{D}$$

$$B' = \ln(Re) - 0,779626$$

$$C''' = \ln(B' + A')$$

sendo:

f é o fator de atrito de Darcy, adimensional;

ε é a rugosidade absoluta da tubulação, m;

D é o diâmetro da tubulação, m; e,

Re é o número de Reynolds, adimensional.

$$f = (0,868589 \cdot (B + Y - \xi))^{-2} \quad (19)$$

Onde:

$$A' = \frac{Re}{8,088387} \cdot \frac{\varepsilon}{D}$$

$$B' = \ln(Re) - 0,7793975$$

$$x''' = A + B$$

$$C''' = \ln(x)$$

$$Y' = -C''' + \frac{C'''}{x''' - 0,5564 \cdot C''' + 1,207}$$

$$\xi = \frac{x''' \cdot Y'^2 + 3,0636 \cdot x''' \cdot Y' + 18,58}{19,5 \cdot (Y'^2 \cdot x'''+2 + x'''+3) + 169,9 \cdot Y'^2 + 1260 \cdot x''' + 18178}$$

sendo:

f é o fator de atrito de Darcy, adimensional;

ε é a rugosidade absoluta da tubulação, m;

D é o diâmetro da tubulação, m; e,

Re é o número de Reynolds, adimensional.

Lamri; Easa (2022) propuseram uma aproximação através do teorema de Lagrange, sendo que os melhores resultados foram obtidos com o equacionamento com quatro termos (Equação 20).

$$f = (b + 2 \cdot \log(d) \cdot (-1 + \alpha \cdot \beta + \gamma \cdot \delta \cdot \theta))^{-2} \quad (20)$$

Onde:

$$b' = 2 \cdot \log\left(\frac{Re}{2,51}\right)$$

$$d' = \frac{e}{D} \cdot \frac{Re}{9,287} + b$$

$$\alpha' = \frac{0,8682}{d}$$

$$\beta' = 1 + \frac{1}{d} \cdot \log\left(\frac{d}{\exp^2}\right)$$

$$\gamma' = \frac{0,161}{d^3}$$

$$\delta' = 1 + \frac{4 \cdot \ln(d)}{33^{0,5} - 9}$$

$$\theta = 4 + \frac{(33^{0,5} - 9) \cdot \ln(d)}{3}$$

sendo:

f é o fator de atrito de Darcy, adimensional;

ε é a rugosidade absoluta da tubulação, m;

D é o diâmetro da tubulação, m; e,

Re é o número de Reynolds, adimensional.

Além da equação Colebrook; White e suas aproximações, outra opção amplamente utilizada é o modelo potencial desenvolvido por Blasius (BLASIUS, 1913), demonstrada na equação 21. Esta equação é considerada eficaz para o cálculo de f , por possuir um bom grau de exatidão para pequenos diâmetros e valores de Reynolds entre 4000 e 100000 (BERNUTH, 1990; FLORES *et al.*, 2017). Diversos autores apresentam sua usabilidade para o dimensionamento de sistemas de irrigação, especialmente quando se fala de tubulações de polietileno (RETTORE NETO *et al.*, 2009; JARDIM *et al.*, 2021).

$$f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (21)$$

sendo:

f é o fator de atrito de Darcy, adimensional; e,

Re é o número de Reynolds, adimensional.

Jardim *et al.* (2021) propuseram uma correção para a equação de Blasius (1913), inserindo o diâmetro no equacionamento, reduzindo o erro do modelo (Equação 22).

$$f = 0,1034 \cdot D^{-0,256} \cdot Re^{-0,1593} \cdot D^{-0,105} \quad (22)$$

sendo:

f é o fator de atrito de Darcy, adimensional;

D é o diâmetro da tubulação, m; e,

Re é o número de Reynolds, adimensional.

Os equacionamentos supracitados apesar de apresentarem alta confiabilidade, possuem uma limitação quanto aos valores de Re, sendo indicadas apenas para valores de $Re > 4000$. Neste sentido, outros autores buscaram desenvolver modelos capazes de prever f para todo o intervalo de Re. Morrison (2013) desenvolveu uma equação para todos os regimes de escoamento, apresentando dependência apenas de Re (Equação 23).

$$f = 4 \cdot \left(\left(\frac{0,0076 \cdot \left(\frac{3170}{Re} \right)^{0,165}}{1 + \left(\frac{3170}{Re} \right)^7} \right) + \frac{16}{Re} \right) \quad (23)$$

sendo:

f é o fator de atrito de Darcy, adimensional;

Re é o número de Reynolds, adimensional.

Já Avci; Karagoz (2019), também desenvolveram um equacionamento para todos os regimes de escoamento, porém, inserindo a dependência do diâmetro e rugosidade absoluta da tubulação (Equação 24). Para isto, os autores utilizaram o conceito de f de turbulência (f_t) (Avci; Karagoz, 2009).

$$f = f_t + \left(\frac{64}{Re} - f_t \right) \cdot \exp\left(-\left(\frac{C_m \cdot Re}{2560}\right)^8\right) \quad (24)$$

Onde:

$$C_m = 1 + \frac{\varepsilon}{D} + \frac{\frac{\varepsilon}{D} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D}\right)^{0.5}}{1 + 225 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D}\right)^3} + 500 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D}\right)^4$$

$$f_t = \frac{6,4}{\left(\ln(Re) - \ln\left(1 + 0,01 \cdot Re \cdot \frac{\varepsilon}{D} \cdot \left(1 + 10 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D}\right)^{0,5}\right)\right)\right)^{2,4}}$$

sendo:

f é o fator de atrito de Darcy, adimensional;

ε é a rugosidade absoluta da tubulação, m;

D é o diâmetro da tubulação, m; e,

Re é o número de Reynolds, adimensional.

O desenvolvimento das equações de Blasius (1913) e Colebrook; White (1939) se deu através de dados experimentais, no qual, Blasius (1913) testou tubos lisos e Colebrook; White (1939) tubos rugosos. Todavia, Serghides (1984), Goudar; Sonnad (2008), Clamond (2009), Mikata; Walckzak (2016), Biberg (2016), Vatankhah (2018) e Praks; Brkic (2020) Lamri; Easa (2022), para o desenvolvimento de seus trabalhos, utilizaram dados simulados baseados em Colebrook; White, ao passo que, Morrison (2013) utilizou dados simulados para avaliar tubos lisos. Jardim *et al.* (2021) utilizaram dados experimentais e simulados, sendo uma transformação da equação de Blasius, considerando o diâmetro da tubulação. Avci; Karagoz (2019), utilizaram dados experimentais e simulados para tubos lisos e rugosos, sendo a fonte de dados dos tubos lisos de Oregon e Princeton e rugosos de McKean.

Diante do exposto, percebe-se uma carência de estudos com dados experimentais, neste sentido, foram comparadas equações para estimar o valor do fator de atrito de Darcy (f), oriundas de distintas abordagens, para tubos de polietileno

de pequeno diâmetro utilizados em linhas laterais de sistemas de irrigação por gotejamento.

3.2. Materiais e Métodos

Para a realização deste trabalho, foram realizados ensaios para determinação do fator de atrito de Darcy (f), comparando os dados mensurados com os estimados pelas equações encontradas na literatura. Foram estudadas tubulações de polietileno, de média densidade, utilizadas em sistemas de irrigação por gotejamento, de três distintos diâmetros (14,2192, 16,0026 e 18,6009 mm – Das marcas Netafim, Irritec e Plastsilva tubos) A espessura de parede dos tubos é 1,04 mm, 0,98 mm e 2,01 mm, respectivamente. O diâmetro dos tubos foi determinado com auxílio de um scanner de mesa (FLORES *et al.*, 2021).

Para a realização dos ensaios, foi utilizada a bancada experimental de ensaios de tubos, tubos emissores e emissores de irrigação localizada (Figura 2), constituída por um reservatório acoplado a uma unidade de bombeamento, filtro de disco, tubulações e válvulas para controle de vazão e pressão, e equipamentos para realização de medições (Tabela 01). A bancada experimental está locada no Laboratório de Irrigação e Hidráulica do Centro de Desenvolvimento Tecnológico na Universidade Federal de Pelotas. Para as conexões de tomadas de pressão foi utilizada a metodologia descrita por Flores *et al.* (2017).

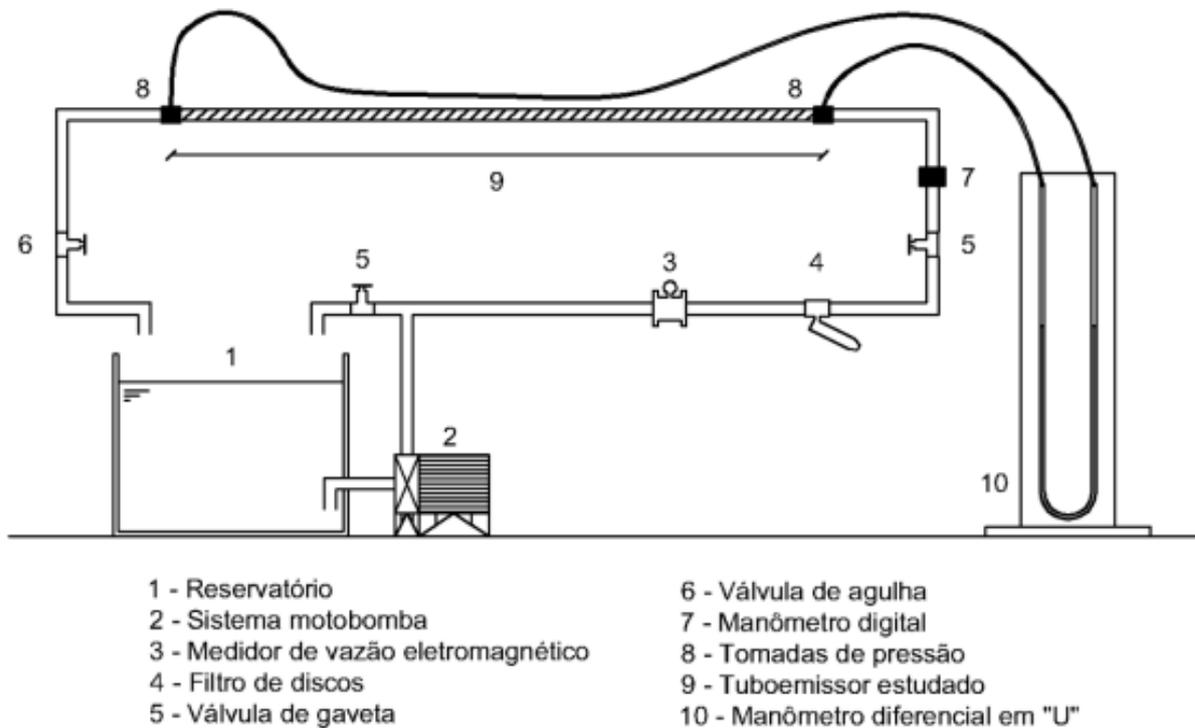


Figura 2 – Modelo Croqui da bancada experimental para determinação de perda de carga.
 Fonte: Flores *et al.* (2017)

Tabela 1 - Modelo, capacidade e precisão dos equipamentos da bancada experimental

Equipamento	Modelo	Capacidade	Precisão
Reservatório	-- ¹	372 L	-- ¹
Bomba	KSB Hidrobloc P1000T	1 cv	-- ¹
Filtro de disco	Plastubos	120 mesh	-- ¹
Termômetro	-- ¹	0°C - 100°C	1°C
Medidor de vazão	Krhone Conaut KC1000F/6	0 - 3,5 m ³ h ⁻¹ ²	0,005 VM ³
Manômetro	Lámon DMP-01 DPP	0 - 200 m	0,001 FE ⁴
Manômetro diferencial (água)	-- ¹	0 - 1,8 m ⁵	1 mm ⁵
Manômetro diferencial (mercúrio)	-- ¹	0 - 1,8 m ⁶	1 mm ⁶

¹não se aplica; ²faixas de operação certificada; ³valor medido; ⁴fundo de escala, equivale a 0,2 m; ⁵metros de coluna de água ($\gamma = 1.000 \text{ kgf m}^{-3}$); ⁶metros de coluna de mercúrio ($\gamma = 13.600 \text{ kgf m}^{-3}$).

A tubulação ensaiada possuía comprimento de 10 metros (entre tomadas de pressão). Durante a execução dos ensaios, a velocidade foi variada de forma ascendente, sem que houvesse alteração na carga de pressão de entrada (20 m) para não alterar o diâmetro da tubulação, reduzindo assim erros na estimativa dos valores

de perda de carga do ensaio (RETTORE NETO *et al.*, 2016). Para cada diâmetro, foram realizados quatro ensaios.

A perda de carga foi considerada a diferença de carga pressão entre a tomada de pressão inicial e a tomada de pressão final, tendo em vista que não houve alteração do diâmetro, velocidade e altura ao longo da lateral. Para determinar pequenas diferenças de carga de pressão (menores que 1,5 m) com maior precisão entre as tomadas de pressão, foi utilizado o conjunto de piezômetros com água, evitando erros de leitura. Para diferenças de carga de pressão superiores a 1,5 m foi utilizado o manômetro diferencial em “U” com mercúrio.

O número de Reynolds (Re) foi calculado através da equação 8. A viscosidade cinemática foi estimada com a temperatura mensurada ao longo do ensaio, através da massa específica (KELL, 1975) e da viscosidade dinâmica (WEAST, 1989). O fator de atrito observado foi obtido através do reajuste da equação 7, para explicitar f , gerando a equação 25.

$$f_{\text{obs}} = \frac{hf \cdot D \cdot 2 \cdot g}{L \cdot V^2} \quad (25)$$

sendo:

f_{obs} é o fator de atrito de Darcy observado, adimensional;

hf é a perda de carga continua na tubulação, m;

L é o comprimento da tubulação, m;

D é o diâmetro da tubulação, m;

V é a velocidade de escoamento, m s^{-1} ; e,

g é a aceleração da gravidade, m s^{-2} ($g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$)

Após levantamento de todo conjunto de dados, os valores de f_{obs} foram comparados aos estimados por meio das equações 9 até 24. As equações foram identificadas ao longo do trabalho pelo nome dos autores, sendo as equações 15, 16, 18 e 19 nomeadas Vatankhah I (2018), Vatankhah II (2018), Praks; Brkic I (2020) e Praks; Brkic II (2020), respectivamente. Para os cálculos, a rugosidade absoluta das tubulações foi considerada como 0 mm, podendo inferir através de diversos autores a caracterização de tubos de polietileno como tubos hidraulicamente lisos. Todos os cálculos foram realizados em planilha eletrônica, usando o software Microsoft Office

Excel®. Para comparação dos modelos foi utilizado o Diagrama de Taylor (TAYLOR, 2001).

3.3. Resultados e Discussão

A Tabela 3 apresenta os dados de perda de carga (h_f), vazão (Q), fator de atrito de Darcy (f) e Número de Reynolds (Re) obtidos experimentalmente, nos 12 ensaios realizados (quatro por diâmetro (D)). Também é possível observar o número de dados obtidos ao todo (n , para $0 \leq Re \leq \infty$) e apenas para o regime de turbulência (n^* , para $Re \geq 4000$).

Tabela 2 - Dados exploratórios dos ensaios e repetições

Diâmetro D (mm)	Ensaio	Número de dados		Perda de carga (h_f , m)		Vazão (Q , $m^3 h^{-1}$)		Fator de atrito de Darcy f		Número de Reynolds Re	
		n	n*	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
14,2192	1	24	21	0,01	5,22	0,04	1,44	0,02	0,07	956,22	34659,84
	2	31	23	0,01	5,28	0,04	1,46	0,02	0,08	780,46	35857,36
	3	36	26	0,01	5,27	0,05	1,45	0,02	0,06	1003,45	34780,02
	4	36	26	0,02	5,25	0,05	1,44	0,02	0,06	1086,61	34683,88
	Todos	127	96	0,01	5,28	0,04	1,46	0,02	0,08	780,46	35857,36
16,0026	1	40	33	0,01	4,32	0,05	1,81	0,02	0,06	1083,54	39651,51
	2	39	33	0,01	4,32	0,05	1,81	0,02	0,06	1010,51	38549,89
	3	39	32	0,01	4,31	0,04	1,81	0,02	0,08	833,24	39563,98
	4	39	33	0,01	4,35	0,05	1,81	0,02	0,06	1083,54	39520,21
	Todos	157	131	0,01	4,35	0,04	1,81	0,02	0,08	833,24	39651,51
18,6009	1	39	33	0,00	3,01	0,04	2,21	0,02	0,09	717,06	43575,61
	2	39	33	0,01	3,01	0,05	2,21	0,02	0,08	844,79	43554,54
	3	40	33	0,00	3,02	0,04	2,22	0,02	0,08	790,31	44805,19
	4	40	35	0,01	2,99	0,05	2,21	0,02	0,07	982,95	44643,58
	Todos	158	134	0,00	3,02	0,04	2,22	0,02	0,09	717,06	44805,19

n* são pares de dados considerando apenas valores de Número de Reynolds superiores a 4000.

Pode-se observar que com aumento do D , a máxima h_f reduz, mesmo com aumento de Q . Neste sentido, realizando-se uma análise da equação universal de Darcy-Weisbach para estimativa de h_f (Equação 7), pode-se verificar que h_f é inversamente proporcional a D . A partir de uma regressão do tipo $h_f = \alpha Q^\beta$ (Figura 3), pode-se notar que o coeficiente α da regressão reduz com aumento da regressão, traduzindo esse comportamento.

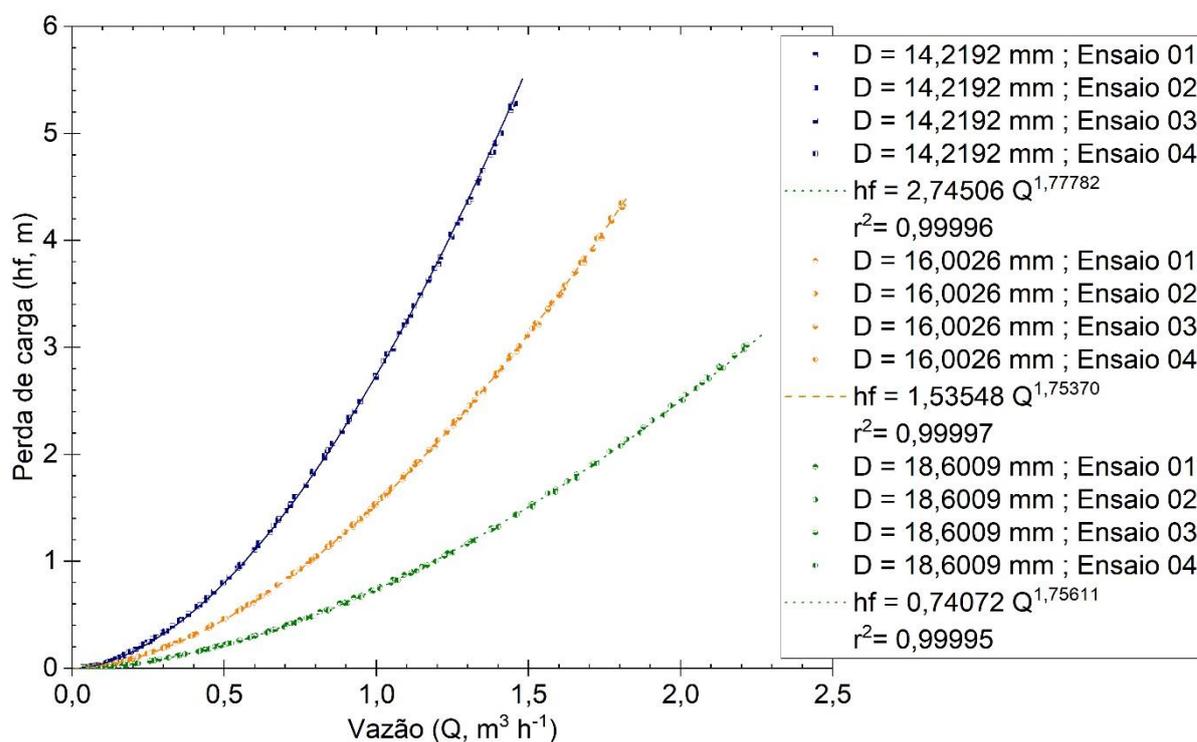


Figura 3 - Relação entre vazão e perda de carga

Blasius (1913) desenvolveu um modelo para estimativa do fator de atrito de Darcy (f) para tubos lisos, que comumente ainda é utilizado (JARDIM *et al.*, 2022; KIIJARVI, 2011). A equação de Blasius (1913), é um modelo potencial, que considera apenas o Número de Reynolds (Re) para estimativa de f , possuindo como expoente para Re o valor de -0,25. Ajustando matematicamente a equação universal de Darcy-Weisbach (Equação 7), pode-se verificar que Q (ou V) possui expoente de 1,75. Os dados deste estudo, que de acordo com a bibliografia podem ser considerados hidráulicamente lisos (BERNUTH, WILSON, 1989; CARDOSO *et al.*, 2008; DE SOUZA, NETO, 2014; RETTORE NETO *et al.*, 2009), possuem expoente da vazão entre 1,75370 e 1,77782, indicando que os tubos ensaiados possuem comportamento de tubos hidráulicamente lisos.

Este comportamento também pode ser observado quando os dados de $f(Re)$ são plotados sobre o Ábaco de Moody (Figura 4). Para a condição de regime laminar ($Re \leq 2 \times 10^3$), os dados encontram-se muito próximos ao comportamento descrito pela equação de Hagen-Poiseuille (BAHRANI; NOUAR, 2014). Porém, ressalta-se que nesta condição, os valores observados possuem grau de incerteza mais elevado, tendo em vista que a perda de carga é pequena, resultando em medidas menos precisas. Para o regime crítico ($2 \times 10^3 < Re < 4 \times 10^3$) os dados se comportam de uma

maneira pouco previsível, isso pode ser explicado pela dificuldade de estabilização do fluido em pequenas velocidades (BROWN, 2003). Já no regime turbulento ($Re \geq 4 \times 10^3$), os dados se comportam de acordo com o esperado para tubos hidraulicamente lisos. Neste regime, conforme o Re aumenta, f diminui (MOODY, 1944).

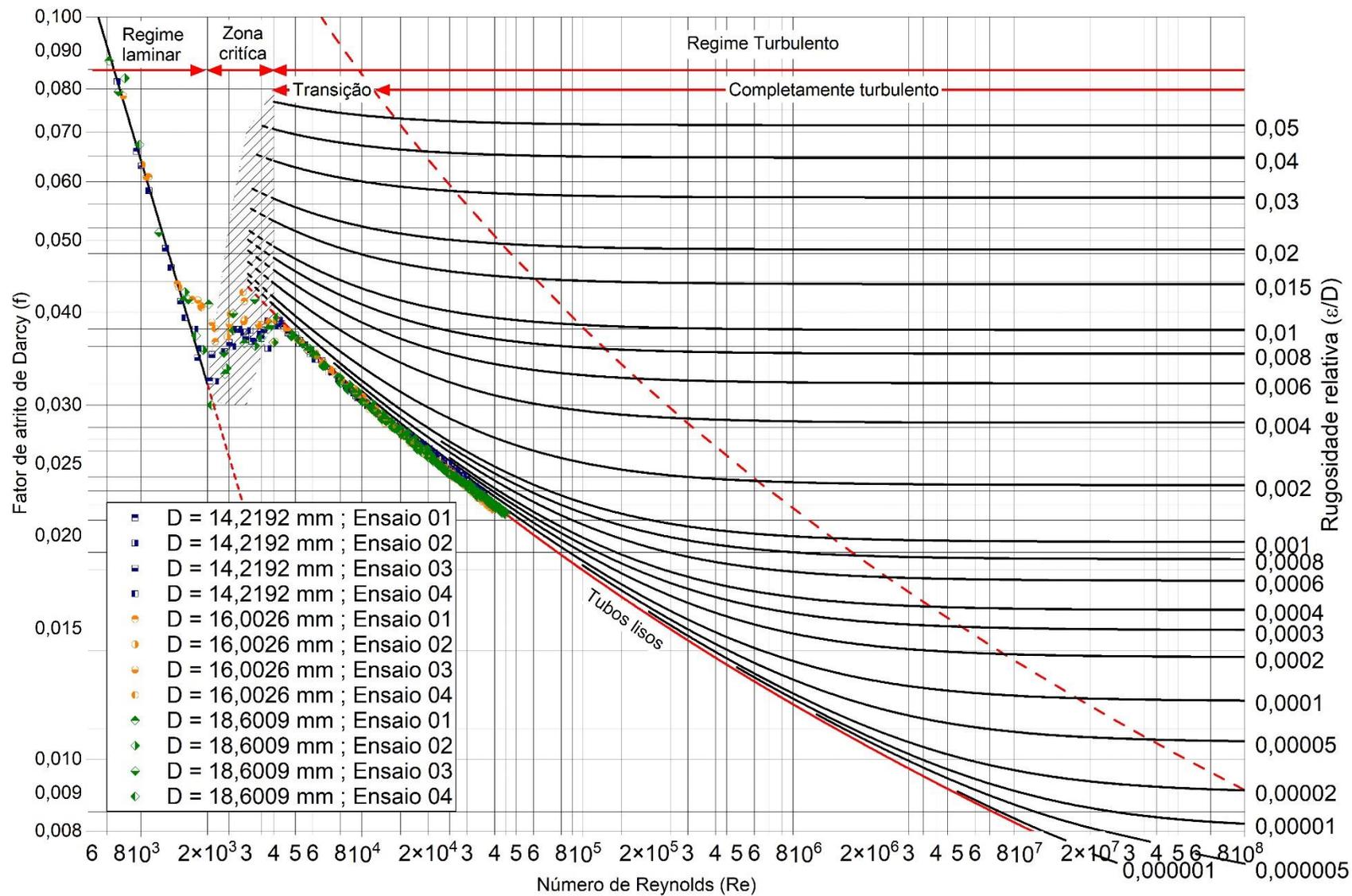


Figura 4 - Ábaco de Moody com os dados ensaiados

Na figura 5 são apresentados os valores observados e estimados de f em função de Re , assim como suas diferenças relativas. Para demonstração das diferenças relativas, as equações foram agrupadas em três grupos distintos. O primeiro conjunto de equações compreende as equações com faixa de aplicação para todos os regimes (MORRISON, 2013; AVCI; KARAGOZ, 2019). Estas equações apresentam comportamento geral semelhante, possuindo maiores erros na zona crítica ($2000 < Re < 4000$). Os valores de f estimados pelas duas equações na zona de regime laminar ($Re < 2000$) são muito semelhantes, tendo em vista que sua formulação é semelhante para esta zona, baseando-se na equação de Hagen-Poiseuille (BAHRANI; NOUAR, 2014). Para Arumugam *et al.* (2022) para valores de Reynolds acima de 4000, baseado nos critérios utilizados, o modelo proposto por Morrison se mostrou satisfatório além da equação possuir uma estrutura simples. Na zona crítica, a equação de Morrison (2013) tende a subestimar os valores de f , ao passo que a equação de Avci; Karagoz (2019) tende a superestimar os valores de f . Para o regime turbulento ($Re > 4000$), ambas equações apresentam diferenças inferiores aos demais regimes, a equação de Avci; Karagoz (2019) apresenta poucas diferenças comparativamente a de Morrison (2013).

O segundo grupo de equações analisadas, compreende as equações de Blasius (1913) e a adaptação desta, apresentada por Jardim *et al.* (2021). Este grupo de equações são modelos potenciais, de simples formulação, sendo a primeira dependente apenas de Re , e a segunda ajustada em função do diâmetro da tubulação. A equação de Blasius (1913) superestimou os valores de f , para todos os dados estimados. A proposição de correção do diâmetro da tubulação reduziu consideravelmente a diferença entre os valores estimados e observados.

Para Alves e Porto (2002) a equação de Blasius é eficiente para estimar o fator de atrito de tubos lisos, desde que o valor de Reynolds não ultrapasse 100000, porém, Jardim *et al.* (2021) comentam que a consideração do diâmetro na equação de Blasius, quando as características hidráulicas do projeto apresentarem diâmetros inferiores a 0,025 m e velocidades de escoamento inferiores a 1 m s^{-1} , podem contribuir para diminuição do erro da equação.

O terceiro grupo de equações são aproximações para explicitar f no modelo de Colebrook; White (COLEBROOK, 1939). Todas as equações tiveram comportamento semelhante, apresentando erros semelhantes (ou iguais) entre si, e diferenças menores comparativamente as equações de Blasius (1913), Morrison

(2013), Avci; Karagoz (2019), e Jardim *et al.* (2021). Indiferentemente do método utilizado para aproximação, as equações testadas neste trabalho possuem ajustes muito bons para dados simulados a partir da equação de Colebrook; White. Isto pode ser observado pelas diferenças relativas entre os dados observados e os dados estimados pela equação de Colebrook; White serem muito semelhantes as diferenças relativas dos demais modelos.

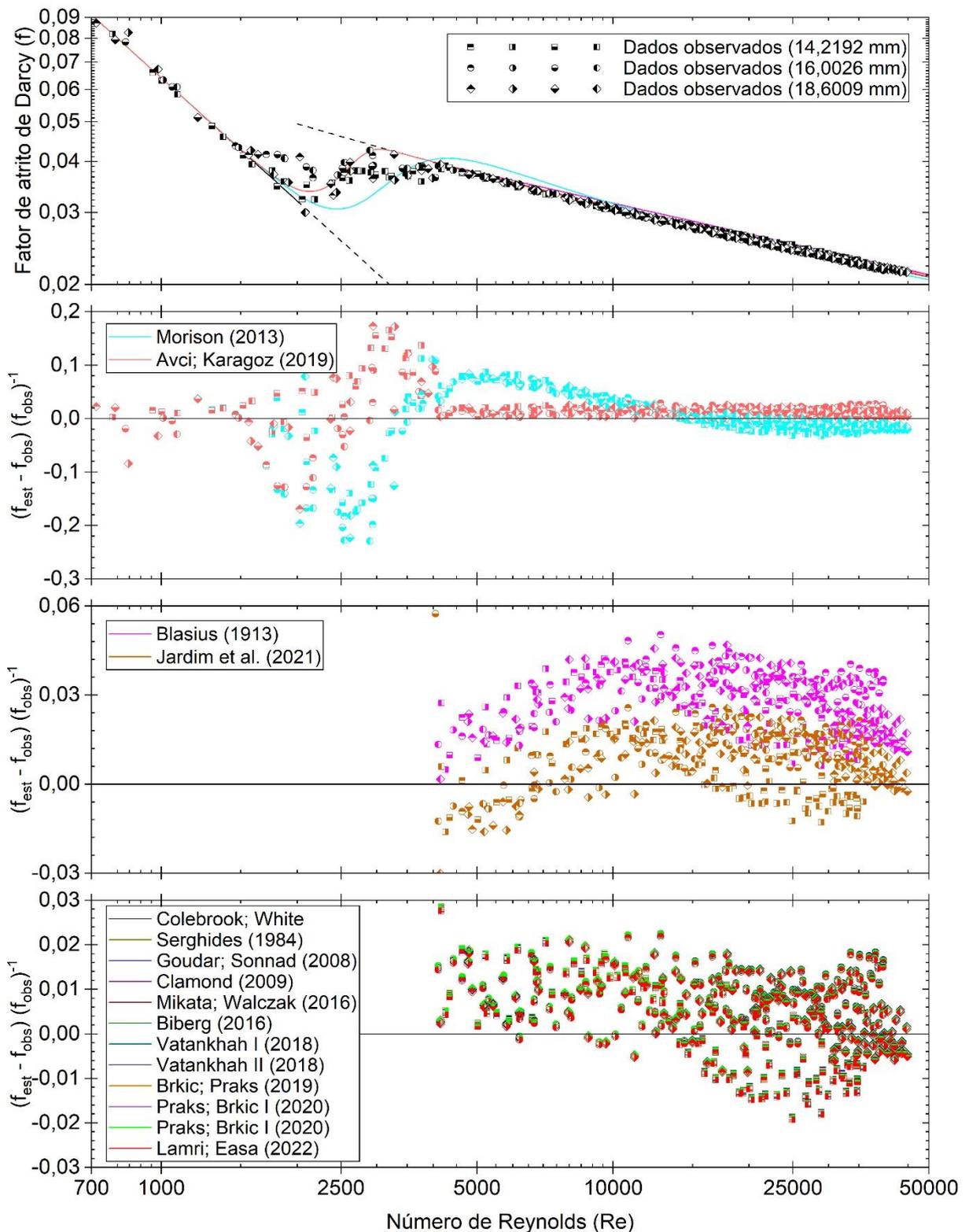


Figura 5 - Fator de atrito de Darcy e diferença relativa entre valores estimados e observados

A figura 6 apresenta o diagrama de Taylor (TAYLOR, 2001), avaliando o desempenho das equações estudadas (para $Re > 4000$) por meio do coeficiente de correlação de Pearson, o desvio padrão e a diferença de raiz quadrada média

centralizada (RMS) em apenas uma análise gráfica. Todas as equações possuem coeficiente de correlação acima de 0,99, com valores de RMS inferiores a 0,001.

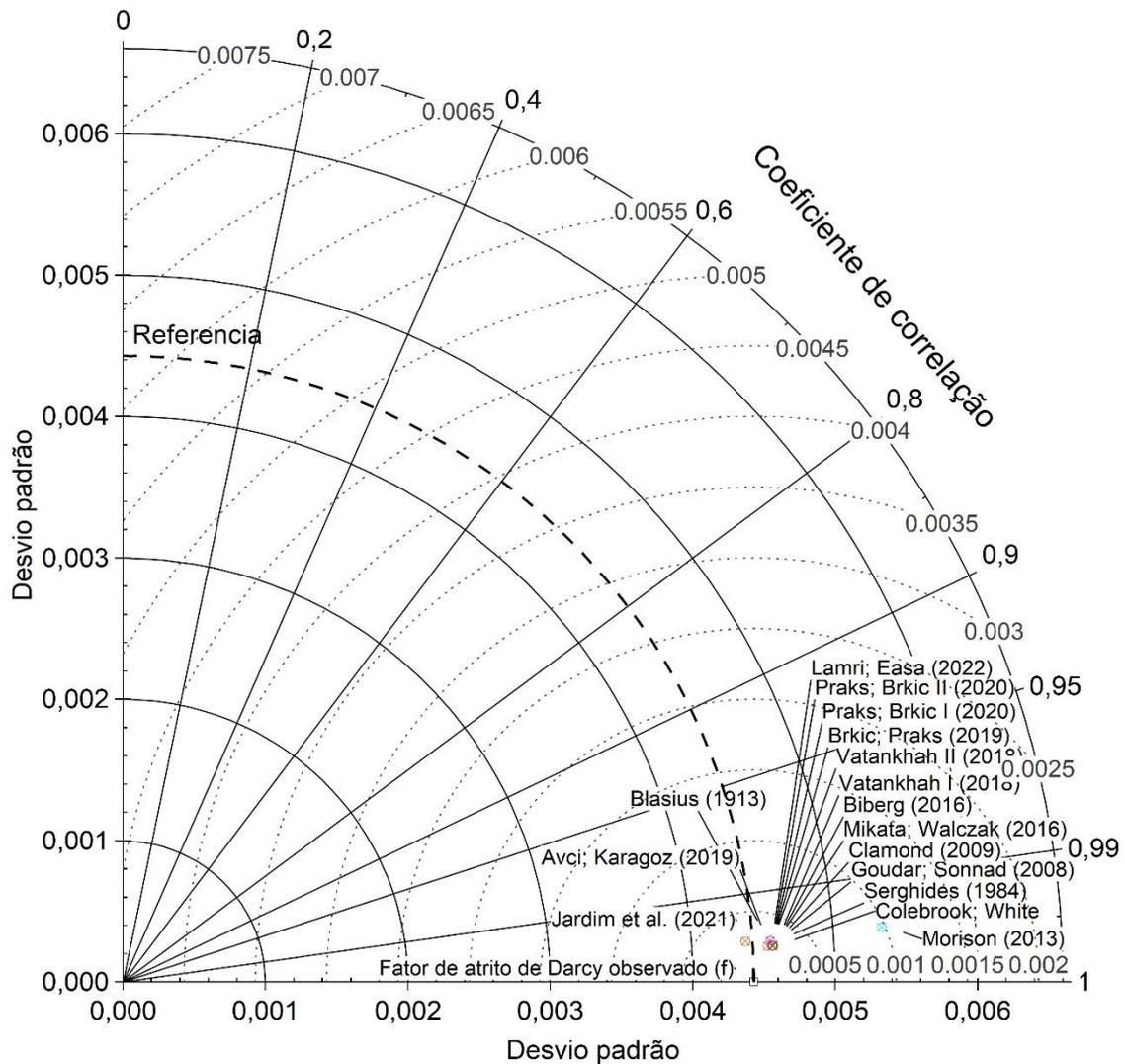


Figura 6 - Diagrama de Taylor para análise de eficiência das estimativas do fator de atrito dos modelos estudados.

Analisando apenas o coeficiente de correlação, Avci; Karagoz (2019) representaram o maior valor de correlação (0,99842), seguido pelos modelos que são aproximações de Colebrook; White (0,99841), todos com valores iguais (até o quinto algarismo significativo). Blasius (1913) e Jardim *et al.* (2021) apresentaram coeficiente de correlação de 0,99795 e 0,99781, respectivamente, e Morrison (2013) apresentou o menor coeficiente de correlação (0,99731). Porém, deve-se ressaltar que estes valores podem ser considerados muito altos, com uma diferença máxima de apenas 0,11%. Na análise de desvio padrão, deve-se destacar que os dados observados tiveram desvio padrão de 0,00443, sendo que a única equação com desvio padrão

inferior foi a de Jardim *et al.* (2021) (0,00438), sendo que esta equação também gerou os valores com desvio padrão mais semelhante aos dados observados. Avci; Karagoz (2019), Blasius (1913) e aproximações de Colebrook; White, apresentaram valores de desvio padrão de 0,00453, 0,00455 e 0,00457, respectivamente. Os valores estimados pela equação de Morrison (2013) obtiveram os maiores desvios padrão (0,00534). A análise dos valores de coeficiente de correlação e desvio padrão corroboram com o fato de que os modelos para aproximação da equação de Colebrook; White possuem comportamentos semelhantes, e as diferenças com relações aos dados observados podem ser função da diferença da própria equação de Colebrook; White. Dentre os parâmetros analisados através do diagrama de Taylor, o valor de RMS é o que apresenta maiores discrepâncias (Figura 7).

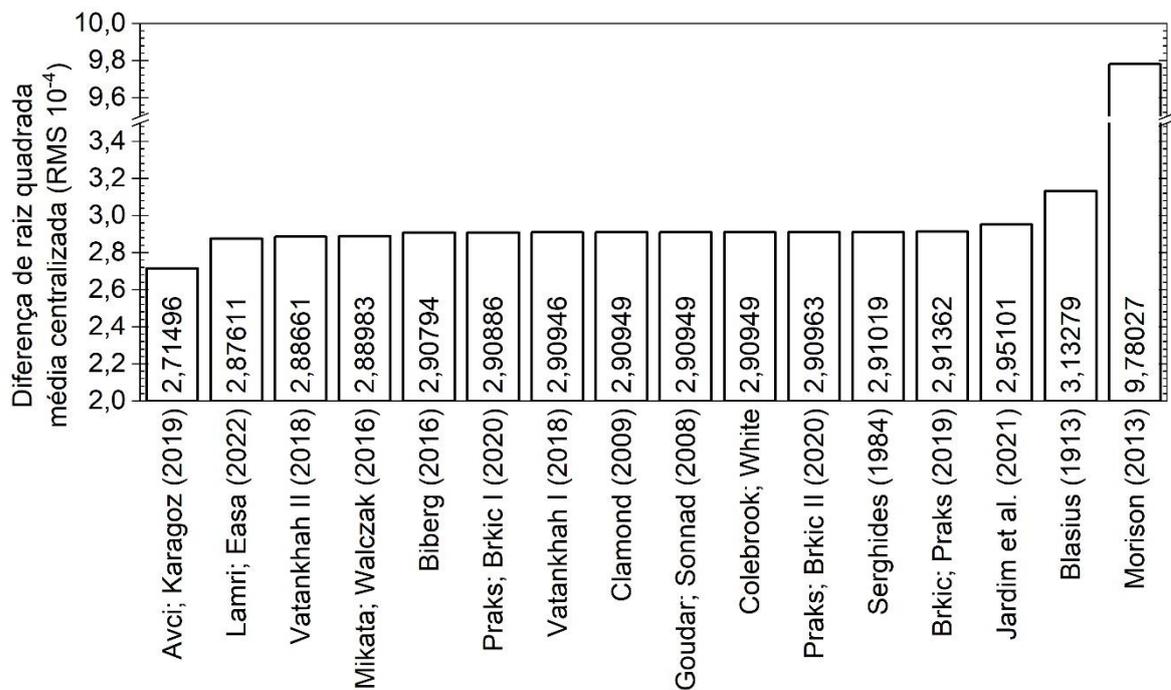


Figura 7 - Diferença de raiz quadrada média (RMS).

A equação de Avci; Karagoz (2019) que apresentou o maior coeficiente de correlação, apresentou também o menor valor de RMS, ao passo que a equação de Morrison (2013), menor coeficiente de correlação, apresentou o maior valor de RMS. Jardim *et al.* (2021), que apresentou desvio padrão mais próximo aos dados observados, apresentou valores de RMS inferiores apenas a Blasius (1913) e Morrison (2013), que já haviam apresentado os piores valores do coeficiente de correlação e desvio padrão. Dentro das aproximações de Colebrook; White, Lamri;

Easa (2022) apresentou resultado mais distante do resultado da própria equação de Colebrook; White, porém, apresentou o segundo menor valor de RMS.

Analisando os resultados apresentados, deve-se ter em consideração que todas as equações apresentadas possuem resultados excelentes, com coeficiente de correlação acima de 0,99 e valores de RMS inferiores a 0,001. Porém, deve-se destacar que a equação de Avci; Karagoz (2019) apresentou resultados mais satisfatórios que as demais. Mesmo possuindo nível de complexidade superior a equação de Blasius (1913), comumente utilizada para estas situações, possui como ponto positivo a aplicabilidade a todos os regimes de escoamento. Ressalta-se também que a correção inserida por Jardim *et al.* (2021) na equação de Blasius (1913), apresentou melhoria nos seus resultados, sendo mais simples que os modelos de Avci; Karagoz (2019) e as aproximações de Colebrook; White. Dentre as aproximações de Colebrook; White, Lamri; Easa (2022) apresentaram os melhores resultados, porém diferindo pouco da própria equação de Colebrook; White, e com complexidade superior a Avci; Karagoz (2019) e Jardim *et al.* (2021).

3.4. Conclusão

Os tubos estudados apresentaram comportamento de tubos lisos. Das diversas equações estudadas a de Avci; Karagoz (2019) apresentou os menores erros, entretanto, as equações de Colebrook; White (1939) e Blasius (1913), possuem um alto nível de correlação e ainda podem ser utilizadas pela sua ampla confiança para cálculo de fator de atrito em tubulações em sistemas de irrigação por gotejamento.

4. Capítulo 2 – Coeficiente de carga cinética de emissores online para irrigação por gotejamento

4.1. Introdução

A irrigação por gotejamento é considerada uma das técnicas de irrigação mais eficientes para a conservação dos recursos hídricos. Diversos autores ressaltam as vantagens desse sistema sobre os demais pela aplicação da água diretamente na zona radicular da planta e redução da perda por evaporação, podendo alcançar altos níveis de uniformidade quando o projeto for bem dimensionado (PROVENZANO *et al.*, 2013; SEYEDZADEH *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2020).

Baiamonte (2018) alerta que inúmeros projetos inadequados de irrigação por gotejamento podem diminuir a uniformidade de aplicação de água, levando a redução de produtividade e do crescimento das culturas. A quantificação da perda de carga em linhas laterais é um fator crucial em projetos de irrigação por gotejamento pois influência diretamente na altura manométrica total do sistema, no conjunto motobomba e por consequente nos gastos energéticos do sistema (CHAMBA *et al.*, 2019; SÍCOLI *et al.*, 2019).

Um dos fatores que interferem na perda de carga da linha lateral é a obstrução causada pelo emissor no tubo, que pode chegar a valores de até 33% de perda localizada em relação a perda de carga total do sistema. (AL-AMOUND, 1995). Neto *et al.* (2011) avaliaram um tubo emissor com diâmetro interno de 14,45 mm e obtiveram perdas de carga localizada causadas pela inserção do emissor na ordem de 23% em relação a perda total do sistema.

Frizzone *et al.* (2012) afirmam que um dos principais componentes da irrigação por gotejamento são os emissores. Ainda sobre emissores, eles possuem diversas classificações, podendo ser *in-line* (emissor projetado diretamente na linha do tubo) ou emissor *on-line* (emissor projetado para instalação em um tubo “cego”). Wang; Chen (2020) alertam que para emissores *on-line* há uma singularidade nas perdas que é a protusão do emissor no fluxo, causando uma contração e subsequente uma ampliação no fluxo de água.

A perda de carga localizada causada pela inserção desses emissores no tubo pode ser calculada através da equação geral de perda de carga localizada, que apresenta uma parcela “k” da carga cinética da equação de Bernoulli, conhecida como

o princípio da similaridade de Reynolds, apresentada pela equação 26 (AZEVEDO NETTO, FERNADEZ, 2015; CARDOSO, FRIZZONE, 2014).

$$hl = k \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (26)$$

sendo:

hl é a perda de carga localizada causada pelo emissor, m;

k é o coeficiente de carga cinética, adimensional;

V é a velocidade de escoamento, m s⁻¹;

g é a aceleração da gravidade, m s⁻².

Flores *et al.* (2017) apresentaram resultados onde o coeficiente de carga cinética (k) é dependente das forças viscosas e da geometria do emissor. Rettore Neto *et al.* (2009b) por sua vez, evidenciaram que sob circunstâncias onde o valor de Re > 10000, as forças viscosas podem ser desprezíveis, tornando a obstrução do emissor a principal causa de perda de carga localizada. Bagarello *et al.* (1997) realizaram um experimento para avaliar a ocorrência da perda de carga localizada em emissores *on-line*. Este experimento serviu de base para outros estudos similares (RETTORE NETO *et al.*, 2009; PROVENZANO, PUMO, 2004; PROVENZANO *et al.*, 2005). É importante ressaltar que emissores *on-line* são inseridos em diferentes diâmetros, o que resulta em taxas de obstrução distintas, podendo alterar o comportamento da perda de carga localizada em relação a perda de carga total.

Neste sentido o objetivou-se avaliar a influência da obstrução e do Número de Reynolds (Re) no coeficiente de carga cinética (k) em tubos de polietileno com emissores *on-line*.

4.2. Materiais e Métodos

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram realizados ensaios para determinação da perda de carga localizada (hl) causada pela inserção de um emissor *on-line* da marca Netafim, com faixa de vazão de 4 l h⁻¹, em três distintos diâmetros de uma tubulação de polietileno (14,2192, 16,0026 e 18,6009 mm). Foram realizados quatro ensaios para cada diâmetro, totalizando 12 ensaios. Para a realização dos ensaios, foi utilizada a bancada experimental de ensaios de tubos, tubos emissores e

emissores de irrigação localizada, constituída por um reservatório acoplado a uma unidade de bombeamento, filtro de disco, tubulações e válvulas para controle de vazão e pressão, e equipamentos para realização de medições (Tabela 3). A bancada experimental está locada no Laboratório de Irrigação e Hidráulica do Centro de Desenvolvimento Tecnológico na Universidade Federal de Pelotas. Para as conexões de tomadas de pressão foi utilizada a metodologia descrita por Flores *et al.* (2017). O diâmetro dos tubos foi determinado com auxílio de um scanner de mesa (FLORES *et al.*, 2021). Para a determinação das características geométricas do emissor on-line, fez-se suas medidas, com uso de paquímetro (BAGARELLO *et al.*, 1997) e através de um software de desenho assistido por computador (AutoCAD®), a peça foi desenhada junto aos diâmetros dos três tubos ensaiados (Figura 8), obtendo-se valores apresentados na Tabela 4.

Tabela 3 - Modelo, capacidade e precisão dos equipamentos da bancada experimental

Equipamento	Modelo	Capacidade	Precisão
Reservatório	-- ¹	372 L	-- ¹
Bomba	KSB Hidrobloc P1000T	1 cv	-- ¹
Filtro de disco	Plastubos	120 mesh	-- ¹
Termômetro	-- ¹	0°C - 100°C	1°C
Medidor de vazão	Krhone Conaut KC1000F/6	0 - 3,5 m ³ h ⁻¹ ²	0,005 VM ³
Manômetro	Lámon DMP-01 DPP	0 - 200 m	0,001 FE ⁴
Manômetro diferencial (água)	-- ¹	0 - 1,8 m ⁵	1 mm ⁵
Manômetro diferencial (mercúrio)	-- ¹	0 - 1,8 m ⁶	1 mm ⁶

¹não se aplica; ²faixas de operação certificada; ³valor medido; ⁴fundo de escala, equivale a 0,2 m; ⁵metros de coluna de água ($\gamma = 1,000 \text{ kgf m}^{-3}$); ⁶metros de coluna de mercúrio ($\gamma = 13,600 \text{ kgf m}^{-3}$).

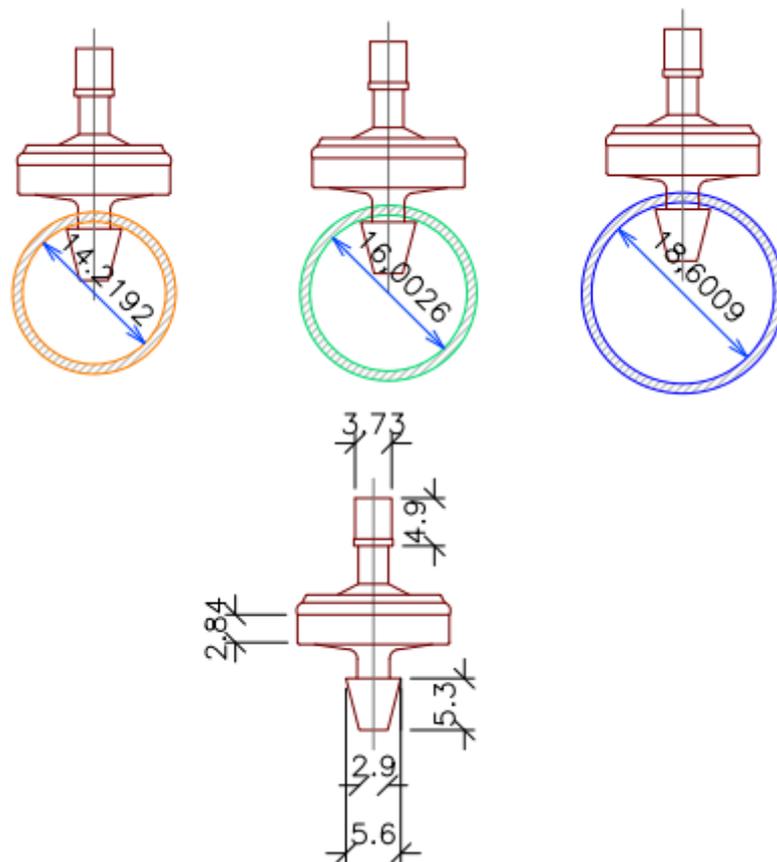


Figura 8 – Dimensões dos tubos ensaiados e emissor.

Tabela 4 – Características geométricas dos tubos e emissores ensaiados.

Diâmetro (mm)	14,2192	16,0026	18,6009
Área do tubo sem emissor ($\times 10^{-4} \text{ m}^2$)	1,58796	2,01127	2,71743
Área obstruída pelo emissor ($\times 10^{-4} \text{ m}^2$)	2,25250	2,25250	2,25250
Área não obstruída pelo emissor ($\times 10^{-4} \text{ m}^2$)	1,36271	1,78602	2,49218
Porcentagem da área sem obstrução	85,83%	88,80%	91,71%

Os ensaios consistiram na determinação das diferenças de carga de pressão entre duas tomadas de pressão instaladas em uma tubulação sem a presença dos emissores (tubo cego) e outra com a presença dos emissores vedados (sem variação de vazão ao longo da lateral) e temperatura da água. A vazão foi variada ao longo do ensaio, sem que ocorresse aumento da pressão de entrada, reduzindo erros relacionados ao aumento do diâmetro da tubulação (RETTORE NETO *et al.*, 2016). Considerando que não há variação de diâmetro, velocidade e cota ao longo da tubulação, é possível determinar que a diferença de carga de pressão é a perda de carga, para o comprimento ensaiado (10 m). Em todos os ensaios, para determinar a diferença de carga de pressão pequenas (menores que 1,5 m) com maior precisão foi

utilizado o conjunto de piezômetros com água, evitando erros de leitura. Para diferenças de carga de pressão superiores a 1,5 m foi utilizado o manômetro diferencial em “U” com mercúrio.

Desta forma, foi possível estimar para a mesma vazão, e por consequência velocidade e carga cinética, a perda de carga distribuída (h_f), utilizando a diferença de pressão da tubulação sem emissores, e a perda de carga total (h_t) para a tubulação com emissores. A perda de carga localizada (h_l) causada pelos emissores é considerada a subtração de h_f de h_t . Considerando que foram inseridos emissores espaçados a 0,5 m, podem ser observados 18 emissores dentro do comprimento ensaiado. Desta forma, h_l anteriormente calculado corresponde a perda de carga localizada causada por 18 emissores. Para cálculos do coeficiente de carga cinética, foi determinado a carga de carga localizada unitária (h_{lU}), obtida pela divisão de h_l pelo número de emissores ($n = 18$).

Para cada diâmetro foram determinados quatro coeficientes de carga cinética (k). A primeira estimativa de k (k_1), deu-se em função de uma regressão linear entre h_{lU} e a carga cinética ($V^2 (2g)^{-1}$), onde k_1 é o coeficiente de inclinação da reta, considerando o intercepto como zero (Equação 27).

$$h_{lU} = k_1 \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (27)$$

sendo:

h_{lU} é a perda de carga localizada causada pelo emissor, m;

k_1 é o coeficiente de carga cinética, adimensional;

V é a velocidade de escoamento, $m \cdot s^{-1}$;

g é a aceleração da gravidade, $m \cdot s^{-2}$.

Outra abordagem utilizada foi a determinação do coeficiente de carga cinética observado (k_{obs}), obtido por meio da divisão de h_{lU} por $V^2 (2g)^{-1}$. Através dos valores de k_{obs} , estimou-se k_2 e k_3 , que são médias dos valores de k_{obs} , porém, k_2 considerando todo o grupo de dados, e k_3 , considerando apenas dados com $Re > 4000$. Já k_4 é uma regressão linear entre os valores de k_{obs} e Re (Equação 28).

$$k_4 = a + b \cdot Re \quad (28)$$

sendo:

k_4 é o coeficiente de carga cinética, adimensional

a e b são parâmetros de ajuste da equação, adimensional;

Re é o número de Reynolds, adimensional.

Todos os cálculos foram realizados em planilha eletrônica, usando o software Microsoft Office Excel®. Os valores de carga cinética foram comparados através cálculos de diferença relativa entre k_1 , k_2 , k_3 e k_4 e valor de k_{obs} e pela raiz quadrada do erro médio (RMSE) (SOBENKO *et al.*, 2022).

4.3. Resultados e discussão

Na tabela 5 estão os valores máximos e mínimos, para cada modelo de tubo emissor estudado, das variáveis observadas no estudo (vazão, temperatura, perda de carga distribuída e total) e as variáveis calculadas (Número de Reynolds, velocidade, viscosidade cinemática, perda de carga localizada, perda de carga localizada unitária e coeficiente de carga cinética).

Tabela 5 - Dados exploratórios dos ensaios e repetições

D (mm)	Ensaio	Q (m ³ h ⁻¹)		T (°C)		hf (m)		ht (m)		hl (m)		Re		V (m s ⁻¹)		v (m ² s ⁻¹)		V ² (2 g) ⁻¹ (m)	
		Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín (x10 ²)	Máx (x10 ⁴)	Mín	Máx	Mín (x10 ⁻⁶)	Máx (x10 ⁻⁶)	Mín (x10 ⁻⁴)	Máx (x10 ⁻¹)
14,2192	1	0,044	1,442	15	19	0,014	5,216	0,019	7,862	0,005	2,646	9,562	3,466	0,0770	2,5224	1,145	1,035	3,020	3,244
	2	0,035	1,456	16	20	0,011	5,279	0,017	7,925	0,006	2,646	7,805	3,586	0,0612	2,5469	1,115	1,010	1,911	3,307
	3	0,045	1,447	16	19	0,014	5,267	0,017	7,913	0,003	2,646	10,03	3,478	0,0787	2,5312	1,115	1,035	3,159	3,266
	4	0,050	1,443	15	19	0,016	5,254	0,03	7,774	0,014	2,520	10,86	3,468	0,0875	2,5242	1,145	1,035	3,900	3,249
	Tds	0,035	1,456	15	20	0,011	5,279	0,017	7,925	0,003	2,646	7,805	3,586	0,0612	2,5469	1,115	1,035	1,911	3,307
16,0026	1	0,052	1,812	18	20	0,010	4,322	0,011	6,048	0,001	1,726	10,84	3,965	0,0718	2,5026	1,061	1,010	2,630	3,193
	2	0,051	1,805	16	19	0,010	4,322	0,014	6,035	0,004	1,713	10,11	3,855	0,0704	2,4929	1,115	1,035	2,530	3,169
	3	0,041	1,808	17	20	0,008	4,309	0,009	6,073	0,001	1,764	8,332	3,957	0,0566	2,4970	1,088	1,010	1,635	3,179
	4	0,052	1,806	18	20	0,010	4,347	0,014	6,061	0,004	1,713	10,84	3,952	0,0718	2,4943	1,061	1,010	2,630	3,172
	Tds	0,041	1,812	16	20	0,008	4,347	0,003	6,073	0,001	1,764	8,332	3,965	0,0566	2,5026	1,061	1,035	1,635	3,193
18,6009	1	0,04	2,207	18	22	0,004	3,011	0,008	3,402	0,004	0,391	7,171	4,358	0,0409	2,2560	1,061	0,963	0,852	2,595
	2	0,046	2,207	19	22	0,005	3,011	0,006	3,402	0,001	0,391	8,448	4,356	0,0470	2,2538	1,035	0,963	1,125	2,590
	3	0,042	2,218	20	23	0,004	3,024	0,005	3,427	0,001	0,403	7,903	4,481	0,0429	2,2651	1,010	0,941	0,938	2,616
	4	0,051	2,21	21	23	0,005	2,986	0,006	3,377	0,001	0,391	9,829	4,464	0,0521	2,2569	0,986	0,941	1,383	2,597
	Tds	0,04	2,218	18	23	0,004	3,024	0,005	3,427	0,001	0,403	7,171	4,481	0,0409	2,2651	0,986	0,963	0,852	2,616

Tds – Todos os ensaios; Mín – Valor mínimo; Máx – Valor máximo; Q – Vazão; T – Temperatura da água no ensaio; hf – Perda de carga distribuída; ht – Perda de carga total; hl – Perda de carga localizada; Re – Número de Reynolds; V – Velocidade de escoamento; v – Viscosidade cinemática; V² (2 g)⁻¹ – Carga cinética.

A figura 9 apresenta os dados de ht, hf e hl em função da vazão, nos três diâmetros ensaiados, bem como a equação de regressão obtida. É possível também observar a relação da entre hl e ht, hf e ht. As linhas em tons amarelos representam a ht, as linhas azuis hf e vermelhas a hl.

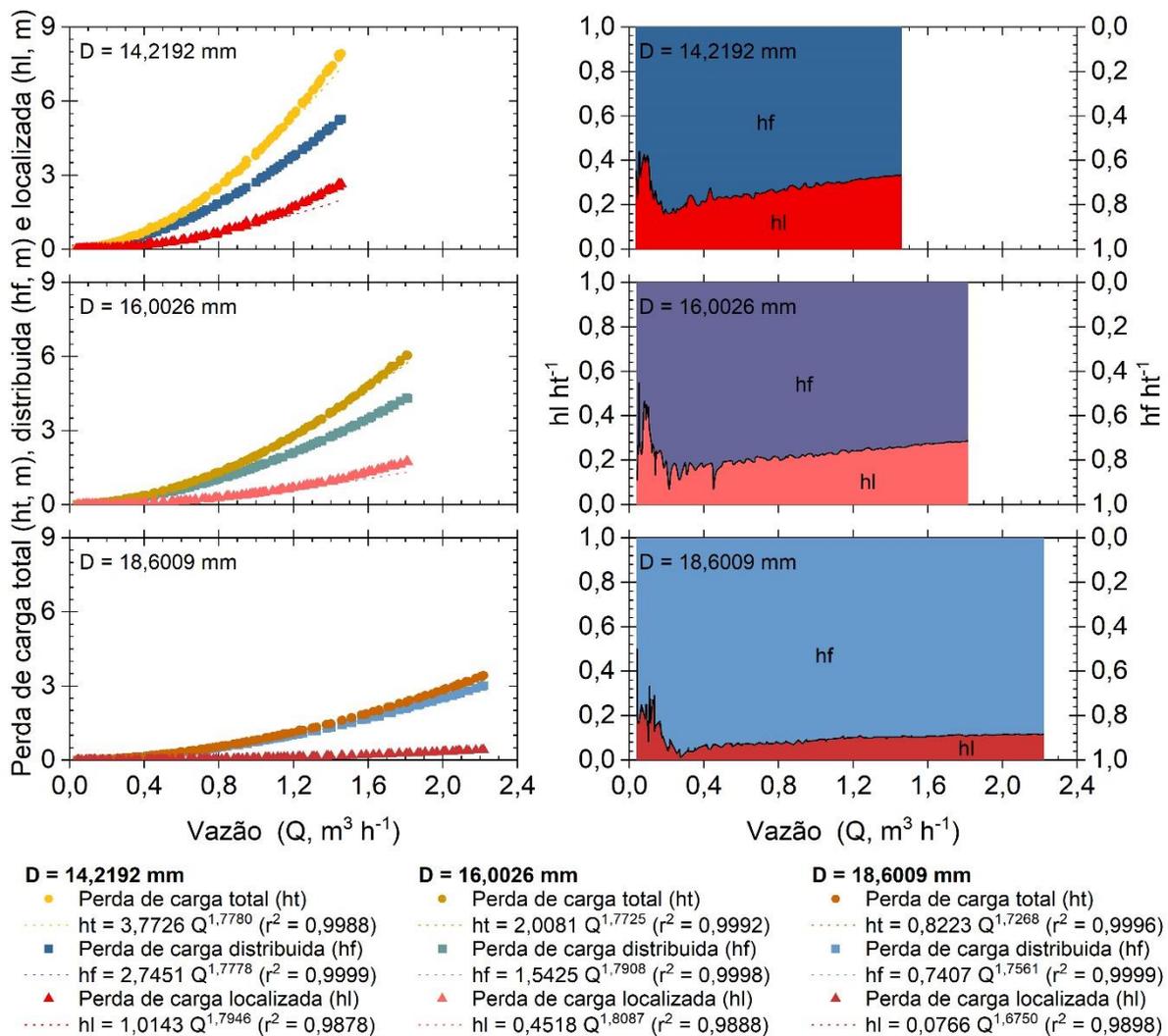


Figura 9 - Perda de carga total no tubo emissor (ht), perda de carga distribuída (hf) e perda de carga localizada (hl) em função da vazão (Q), nos três diâmetros ensaiados.

O aumento do diâmetro, mantendo-se o emissor, o impacto de hl diminui. Corroborando com Bagarello (1995), Flores *et al.* (2017), Cardoso; Klar (2014), já que com o aumento do diâmetro, há um aumento da área da seção transversal, reduzindo a relação entre a área obstruída e não obstruída, causando assim uma menor perda de carga localizada. Os valores de hl em relação ht, alcançam níveis 40%, 30% e 15%, para os diâmetros de 14,2192, 16,0026 e 18,6009 mm, respectivamente. Bernardo *et al.* (2008) alertam que alguns projetistas desprezam as perdas de carga localizada

causada pelos gotejadores e peças especiais, ou em alguns casos, consideram como 5% sobre a altura manométrica total do sistema.

A figura 10 apresenta a h_{lU} em função da carga cinética, assim como a regressão apresentada na equação 27, com os valores de k_1 , e seu respectivo coeficiente de determinação, para os três diâmetros ensaiados. Conforme a velocidade de escoamento aumenta, há uma relação proporcional e positiva a perda de carga localizada.

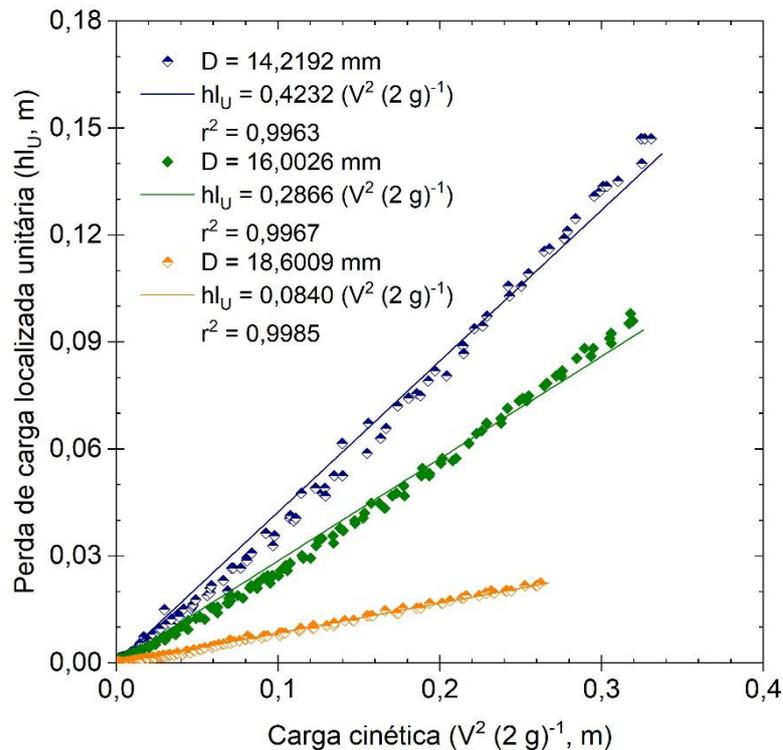


Figura 10 – Perda de carga unitária (h_{lU}) em função da carga cinética ($v^2/2g$).

Esta abordagem também foi utilizada por Flores et al. (2017) e Gomes et al. (2010). Para Vilaça et al., 2017 e Zitterell et al., 2013 os valores de k foram dependentes do modelo do tuboemissor. Também, deve-se ressaltar, que como nos demais artigos da literatura, os valores de coeficiente de correlação de Pearson são superiores a 0,99.

O coeficiente de carga cinética apresentou dependência do Número de Reynolds, e do diâmetro da tubulação (Figura 11). Para $Re < (\approx)4000$, os valores de k_{obs} reduziram com o aumento de Re , ao passo que para $Re > (\approx)4000$, houve o efeito inverso. Já com relação ao diâmetro, a tubulação com menor diâmetro apresentou

maiores valores de k , corroborando com o observado na figura 9, demonstrando que h_l é dependente da obstrução da tubulação.

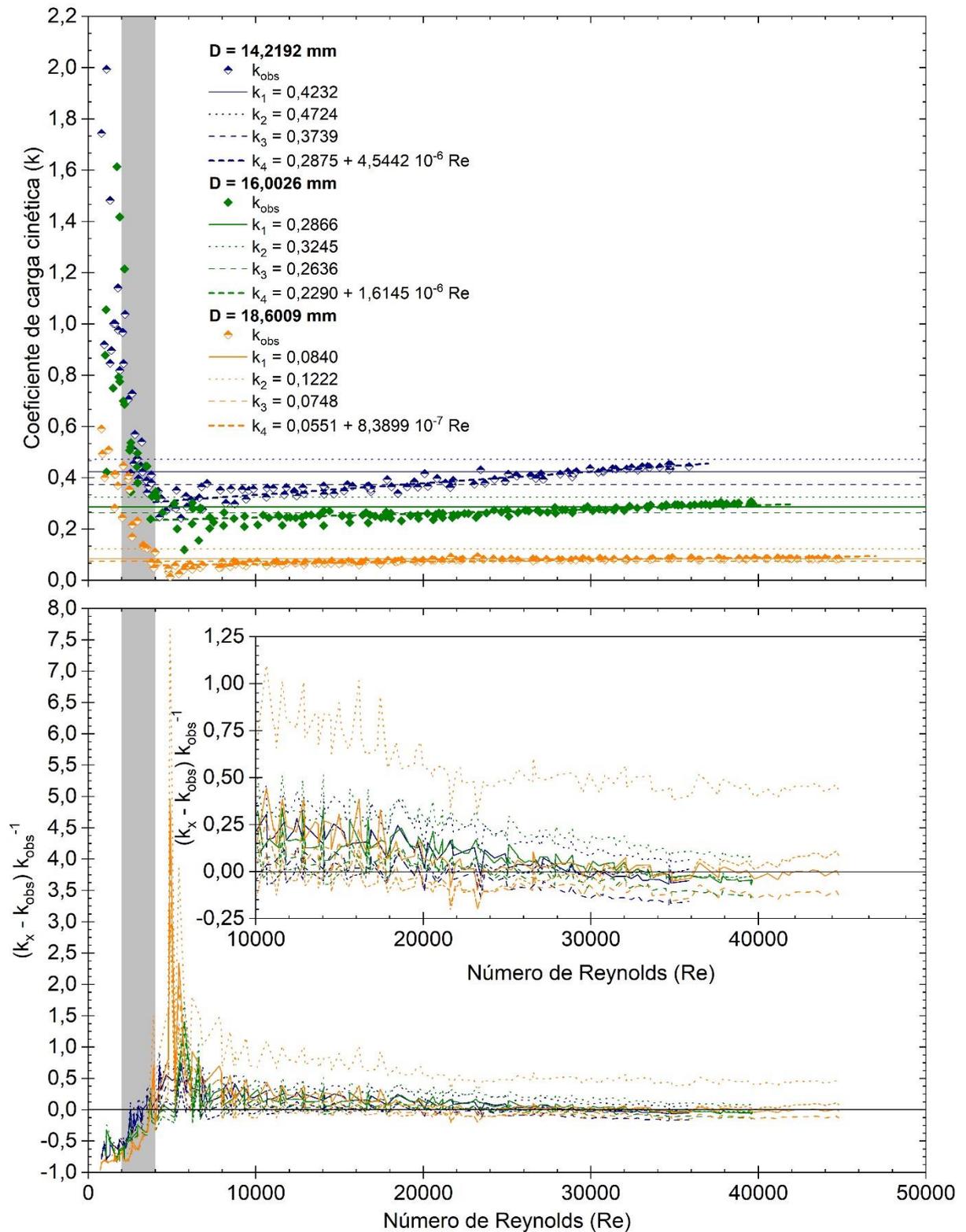


Figura 11 – Coeficiente de carga cinética (k) e erro relativo em função do Número de Reynolds (Re)

Os valores de k_1 , k_2 , k_3 e k_4 , foram distintos, dentro do mesmo diâmetro, e para os diferentes diâmetros. O valor de k_2 foi superior a k_1 e k_3 , tendo em vista que este considera todo o conjunto de dados, e para $Re < (\approx)4000$, k_{obs} é elevado, aumentando assim o valor médio. Já k_1 , pode ser considerado um valor intermédio entre k_2 e k_3 , podendo assim ser considerado um valor interessante dentre os valores constantes em relação a Re . Ressalta-se que, foi analisada também uma regressão, semelhante à usada para determinação de k_1 , apenas com dados com $Re > 4000$, porém, as diferenças entre as regressões são irrisórias, ocorrendo a partir do sexto algarismo significativo. Quanto a regressão de k_{obs} em função de Re , que deu origem a k_4 , ressalta-se que está foi significativa, assim como os dois coeficientes ($p < 0,01$), demonstrando assim uma dependência de k com Re .

Bagarello *et al.* (1997) apresentaram dados obtidos similarmente a este trabalho, porém, concluíram que para valores de $Re > 10000$, k torna-se constante em relação a Re , sendo assim, apenas dependente das características geométricas do tubo e do emissor (área obstruída). Estes resultados de Bagarello *et al.* (1997) foram corroborados por Andrade *et al.* (2021), Flores *et al.* (2017), Rettore Neto *et al.* (2009) e Wang *et al.* (2020)., estudando tubos emissores (emissores integrados a tubulação). Porém, os resultados observados neste estudo contrariam os trabalhos supracitados. Podem ser feitas duas considerações aos trabalhos da literatura, Bagarello *et al.* (1997), trabalhou com $4000 < Re < 18000$, ao passo que neste estudo obteve-se com dados de $Re < 4000$ e $Re > 18000$. Já os estudos realizados com tubos emissores, h_f foi estimada a partir de equações, com o fator de atrito de Darcy determinado por Blasius (1913). Tendo em vista esta característica, podem ter ocorridos erros na estimativa de h_f , e de acordo com Lima *et al.* (2023) (Artigo I), os erros da equação de Blasius (1913) apresentam dependência do Número de Reynolds (Figura 5 – Artigo 1).

A figura 11 também apresenta a diferença relativa entre k_1 , k_2 , k_3 e k_4 , com relação ao K_{obs} . Nota-se, que os maiores erros podem ser observados para k_1 , k_2 e k_3 , principalmente para $4000 < Re < 8000$. Quando se cria uma dependência entre k e Re , aqui representado por k_4 , os erros reduzem, sendo está uma alternativa, para reduzir os erros na estimativa de k . Para $Re < 4000$, poucos autores apresentam estudos, sendo uma área carente de estudos. Analisando os valores de raiz quadrada do erro médio (RMSE), pode-se inferir que k_4 obteve os menores valores, porém, ressalta-se que este tem validade apenas para $Re > 4000$ (Tabela 6).

Tabela 6 – Valores de RMSE dos coeficientes de carga cinética calculados

	k_1	k_2	k_3	k_4
D = 14,2192 mm				
Re < 2000	0,8330	0,7894	0,8772	--
2000 ≤ Re ≤ 4000	0,2393	0,2177	0,2683	--
Re > 4000	0,0693	0,1099	0,0488	0,0209
Todos Re	0,2740	0,2696	0,2870	--
D = 16,0026 mm				
Re < 2000	0,7676	0,7344	0,7879	--
2000 ≤ Re ≤ 4000	0,3266	0,3006	0,3435	--
Re > 4000	0,0379	0,0680	0,0301	0,0249
Todos Re	0,2058	0,2022	0,2112	--
D = 18,6009 mm				
Re < 2000	0,9073	0,8829	0,9133	--
2000 ≤ Re ≤ 4000	0,1864	0,1605	0,1932	--
Re > 4000	0,0161	0,0492	0,0132	0,0083
Todos Re	0,2247	0,2215	0,2265	--

Diante dos erros apresentados, ressalta-se que o k_1 é o mais aceitável entre os coeficientes, por ser um valor médio e o mais simples de ser obtido. Além disso, é possível analisar que os valores dos quatro coeficientes analisados no trabalho, pouco se alteram entre eles, numa variação máxima de 20% do valor de k_1 , consolidando as metodologias utilizadas para obtenção dos coeficientes de carga cinética.

Os estudos realizados nesta área comprovaram alguns comportamentos de trabalhos anteriores, entretanto, alguns resultados justificam futuros estudos de hidráulica de emissores, a fim de captar mais dados de coeficiente de carga cinética em função de Número de Reynolds e a influência da área obstruída em outros diâmetros.

4.4. Conclusões

A perda de carga localizada pode representar até 40% da perda de carga total no sistema. O coeficiente de carga cinética possui dependência da obstrução do emissor causada no tubo de polietileno e do Número de Reynolds.

5. Considerações finais

Concluiu-se com os estudos apresentados que:

- (i) Podem ser usadas diversas equações para o cálculo fator de atrito, pois o erro entre elas é relativamente pequeno, porém, existem equações que apresentam resultados mais fidedigno que outras.
- (ii) O coeficiente de carga cinética possui dependência do índice da obstrução causada pelo emissor no tubo e pelo Número de Reynolds.

Estudar a perda de carga e seus componentes (perda de carga distribuída e perda de carga localizada) em uma linha lateral de irrigação é muito importante, pois auxilia projetistas na área de irrigação localizada a efetuar cálculos e projetos cada vez mais precisos e eficientes e . A carência de dados experimentais, por exemplo, contribui para motivar futuros estudos no sentido de subsidiar os projetistas que necessitam de coeficientes que na maioria dos casos não estão disponíveis pelos fabricantes.

6. Referências

ABDRABOU, F. A. et al. Hydraulic performance analysis of subsurface drip irrigation for turf grass within different types of driplines. **Al-Azhar Journal of Agricultural Engineering**, v. 4, n. 1, p. 21-29, 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. Brasília: ANA, 2021a. 7p.

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.

ALVES, P. R. V; PORTO, R. M. Coeficiente geométrico para estimativa de perda de carga localizada em linhas laterais de irrigação por gotejamento. **Engenharia Agrícola**, v. 22, n. 1, p. 43-50, 2002.

ANDRADE, L.A de et al. Efeito da variação de vazão permitida e da perda de carga localizada no comprimento máxima de fita gotejadora não compensada. **Revista Ambiente & Água**, v. 16, n. 2, 2021.

ARUMUGAM, A. et al. Comparative Analysis and Validation of Selected Explicit Equation Models for Determination of Darcy Friction Factor to Estimate Major Head Loss for a Pressurized Flow System. **Science & Technology Asia**, p. 216-235, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 9261: Equipamentos de irrigação agrícola. Emissores e tubos emissores. Especificação e métodos de ensaio**. São Paulo, 2006. 17p.

ASKER, M. et al. A review of non iterative friction factor correlations for the calculation of pressure drop in pipes. **Bitlis Eren University Journal of Science and Technology**, v. 4, n. 1, p. 1-8, 2014.

AVCI, A; KARAGOZ, I. A novel explicit equation for friction factor in smooth and rough pipes. **Journal of Fluids Engineering**, v. 131, n. 6, 2009.

AZEVEDO NETTO, J. M. de; FERNANDEZ, M.F. y. **Manual de hidráulica**. 9. ed. São Paulo: Edgar Blücher, 2015. 632 p.

AZEVEDO, L. P; SAAD, J. C. C. Uso de dois espaçamentos entre gotejadores na mesma linha lateral e seus efeitos sobre a formação do bulbo molhado no solo e parâmetros físicos de rabanete. **Brazilian Journal of Irrigation and Drainage - IRRIGA**, Botucatu, v. 17, n. 2, p. 148 - 167, junho, 2012.

BAGARELLO, V. et al. 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.

BAGARELLO, V. et al. Evaluating Pressure Losses in Drip-Irrigation Lines. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 123, n. 1, p. 1–7, 1997.

BAIAMONTE, G. Advances in designing drip irrigation laterals. **Agricultural Water Management**, v. 199, p. 157-174, 2018.

BARROS, A. C. et al. Projetos de Irrigação por Aspersão. **Arapiraca**: 2018. v. 1. 146p.

BAHRANI, S. A; NOUAR, C. Intermittency in the transition to turbulence for a shear-thinning fluid in Hagen-Poiseuille flow. **Journal of Applied Fluid Mechanics**, v. 7, n. 1, p. 1-6, 2014.

BERNUTH, R. D. von. Simple and Accurate Friction Loss Equation for Plastic Pipe. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 116, n. 2, p. 294–298, 1990.

BIBERG, D. Fast and accurate approximations for the Colebrook equation. **Journal of Fluids Engineering**, v. 139, n. 3, 2017.

BLASIUS, Heinrich. Das aehnlichkeitsgesetz bei reibungsvorgängen in flüssigkeiten. **Springer Berlin Heidelberg**, 1913.

BRKIĆ, D. Can pipes be actually really that smooth? **International Journal of Refrigeration** v. 35, p.209–215, 2011.

BRKIĆ, D. New explicit correlations for turbulent flow friction factor. **Nuclear Engineering and Design**, v. 241, p.4055-4059, 2011a.

BRKIĆ, D.; ČOJBAŠIĆ, Ž. Intelligent flow friction estimation. **Computational Intelligence and Neuroscience**, v. 216, p.1-10, 2016.

BRKIĆ, D; PRAKS, P. Accurate and efficient explicit approximations of the Colebrook flow friction equation based on the Wright ω -function. **Mathematics**, v. 7, n. 1, p. 34, 2019.

BROWN, G. O. The history of the Darcy-Weisbach equation for pipe flow resistance. In: **Environmental and water resources history**. 2003. p. 34-43.

BOTREL, T.A; MARQUES, P.A.A. Software para dimensionamento de irrigação por sulcos. **Scientia Agricola**, v. 57, p. 803-811, 2000.

BUZZELLI, D. Calculating friction in one step. **Machine Design**, v. 80, p.54-55, 2008.

CAMARGO, A. P. de; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89–97, 1997.

CARDOSO, G. G. de G. et al. Fator de atrito em tubos de polietileno de pequenos diâmetros. **Acta Scientiarum - Agronomy**, v. 30, n. 3, p. 299–305, 2008.

CARDOSO, G.G; FRIZZONE, J.A. Perda de carga localizada em conexão de emissor on-line. **Irriga**, v. 19, n. 4, p. 537-547, 2014.

CARDOSO, G. G. de G.; KLAR, A. E. Índice geométrico e perda de carga localizada em conexões de emissores “online”. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 6, p. 1114–1127, 2014.

CARRIJO, O. A., DE SOUZA, R. B., MAROUELLI, W. A. & ANDRADE, R. J. Fertirrigação de hortaliças. **Embrapa Hortaliças-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, 2004.

CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkling**. Berkely: Universit of California, 1942.124p.

CLAMOND, Didier. Efficient resolution of the Colebrook equation. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 48, n. 7, p. 3665-3671, 2009.

COELHO, R.D. **Contribuições para a irrigação pressurizada no Brasil**. 2007. 192 p. Livre Docência – Departamento de Engenharia Rural, Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

COLEBROOK, C. F.; WHITE, C. M. Experiments with fluid friction in roughened pipes. **Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v.161, p.367- 381, 1937.

DARCY, H. **Recherches expérimentales relatives au mouvement de l'eau dans les tuyaux**. Paris: Mallet-Bachelier, 1857, 268 p.

DALRI, A. B. et al. Caracterização técnica e desempenho hidráulico de quatro gotejadores autocompensantes utilizados no Brasil. **Ciência Rural**, v.45, n. 8, p.1439-1444, 2015.

DE SOUSA, J.S.C; NETO, J.D. Equação explícita para cálculo do fator de atrito de Darcy-Weisbach em projetos de irrigação pressurizada1. **Irriga**, v. 19, n. 1, p. 137-148, 2014.

EASA, S. M.; LAMRI, A. A.; BRKIĆ, Dejan. Reliability-based criterion for evaluating explicit approximations of Colebrook equation. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 10, n. 6, p. 803, 2022.

FARIA, M. A. de. **Irrigação por gotejamento e microaspersão**. Lavras: UFLA / FAEPE, 2000.

FLORES, J.H.N. **Modelagem matemática da perda de carga em emissores integrados a tubulação de irrigação localizada**. 2017. 93 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2017. Disponível em: <<http://guaiaca.ufpel.edu.br/handle/prefix/3691>>.

FLORES, J.H.N. et al. Methodology for determining the emitter local head loss in drip irrigation systems. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 147, n. 1, p. 06020014, 2021.

FRIZZONE, J.A. et al. **Microirrigação - Gotejamento e Microaspersão**. 1. ed. Maringá: Eduem - Editora da Universidade Estadual de Maringá, 2012. 356 p.

GOMES, A. W. A. et al. Perda de carga localizada em gotejadores integrados em tubos de polietileno. **Engenharia Agrícola**, v. 30, p. 435–446, 2010.

GOUDAR, C. T.; SONNAD, J. R. Comparison of the iterative approximations of the Colebrook-White equation: Here's a review of other formulas and a mathematically exact formulation that is valid over the entire range of Re values: Fluid Flow and Rotating Equipment. **Hydrocarbon processing (International ed.)**, v. 87, n. 8, 2008.

JARDIM, A.M.R.F. et al. Modelling the Darcy–Weisbach friction factor and the energy gradient of the lateral line. **Irrigation and Drainage**, v. 71, n. 2, p. 320-332, 2022.

HEERMANN, D. F.; DUKE, H. R.; SERAFIM, A. M.; DAWSON, L. J. Distribution functions to represent center-pivot water distribution. **Transactions of American Society of Agricultural Engineers**. v.32, n.5, p.1465-1472, 1992.

JAIN, A. K. Accurate explicit equation for friction factor. **Journal of the Hydraulics Division**, v.102, p.674-677, 1976.

KELL, G. S. Density, thermal expansivity, and compressibility of liquid water from 0° to 150°. Correlations and tables for atmospheric pressure and saturation reviewed and expressed on 1968 temperature scale. **Journal of Chemical and Engineering data**, v. 20, n. 1, p. 97-105, 1975.

KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle Irrigation Design Parameters. **American Society of Agricultural Engineers**, v. 17, n. 4, p. 678–684, 1974.

KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle irrigation design. **Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corporation**, 1975.133p

KIIJARVI, Jukka. Darcy friction factor formulae in turbulent pipe flow. **Lunowa Fluid Mechanics Paper**, v. 110727, n. 2011, p. 1-11, 2011.

LAMRI, A. A.; EASA, S. M. Computationally efficient and accurate solution for Colebrook equation based on Lagrange theorem. **Journal of Fluids Engineering**, v. 144, n. 1, 2022.

LI, P., SEEM, J. E. & Li, Y. A new explicit equation for accurate friction factor calculation of smooth pipes. **International Journal of Refrigeration** v. 34 (6), 1535–1541, 2011.

LIYOU, C. P. Limitations and Proper Use of the Hazen-Williams Equation. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 124, n. 9, p. 951–954, 1998.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. 2. ed., atual. e ampl. Viçosa, MG: UFV, 2009. 355 p.

MARTINEZ, C. G. et al. Hydraulic Performance Evaluation of Low-Cost Gravity-Fed Drip Irrigation Systems Under Constant Head Conditions. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2022. p. 012005.

MIKATA, Y; WALCZAK, W. S. Exact analytical solutions of the Colebrook-White equation. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 142, n. 2, p. 04015050, 2016.

MOODY, L. F. Friction factors for pipe flow. **Transactions of the American Society of mechanical engineers**, v. 66, n. 8, p. 671-678, 1944.

MOODY, L. F. An approximate formula for pipe friction factors. **Transactions of the American Society of mechanical engineers**, v.69, p.1005-1011, 1947.

MORRISON, F. A. Data correlation for friction factor in smooth pipes. **Department of Chemical Engineering, Michigan Technological University, Houghton, MI**, v. 49931, 2013.

NETO, J. L. et al. Perda de carga em mangueiras gotejadoras novas e usadas. **Irriga**, v. 16, n. 3, p. 329–338, 2011

OLIVARES, A. et al. Experimental evaluation of correlations used to calculate friction factor for turbulent flow in cylindrical pipes. **Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería** v.35 (1), 15, 2019.

PORTO, Rodrigo de Melo. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Carlos - SP: EESC-USP, 2008. 540 p.

PRAKS, P; BRKIC, D. Review of new flow friction equations: Constructing Colebrook explicit correlations accurately. **Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería** v.36 (3), 41, 2020.

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.

PROVENZANO, G. et al. Simplified Procedure to Evaluate Head Losses in Drip Irrigation Laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 131, n. 6, p. 525–532, 2005.

PROVENZANO, G. et al. Soil and irrigation sustainability practices. **Agricultural Water Management**, v. 120, p. 1–4, 2013.

QUEIROZ, Tadeu M. de; BOTREL, Tarlei A.; FRIZZONE, José A. Desenvolvimento de software e hardware para irrigação de precisão usando pivô central. **Engenharia Agrícola**, v. 28, p. 44-54, 2008.

RAVINA, I. P. et al. Control of emitter clogging in drip irrigation with reclaimed wastewater. **Irrigation Science**, v. 13(3), 129-139, 1992.

RETTORE NETO, O. et al. Perda de carga localizada em emissores não coaxiais integrados a tubos de polietileno. **Engenharia Agrícola**, v. 29, n. 1, p. 28–39, 2009b.

SHAIKH, M.M. et al. A sixteen decimal places accurate Darcy friction factor database using non-linear Colebrook's equation with a million nodes: A way forward to the soft computing techniques. **Data in brief**, v. 27, p. 104733, 2019.

SHARU, E. H.; RAZAK, M. S. Hydraulic performance and modelling of pressurized drip irrigation system. **Water**, v. 12, n. 8, p. 2295, 2020

SERGHIDES, T.K. Estimate friction factor accurately. **Chemical Engineering**, v. 91, p.63-64, 1984.

SEYEDZADEH, Amin et al. Artificial intelligence approach to estimate discharge of drip tape irrigation based on temperature and pressure. **Agricultural Water Management**, v. 228, p. 105905, 2020.

SÍCOLI, C. E. S. et al. Optimal design of drip irrigation submains: pressure-compensating emitters. **Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo**, v. 51, n. 2, p. 154-166. 2019

SOBENKO, L.R. et al. Indicators for evaluation of model performance: irrigation hydraulics applications. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 45, 2022.

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

SOUSA, V. F. de; MAROUELLI, W. A.; COELHO, E. F.; PINTO, J. M.; COELHO FILHO, M. A. Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças. **Embrapa: Informação Tecnológica**, Brasília, 2011, 771p.

SOUZA, I.H. et al. Avaliação hidráulica de um sistema de irrigação localizada de baixa pressão, projetado pelo software " bubbler". **Engenharia Agrícola**, v. 25, p. 264-271, 2005.

SWAMEE, P. K.; Jain, A. K. Explicit equations for pipe flow problems. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 102, p.657-664, 1976.

TAYLOR, Karl E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. **Journal of geophysical research: atmospheres**, v. 106, n. D7, p. 7183-7192, 2001.

VALIANTZAS, J. D. Analytical approach for direct drip lateral hydraulic calculation. **J. Irrig. Drain. Eng.**, v. 124(6), 300–305, 1998.

VALLESQUINO, P., and Luque-Escamilla, P. L. New algorithm for hydraulic calculation in irrigation laterals. **J. Irrig. Drain. Eng.**, v. 127(4), 254–260, 2001.

VATANKHAH A, R. Approximate analytical solutions for the colebrook equation. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 144(5), 2018.

VILAÇA, Francisco Nogueira et al. Minor losses in start connectors of microirrigation laterals. **Irrigation Science**, v. 35, p. 227-240, 2017.

WANG, J; CHEN, R. An improved finite element model for the hydraulic analysis of drip irrigation subunits considering local emitter head loss. *Irrigation Science*, v. 38, n. 2, p. 147-162, 2020.

WANG, J. et al. Experimental determination of local head loss of non-coaxial emitters in thin-wall lay-flat polyethylene pipes. **Biosystems Engineering**, v. 190, p. 71-86, 2020.

WARRICK, A. W.; YITAYEW, Muluneh. Trickle lateral hydraulics. I: Analytical solution. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 114, (2), p. 281-288, 1988.

WEISBACH, J. **Principles of the mechanics of machinery and engineering**. First American Edition by Walter R. Johnson. Philadelphia: Lea and Blanchard. 1849

WEAST, R. C. et al. CRC: Handbook of Chemistry and Physics. 1989.

WILLMOTT, C. J.; CKLESON, S. G.; R. E. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**. Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

WOOD, D. J. An explicit friction factor relationship. **Civil Engineering**, v. 36, p.60-61, 1966

WU, I.-Pai; GITLIN, Harris M. Drip irrigation design based on uniformity. **Trans. ASAE Gen Ed Am Society Agricolal Engineering**, 1974.

WU, I-Pai. Energy gradient line approach for direct hydraulic calculation in drip irrigation design. **Irrigation Science**. V. 13(1), 21-29. 1992

YITAYEW, M. Head loss in manifolds or trickle lateral: Simplified approach. **Journal of irrigation and drainage engineering**, v. 115, (4), 739-743, 1989.

YITAYEW, M. Simplified method for sizing laterals with two or more diameters. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.135, n.1, p.111-114, 2009.

ZAYANI, K., A. et al. Design of drip irrigation systems using the energy drop ratio approach. **Trans. ASAE**, v. 44(5), 1127–1133, 2001.

ZERIHUN, D.; SANCHEZ, C. A. Irrigation Lateral Hydraulics with the Gradient Method. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 143, n. 8, p. 04017023, 2017.

ZEYU, Zhang et al. Approximations of the Darcy–Weisbach friction factor in a vertical pipe with full flow regime. **Water Supply**, v. 20, n. 4, p. 1321-1333, 2020.

ZITTERELL, D. B et al. Dimensional analysis approach to estimate local head losses in microirrigation connectors. **Irrigation Science**, v. 32, p. 169-179, 2014.

ZHOU, B. et al. Effects of microbial community variation on bio-clogging in drip irrigation emitters using reclaimed water. **Agricultural Water Management**, v. 194, p. 139-149, 2017.