

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

Juciano Gabriel da Silva

**ANÁLISE DE COEFICIENTES EM FÓRMULAS EMPÍRICAS DE  
PERDA DE CARGA CONTÍNUA EM TUBOS DE PVC**

Santa Maria, RS  
2021

Juciano Gabriel da Silva

**ANÁLISE DE COEFICIENTES EM FÓRMULAS EMPÍRICAS DE  
PERDA DE CARGA CONTÍNUA EM TUBOS DE PVC**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Agrícola**.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Marcia Xavier Peiter

Santa Maria, RS  
2021

da Silva, Juciano Gabriel  
Análise de coeficientes em fórmulas empíricas de perda  
de carga contínua em tubos de PVC / Juciano Gabriel da  
Silva.- 2021.  
66 p.; 30 cm

Orientadora: Marcia Xavier Peiter  
Coorientador: Adroaldo Dias Robaina  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós  
Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2021

1. Darcy-Weisbach 2. Hazen-Williams 3. Rugosidade  
absoluta 4. Coeficiente de atrito I. Xavier Peiter,  
Marcia II. Dias Robaina, Adroaldo III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(s). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

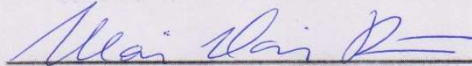
Declaro, JUCIANO GABRIEL DA SILVA, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Juciano Gabriel da Silva

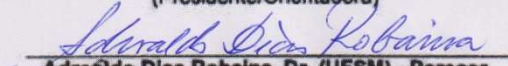
**ANÁLISE DE COEFICIENTES EM FÓRMULAS EMPÍRICAS DE  
PERDA DE CARGA CONTÍNUA EM TUBOS DE PVC**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

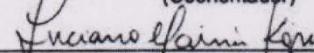
Aprovado em 03 de dezembro de 2021:



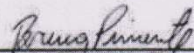
Marcia Xavier Peiter, Dra. (UFSM) - Parecer  
(Presidente/Orientadora)



Adroaldo Dias Robaina, Dr. (UFSM) - Parecer  
(Coorientador)



Luciana Marini Kopp, Dra. (UFPeI) - Parecer



Bruna Dalcin Pimenta, Dra. (IFRS – Campus Ibirubá) - Parecer

Santa Maria, RS  
2021

## DEDICATÓRIA

*A todos da minha família. Em especial aos meus pais.*

## AGRADECIMENTOS

*Agradeço primeiramente a Deus por me conceder o dom da vida, minha família e sua proteção. Agradeço por me provar sua existência, e me confortar nos momentos difíceis. Agradeço por me mostrar novos caminhos para seguir em frente quando tudo pareceu estar perdido.*

*A toda minha família por me educarem da melhor maneira possível, por sempre estarem do meu lado, em especial aos meus pais, José Dirceu da Silva e Geraldina da Silva, meus irmãos João Carlos da Silva, Carmen Jossele da Silva e Cassiano José da Silva, por estarem comigo em todos os momentos, sempre incentivando para estudar e torcendo para que tudo sempre desse certo. Esta conquista também é de vocês.*

*Aos amigos conquistados no período do curso, pelo convívio, amizade e apoio recebido, que de igual forma foram fundamentais para conseguir chegar até aqui. Em especial aos meus colegas e amigos do laboratório de Engenharia de Irrigação.*

*Aos integrantes do Laboratório de Biomateriais Dentários (UFSM), em especial ao Prof.<sup>a</sup> Dr Luiz Felipe Valandro e ao Cirurgião-Dentista Renan Vaz Machry, por possibilitar o uso do rugosímetro de bancada e pelo apoio durante a realização das análises.*

*À Prof.<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Marcia Xavier Peiter, orientadora acadêmica, pelos conhecimentos passados, apoio profissional e pessoal e exemplo de profissionalismo.*

*Ao Prof.<sup>a</sup> Dr. Adroaldo Dias Robaina e a Prof.<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Luciana Marini Kopp, coorientadores acadêmicos, pelo convívio, amizade, apoio, paciência e pela experiência transmitida.*

*Enfim, a todos que estiveram presentes durante este período tão importante para a minha formação, e que de alguma forma fazem parte desta conquista, muito obrigado.*

*Todo mundo aplica fórmulas hidráulicas,  
mas poucos ouvem a resposta.  
(Alfred – Aimé Flamant)*

## RESUMO

# ANÁLISE DE COEFICIENTES EM FÓRMULAS EMPÍRICAS DE PERDA DE CARGA CONTÍNUA EM TUBOS DE PVC

AUTOR: Juciano Gabriel da Silva  
ORIENTADORA: Marcia Xavier Peiter

A perda de carga contínua no sistema de irrigação pressurizado é um fator de extrema importância e que deve ser levado em consideração no momento do dimensionamento hidráulico. Para que sua estimativa seja realizada corretamente, necessita-se de informações precisas sobre o sistema, e a escolha de equações adequadas pelo projetista. Portanto, o presente trabalho tem os objetivos de: comparar estimativas da perda de carga pela equação de Darcy-Weisbach com a rugosidade obtida pelo parâmetro  $R_a$  do perfil de rugosidade, com a perda de carga determinada em manômetro de mercúrio tipo coluna em "U"; desenvolver equações que estimem os coeficientes de perda de carga das equações de Hazen-Williams (coeficiente  $C$ ), Scobey (coeficiente  $K_s$ ), Flamant (coeficiente  $b$ ) e Manning (coeficiente  $n$ ). Para tal, foram realizadas medições do parâmetro  $R_a$  do perfil de rugosidade com o auxílio do rugosímetro de bancada da marca Mitutoyo, modelo SJ-410, em tubos de PVC, no sentido transversal e longitudinal ao fluxo. Para analisar o desempenho no uso do parâmetro  $R_a$  do perfil de rugosidade na determinação da perda de carga distribuída e a precisão dos resultados obtidos pelas fórmulas empíricas, os resultados foram submetidos a avaliações estatísticas de índices de concordância "d", coeficiente de correlação "r" e desempenho "c", além da estimativa do erro percentual. Os resultados estimados pelas equações empíricas com os coeficientes obtidos neste estudo, reduziu o erro percentual na determinação da perda de carga quanto comparada ao uso de um coeficiente fixo para o mesmo material de fabricação das tubulações, além de apresentar excelente correlação com resultados estimados pela equação de Darcy-Weisbach. Os valores de rugosidade obtidos a partir do parâmetro  $R_a$  do perfil de rugosidade, apresentou-se boa correlação com a perda de carga medida em laboratório e seus resultados variaram de 0,77 a 3,59  $\mu\text{m}$  nos tubos de PVC com diâmetros nominais de 32, 40, 50 e 75.

**Palavras-chave:** Darcy-Weisbach; Hazen-Williams; Flamant; rugosidade absoluta; coeficiente de atrito.



## ABSTRACT

### ANALYSIS OF COEFFICIENTS IN EMPIRICAL FORMULAS FOR CONTINUOUS LOAD LOSS IN PVC PIPES

AUTHOR: Juciano Gabriel da Silva

ADVISOR: Marcia Xavier Peiter

The continuous pressure drop in the pressurized irrigation system is an extremely important factor that must be taken into account when designing hydraulics. For your estimation to be performed correctly, you need precise information about the system, and the choice of suitable equations by the designer. Therefore, the present work has the objectives of: comparing estimates of the head loss by the Darcy-Weisbach equation with the roughness obtained by the Ra parameter of the roughness profile, with the head loss determined in a U-shaped column mercury manometer; develop equations that estimate the head loss coefficients of the Hazen-Williams equations (coefficient C), Scobey (coefficient Ks), Flamant (coefficient b) and Manning (coefficient n). For this purpose, measurements of the Ra parameter of the roughness profile were carried out with the aid of a bench rugosimeter, brand Mitutoyo, model SJ-410, in PVC tubes, in the transverse and longitudinal direction of the flow. To analyze the performance in the use of the Ra parameter of the roughness profile in determining the distributed head loss and the accuracy of the results obtained by the empirical formulas, the results were submitted to statistical evaluations of agreement indices "d", correlation coefficient "r" and performance "c", in addition to the estimate of the percentage error. The results estimated by the empirical equations with the coefficients obtained in this study, reduced the percentage error in the determination of head loss when compared to the use of a fixed coefficient for the same manufacturing material of the pipes, in addition to presenting an excellent correlation with results estimated by the equation by Darcy-Weisbach. The roughness values obtained from the Ra parameter of the roughness profile, showed a good correlation with the pressure drop measured in the laboratory and its results ranged from 0.77 to 3.59  $\mu\text{m}$  in PVC tubes with nominal diameters of 32, 40, 50 and 75.

**Keywords:** Darcy-Weisbach; Hazen-Williams; Flamant; absolute roughness; Coefficient of friction.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Representação dos desvios no perfil de uma superfície real.....	17
Figura 2 - Representação dos perfis primário, de ondulação e de rugosidade obtido após a leitura do instrumento por contato .....	18
Figura 3 - Representação dos picos e vales no perfil de rugosidade.....	18
Figura 4 - Conjunto motobomba e peças especiais presentes no sistema de bombeamento de circuito fechado. ....	27
Figura 5 - Representação da tomada de pressão inserida nos tubos, para o ensaio da perda de carga. ....	29
Figura 6 - Medidor de pressão diferencial com coluna de mercúrio.....	30
Figura 7 - Procedimento de medição com paquímetro, do diâmetro interno e espessura da parede nos tubos utilizados no ensaio de perda de carga. ....	30
Figura 8 - Rugosímetro de bancada utilizado para a avaliação do parâmetro Ra do perfil de rugosidade.....	32
Figura 9 - Perda de carga contínua em função da vazão medida em laboratório com o manômetro diferencial de mercúrio, para os tubos da linha Agropecuário nos diâmetros nominais (DN) de a) 32 mm e b) 40 mm.....	37
Figura 10 - Perda de carga contínua em função da vazão medida com o manômetro diferencial de mercúrio, para os tubos da linha Irrigação de sistemas fixos (FIXA) com diâmetro nominal (DN) de 50mm com pressões nominais (PN) de a) 80m c a, c) 40 m c a. ....	38
Figura 11 - Perda de carga observada versus estimada pela equação de Darcy-Weisbach, com a rugosidade avaliada em sentido longitudinal e transversal ao fluxo nos tubos da linha Agropecuário.....	40
Figura 12 - Perda de carga observada versus estimada pela equação de Darcy-Weisbach utilizando dados de rugosidade relativa avaliadas no sentido transversal e longitudinal, em diferentes tubos da linha Irrigação com diâmetro nominal de 50mm. ....	42
Figura 13 - Perda de carga observada versus estimada pela equação de Darcy-Weisbach utilizando dados de rugosidade relativa avaliadas no sentido longitudinal e transversal nos tubos da linha Irrigação com diâmetro nominal de 75mm.....	43
Figura 14 - Frequência acumulada do erro percentual entre a perda de carga observada com a perda de carga estimada pela equação de Darcy-Weisbach utilizando dados de rugosidade relativa medidas em sentido longitudinal ao fluxo...	44
Figura 15 - Coeficiente C estimado, para o cálculo da perda de carga pela equação de Hazen-Williams em diferentes velocidades de fluxo e diâmetros dos tubos de PVC. ....	45
Figura 16 - Perda de carga calculada pela equação de Darcy-Weisbach versus a perda de carga calculada pela equação de Hazen-Williams com o coeficiente C fixado em a) 150 e b) estimado.....	46
Figura 17 - Erro percentual da perda de carga calculada pela equação de Hazen-Williams usando o coeficiente C com valor de 150 e estimado pela equação 15. ....	47
Figura 18 - Coeficiente Ks da equação de Scobey estimado para diferentes velocidades de fluxo e diâmetros dos tubos de PVC. ....	48
Figura 19 - Perda de carga calculada pela equação de Darcy-Weisbach, versus a perda de carga calculada pela equação de Scobey com o coeficiente Ks fixo em 0,32 (a) e estimado (b). ....	49
Figura 20 - Erro percentual da perda de carga calculada pela equação de Scobey usando o coeficiente Ks com valor de 0,32 e estimado pela equação 18. ....	50

Figura 21 - Coeficiente b da equação de Flamant em diferentes velocidades de fluxo e diâmetros nos tubos de PVC.....	51
Figura 22 - Perda de carga calculada pela equação de Darcy-Weisbach, versus a perda de carga calculada pela equação de Flamant com o coeficiente b fixo em 0,000127 (a) e estimado pela Equação 21(b). ....	52
Figura 23 - Erro percentual da perda de carga calculada pela equação de Flamant com o coeficiente b igual a 0,000127 e estimado pela equação proposta neste trabalho. ....	53
Figura 24 - Coeficiente n da equação de Manning em diferentes velocidades de fluxo e diâmetros dos tubos de PVC.....	54
Figura 25 - Perda de carga calculada pela equação de Darcy-Weisbach, versus a perda de carga calculada pela equação de Manning com o coeficiente n fixado em 0,008 (a) e estimado (b). ....	55
Figura 26 - Erro percentual da perda de carga calculada pela equação de Manning usando o coeficiente n com valor de 0,008 e estimado pela equação 24. ....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição dos tubos utilizados nos ensaios de perda de carga e avaliação da rugosidade absoluta.....	28
Tabela 2 - Comprimento (L) útil entre dois pontos ao longo do tubo, diâmetro interno médio ( $D_i$ ) com seu respectivo desvio padrão ( $\sigma$ ) teste de normalidade para cada tubulação utilizada no estudo.....	31
Tabela 3 - Rugosidade média e desvio padrão das amostras analisadas em sentido transversal e longitudinal ao fluxo, com o respectivo resultado do P-valor. ....	39

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	16
2.1	RUGOSIDADE ABSOLUTA .....	16
2.2	NÚMERO DE REYNOLDS .....	19
2.3	PERDA DE CARGA .....	20
2.4	EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE CARGA .....	21
2.5	FÓRMULAS EMPÍRICAS .....	22
<b>2.5.1</b>	<b>Fórmula de Hazen-Williams</b> .....	23
<b>2.5.2</b>	<b>Fórmula de Scobey</b> .....	24
<b>2.5.3</b>	<b>Fórmula de Flamant</b> .....	24
<b>2.5.4</b>	<b>Fórmula de Manning</b> .....	25
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	27
3.1	MEDIÇÃO DA PERDA DE CARGA EM LABORATÓRIO .....	27
<b>3.1.1</b>	<b>Ensaio da perda de carga contínua em laboratório</b> .....	28
<b>3.1.2</b>	<b>Rugosidade absoluta</b> .....	31
3.2	AJUSTE DOS COEFICIENTES DE PERDA DE CARGA DAS EQUAÇÕES EMPÍRICAS. ....	32
<b>3.2.1</b>	<b>Cálculo do coeficiente C da equação de Hazen-Williams</b> .....	32
<b>3.2.2</b>	<b>Cálculo do coeficiente Ks da equação de Scobey</b> .....	33
<b>3.2.3</b>	<b>Cálculo do coeficiente b da equação de Flamant</b> .....	34
<b>3.2.4</b>	<b>Cálculo do coeficiente n da equação de Manning</b> .....	34
3.3	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	35
<b>3.3.1</b>	<b>Parâmetro Ra do Perfil de Rugosidade</b> .....	35
<b>3.3.2</b>	<b>Fórmula para o cálculo do coeficiente das equações empíricas.</b> .....	36
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	37
4.1	AJUSTE DA EQUAÇÕES DE PERDA DE CARGA .....	37
4.2	MÉDIAS DO PARÂMETRO Ra DO PERFIL DE RUGOSIDADE .....	39
4.3	COEFICIENTES DAS EQUAÇÕES EMPÍRICAS CALCULADOS PELAS SUAS RESPECTIVAS FÓRMULAS. ....	45
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	58
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	59

## 1 INTRODUÇÃO

O dimensionamento de sistemas de irrigação, quando realizado corretamente, é fundamental para obter o seu melhor aproveitamento. Para isso, necessita-se de informações precisas sobre o sistema e a escolha das equações adequadas pelo projetista. Projetos de irrigação mal dimensionados podem levar a uma baixa eficiência na aplicação, uso ineficiente da água (NASCIMENTO et al., 2017; PARLIN; LUSK, 2008) e o desempenho insatisfatório da tecnologia da irrigação. Logo, o conhecimento das características hidráulicas é essencial para um dimensionamento correto (SANTANA et al., 2020), bem como, o entendimento dos processos físicos que ocorrem desde o conjunto motobomba até o final do sistema de irrigação (MIRANDA et al., 2019).

Um dos componentes importantes na elaboração de projetos hidráulicos é a determinação da perda de carga (SOUZA, 2014). Quantificar a perda de carga é fundamental no dimensionamento das tubulações (MIRANDA et al., 2019) pois altera a altura manométrica total, a vazão do sistema de bombeamento, a pressão de serviço em sistemas de irrigação (PINTO et al., 2016) e o rendimento do sistema em funcionamento (MESQUITA et al., 2012). Para quantificar este fenômeno existem diversas equações indicadas para seu cálculo em condutos forçados (SOUZA, 2018). Estas equações são embasadas em características das tubulações e de projeto, tais como, material do tubo, diâmetro e vazão do sistema (COELHO et al., 2018).

Entre as equações de perda de carga utilizadas em projetos hidráulicos destaca-se equação de Darcy-Weisbach (1857), também chamada de fórmula Universal, pois é considerada a fórmula matemática mais completa e bem aceita para determinar este fenômeno físico. A mesma, apresenta um coeficiente de perda de carga que leva em consideração o regime de escoamento do fluido e as características de rugosidade e diâmetro interno das tubulações. Outra forma de calcular a perda de carga é através das equações empíricas, as quais são consideradas mais simples pois são restritas a limites experimentais, seja em relação ao material, à velocidade do fluido ou ao diâmetro da tubulação. Além do mais, cada equação empírica apresenta um coeficiente de perda de carga que varia de acordo o material do tubo.

Os tubos produzidos com material de Policloreto de Vinila (PVC) apresentam coloração branca (utilizados para esgoto), azul (utilizados para irrigação) e marrom quando utilizados para água fria (PIMENTA et al., 2018). As tubulações para uso na irrigação, são classificadas em linha Agropecuária (NBR 14654, ABNT), linha Irrigação para sistemas móveis (NBR 15282, ABNT) e linha Irrigação para sistemas permanentes (NBR 14311 e 14312 da ABNT). Os critérios específicos para a fabricação em cada linha do produto são estabelecidos em norma da ABNT.

Por sofrerem mudanças em sua fabricação ao longo do tempo, os tubos de PVC apresentam variação na rugosidade em tubulações com mesmo material. Portanto, o uso de equações para estimar a perda de energia podem trazer erros no dimensionamento de projetos hidráulicos quando utilizadas com coeficientes inadequados (ALAZBA et al., 2012). Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo avaliar a rugosidade relativa em tubos de PVC da linha Irrigação e Agropecuário, e fornecer coeficientes atualizados para as equações empíricas de perda de carga.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como objetivo a revisão dos principais temas que embasam este trabalho. Desta forma, serão descritos os aspectos gerais sobre a rugosidade absoluta, número de Reynolds, perda de carga e as respectivas equações para sua determinação.

### 2.1 RUGOSIDADE ABSOLUTA

As paredes internas dos tubos raramente são perfeitamente lisas, ou seja, existe a presença de irregularidades denominadas de rugosidade (MARSÍC-PALOKA, PAZANIN, 2020). O grau de rugosidade das superfícies está associado as características do material (OLIVEIRA et al., 2010) e varia de acordo com o envelhecimento dos tubos (KELLNER; AKUTSU; REIS, 2016), a tecnologia empregada no processo de fabricação (MARSÍC-PALOKA; PAZANIN, 2020), acabamento de superfícies (GHUMATKAR et al., 2016; JERIN; KARUNAKARAN, 2021) e o tipo de material do tubo (BEZZERA et al., 2017). Entretanto a rugosidade pode ser um efeito da produção de uma superfície onde um nível mais alto de acabamento seria antieconômico (BUSSE et al., 2015) ou consequentemente aumentaria o custo do produto final.

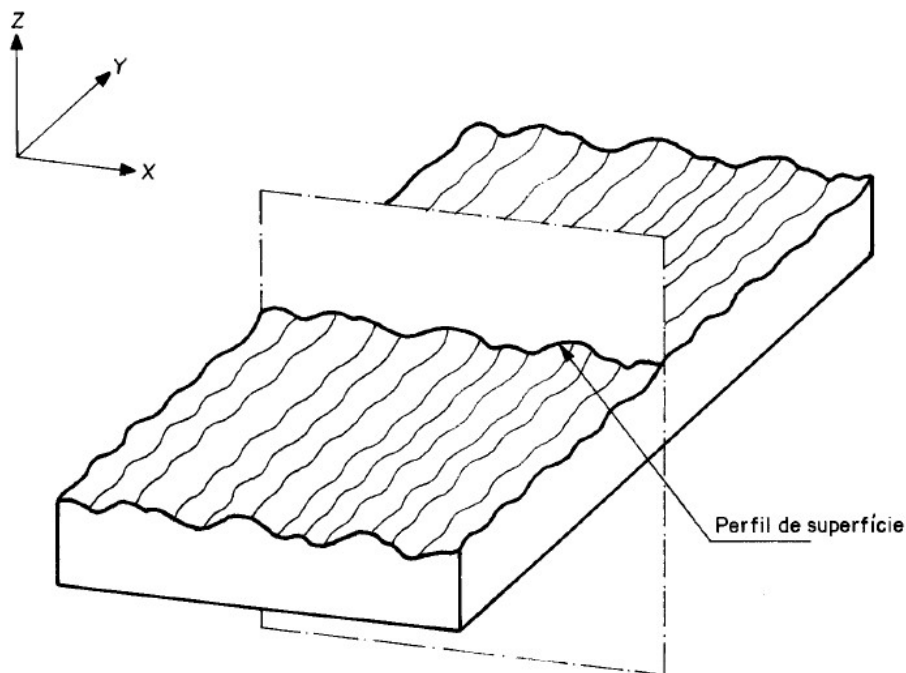
As superfícies rugosas apresentam diferentes formas em sistemas nas áreas das engenharias (GHUMATKAR et al., 2016). Entre elas, nos sistemas hidráulicos (ROCHA et al., 2017), em que a configuração e o tamanho da aspereza na parede das tubulações influenciam completamente as propriedades de fluxo da água (JIMÉNEZ, 2004), podendo afetar significativamente os mecanismos de distribuição de água, causando perdas de pressões internas, perda da capacidade de transporte de fluidos e vazamentos (VASCONSELOS; COSTA; ARAÚJO, 2015)

A rugosidade é uma das características de maior incerteza em tubulações e de difícil medição a campo (KUN et al., 2015). No entanto, para aplicações em tubulações pressurizadas, os seus valores podem ser embasados nas experiências de Johann Nikuradse (NIKURADSE, 1933). Entretanto, estes dados foram obtidos há muito tempo e podem não representar de forma precisa a rugosidade de tubos comerciais atualmente (PIMENTA, 2017).



Outra forma de quantificar a rugosidade na parede interna das tubulações, é por meio de um instrumento por contato. Este instrumento de medição, toca a superfície com uma ponta de apalpação e detecta desvios na forma do perfil da superfície real (NBR ISO 3274, ABNT). O perfil desta superfície (Figura 1), é resultado da intersecção da superfície real e um plano específico.

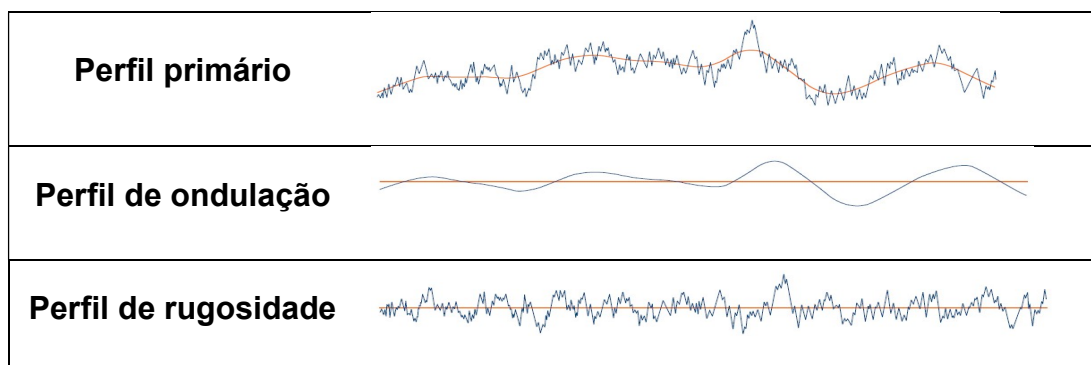
Figura 1- Representação dos desvios no perfil de uma superfície real.



Fonte: ABNT (2002)

O instrumento por contato obtém um perfil total digitalizado a partir das coordenadas horizontais e verticais relativas ao perfil de referência, que ao ser submetido ao filtro de ondas curtas,  $\lambda_s$ , gera o perfil primário. O perfil de rugosidade é derivado do perfil primário com a eliminação dos componentes de ondas longas com filtro de perfil ( $\lambda_c$ ). Este filtro apresenta um coeficiente que varia de acordo o tamanho da amostra desejada (NBR ISO 4287, ABNT). O valor do coeficiente é estipulado em norma (NBR ISO 4288, ABNT) e deve ser inserido nas configurações do instrumento de medição. Na figura a seguir (Figura 2), é possível visualizar os perfis primário, de ondulação e de rugosidade, após ser digitalizado pelo instrumento por contato.

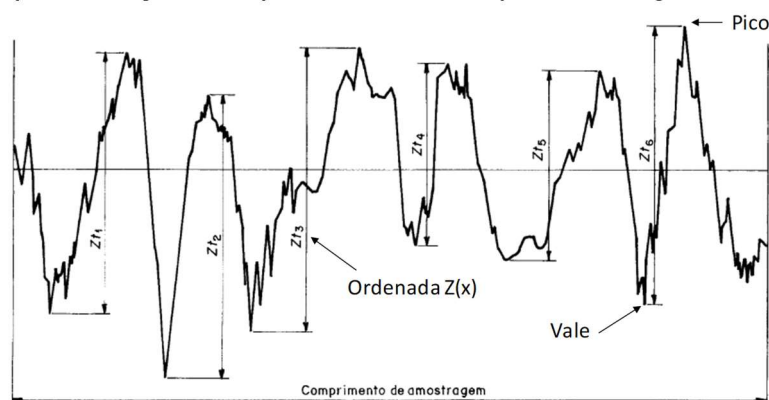
Figura 2 - Representação dos perfis primário, de ondulação e de rugosidade obtido após a leitura do instrumento por contato



Fonte: Mitutoyo (2016)

O perfil de rugosidade serve como base para a avaliação dos seus parâmetros que analisam amplitude, espaçamento ou os dois de forma conjunta. O parâmetro de amplitude do perfil de rugosidade é representado por duas definições: os parâmetros de amplitudes entre picos e vales (Figura 3) e os parâmetros de amplitudes médias das ordenadas  $Z(x)$  ao longo do comprimento de avaliação ( $l_n$ ) (NBR ISO 4287, ABNT). Os parâmetros de amplitude entre picos e vales são: Altura máxima do pico do perfil ( $R_p$ ), Profundidade máxima do perfil ( $R_v$ ), Altura máxima de picos e vales ( $R_z$ ), Altura média do perfil ( $R_c$ ) e Altura total do perfil ( $R_t$ ) (NBR ISO 4287, ABNT). Enquanto que os parâmetros de amplitudes médias das ordenadas são: Rugosidade superficial média ( $R_a$ ), Raiz quadrada média ( $R_q$ ), assimetria ( $R_{sk}$ ) e Curtose da distribuição da altura da superfície ( $R_{ku}$ ) (LI et al. 2017; JABER et al. 2015).

Figura 3 - Representação dos picos e vales no perfil de rugosidade.



Fonte: Adaptado de ABNT (2002).

O perfil de rugosidade e seus parâmetros, obtidos pelos instrumentos por contato, têm sido as únicas partes da caracterização da rugosidade superficial que estão bem definidas (NBR ISO 4287, ABNT). Além do mais, estas informações vêm sendo muito utilizadas para determinar o valor de rugosidade utilizado em fórmulas para encontrar o coeficiente de perda de carga (KELLNER; AKUTSU; REIS, 2016; ROCHA et al., 2017). Porém, necessita-se de mais estudos que determinem o parâmetro mais assertivo a ser utilizado, e a melhor metodologia para medir a rugosidade nas tubulações com a finalidade de avaliar a perda de carga em tubulações pressurizadas.

## 2.2 NÚMERO DE REYNOLDS

Osborne Reynolds (1883) buscou analisar o comportamento dos fluidos em escoamento. Assim, observou em seus experimentos que, em baixas velocidades de escoamento no interior dos tubos, as partículas do fluido apresentam trajetórias bem definidas, denominado regime laminar. Ao elevar a descarga e a velocidade do líquido, ocorre um movimento desordenado das partículas do fluido, denominado turbulento. Logo, as investigações possibilitaram concluir que o melhor critério para determinar o tipo de movimento em uma canalização, está em uma expressão adimensional (Equação 1), que considera a viscosidade do líquido, o diâmetro da tubulação e a velocidade de escoamento (AZEVEDO NETTO et al., 2015).

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (1)$$

Em que: Re é o número de Reynolds (adimensional);  $\nu$  é viscosidade cinemática do fluido ( $m^2 s^{-1}$ ); D é o diâmetro da tubulação (m); V é a velocidade de escoamento do fluido ( $m s^{-1}$ ).

No caso do escoamento laminar caracterizado por  $Re \leq 2300$ , predominam esforços viscosos e, neste caso, o fator de atrito da fórmula universal de perda de carga independe da rugosidade da tubulação e sofre influência somente do número de Reynolds (PORTO, 2006). Com a aceleração do fluxo, o perfil de escoamento se converte para uma faixa de transição, na qual se cria uma

vorticidade na parede do tubo mudando constantemente e se difundindo com o fluxo formando um escoamento turbulento pulsante. Até que, em valores elevados do número de Reynolds, caracterizam um regime denominado turbulento,  $Re > 4000$ , no qual o fluxo se torna caótico durante todo o ciclo (GERRARD, 1971).

De modo geral, o número de Reynolds apresenta importância no conhecimento do regime de escoamento e para a determinação do fator de atrito na fórmula de Darcy-Weisbach (SIMPSON; ELHAY, 2011). Além do mais, a previsão da perda de energia nas tubulações, é uma parte integrante do projeto e avaliação da irrigação em sistemas pressurizados (ALLEN, 1996).

### 2.3 PERDA DE CARGA

No escoamento em condutos forçados ocorre a perda de energia ao longo da tubulação denominada de perda de carga distribuída, ou contínua, e a perda de carga localizada. A perda localizada ocorre em peças especiais, causada pela turbulência do fluido, gerada pelas conexões adicionadas ao longo das tubulações (SAMPAIO et al, 2007). A perda de carga contínua é decorrente de atritos internos, da viscosidade do fluido e do contato entre o fluido e as paredes dos condutos. A magnitude da perda de carga contínua no sistema irá depender da vazão, do diâmetro e do material do tubo (SOUZA et al, 2014).

A determinação precisa das perdas de energia em sistemas pressurizados é de extrema importância, pois permite selecionar bombas adequadas para um bom funcionamento do sistema (WICHOWSKI; SIWIEC; KALENIK, 2019). Com isso, evita o superdimensionamento, melhora a conversão energética e reduz os custos fixos e operacionais. Segundo Cardoso et al. (2008), o custo operacional é afetado inversamente pelo diâmetro dos tubos, pois, se diminuir o diâmetro para uma mesma vazão a perda de carga por unidade de comprimento aumenta e, conseqüentemente, eleva a energia necessária para bombeamento.

Existem diferentes equações para o cálculo da perda de carga, dentre elas, consagrou-se a equação de Darcy-Weisbach (1857) sendo conhecida como equação universal de perda de carga (FRIZZONE et al, 1998). Entretanto, é comum o uso de equações empíricas, como a de Hazen-Williams, Scobey,

Flamant e Manning. No entanto, existe a necessidade de analisar, cautelosamente, em quais os cenários estas equações podem ser aplicadas (SOUZA, 2018).

#### 2.4 EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE CARGA

A equação de Darcy-Weisbach (Equação 2), também conhecida como a equação universal, é uma das fórmulas matemáticas mais completas, com ampla aplicação na engenharia (PICK; KATHERINE; BOXALL, 2021) e a mais bem aceita para determinar a perda de pressão em tubos (MARUSÍC-PALOKA; PAZANIN, 2020), podendo ser aplicada a qualquer tipo de material e qualquer diâmetro de tubo (PEREIRA et al, 2020; HAKTANIR; ARDICHOGLU, 2004).

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

Em que:  $hf$  é a perda de carga contínua ou distribuída (m);  $L$  é o comprimento da tubulação (m),  $D$  é o diâmetro interno da tubulação (m);  $V$  é a velocidade de escoamento do fluido ( $m s^{-1}$ ),  $g$  é a aceleração da gravidade ( $m s^{-2}$ ), e  $f$  é o fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach.

No regime laminar, o fator de atrito( $f$ ) pode ser determinado pela equação de Hagen-Poiseuille ( $f = 64/Re$ ), dependente apenas do número de Reynolds (AYENSA-JIMÉNEZ et al., 2021). Para o regime turbulento, além do número de Reynolds, a estimativa do valor de “ $f$ ” depende da rugosidade relativa( $\epsilon$ ) das paredes dos tubos (ZITERRELL et al. 2009). Neste caso, pode-se utilizar a equação de Churchill (1977) (equação 3), em que  $A$  e  $B$  são constantes que dependem do  $Re$  e da rugosidade relativa.

$$f = \left[ \left( \frac{8}{Re} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Em que:  $f$  é o fator de atrito (adimensional);  $A$  e  $B$  são constantes adimensionais;

Os valores de A e B da equação de Churchill são determinados pelas equações 4 e 5 a seguir.

$$A = \left[ 2,45 \times \ln \frac{1}{\left(\frac{7}{Re}\right)^{0,9} + \frac{0,27\varepsilon}{D}} \right]^{16} \quad (4)$$

$$B = \left( \frac{37,530}{Re} \right)^{16} \quad (5)$$

Em que:  $\varepsilon$  é a rugosidade absoluta da parede interna da tubulação (adimensional);

A equação do fator de atrito elaborada por Churchill pode ser aplicada em todas as faixas de rugosidade e aos regimes de escoamento laminar, de transição e turbulento totalmente desenvolvido (CHURCHILL, 1977; ALAZBA et al., 2012). Portanto, esta equação vem sendo muito utilizada para estimar a perda de energia por atrito em tubulações pressurizadas (ALLEN, 1996; ALAZBA et al., 2012; KLIMES et al., 2019; LI et al., 2021; NAGANO et al., 2021; ZHOU et al., 2021).

## 2.5 FÓRMULAS EMPÍRICAS

Cada equação empírica de perda de carga foi deduzida para um regime de escoamento específico (ZITTERELL, 2011), entretanto, todas apresentam características convergentes em relação ao coeficiente de perda de carga, pois o seu valor foi baseado nas características das tubulações e não leva em consideração o regime de escoamento (ABO-GHOBAR, 1995; HAKTANIR; ARDICHIOGLU, 2004; HOUGHTALEN et al., 2016). Portanto, com o advindo da equação universal as equações empíricas se mostraram pouco representativas (ASSY, 1997), e foram se tornando obsoletas ao longo do tempo.

Dentre as equações empíricas com maior aplicação em sistemas de irrigação pressurizados pode-se citar a de Hazen-Williams, Scobey, Flamant e Manning.

### 2.5.1 Fórmula de Hazen-Williams

Entre as equações empíricas que estimam a perda de carga em tubulações, frequentemente os projetistas de sistemas de irrigação utilizam a equação de Hazen-Williams (1902) (ABO-GHOBAR, 1995; D'AMBROSIO et al. 2015; COELHO et al. 2018). A sua aplicação se estende atualmente para a elaboração de algoritmos e modelagem que monitoram o sistema de distribuição de água (MOAZENI; KHAZAEI, 2021; PECCI; STOIANOV; OSTFELD, 2021; JAFARI-ASI, 2021, VRACHIMIS et al. 2021), constituição de redes neurais artificiais para a solução de problemas físicos (AYENSA-JIMÉNEZ et al., 2021) e no dimensionamento de sistemas de irrigação (MAOSHENG et al. 2020; LIMA et al. 2019). A seguir apresenta-se a equação de Hazen-Williams (Equação 6) e a descrição de suas variáveis.

$$hf = 10,643 \frac{L}{D^{4,87}} \left( \frac{Q}{C} \right)^{1,852} \quad (6)$$

Em que: hf é a perda de carga contínua ou distribuída (m c a); L é o comprimento da tubulação (m); D é o diâmetro interno da tubulação (m); Q é a vazão (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>); C é o coeficiente da equação de Hazen-Williams.

Atualmente, utiliza-se didaticamente e na elaboração de projetos o “C” com um valor fixo para cada material de fabricação dos tubos. Entretanto, pesquisas mostram que o valor do coeficiente C da equação de Hazen-Williams varia para um mesmo material de fabricação do tubo (ABO-GHOBAR, 1995; AYENSA-JIMÉNEZ et al., 2021), com intervalos de 140 a 180 para tubulações de PVC (CARVALHO, 1998; GOMES, 1999; SAMPAIO et al., 2000, 2001; PORTO, 2006; HIDALGO et al. 2008; MELLO; ELYAMANY; EL-NASHAR, 2015; RADHAKRISHNA et al. 2017;). Entretanto, os menores erros são obtidos com os coeficientes de 150, para os diâmetros de até 75mm, e 155, para diâmetro igual ou maior que 75mm (SOUSA, 2018).

Apesar de sua elevada utilização, a equação de Hazen-Williams pode apresentar erros em suas aplicações em tubulações pressurizadas. Esta equação é recomendada para regime de escoamento turbulento e de transição

(PORTO, 2006), tubos com diâmetro mínimo de 50 mm (CARVALHO et al, 2009), e temperatura da água igual a 20°C. Apresentando, portanto, baixa precisão para fluxo laminar e tubos ásperos (KIM et al, 2016). Com isso, alguns projetistas preferem utilizar outras fórmulas empíricas ao invés da equação de Hazen-Williams (JUSTI et al, 2017).

### 2.5.2 Fórmula de Scobey

Após sucessivas pesquisas com equações voltadas a determinar a perda de carga em tubulações pressurizadas, Scobey (1930) realizou experimentos de campo e coletou dados conhecidos sobre o assunto. Posteriormente, propôs uma equação simplificada (Equação 7) que representa o transporte de água para uso na irrigação, uso doméstico, entre outros usos.

$$hf = \frac{K_S}{387} \frac{L}{D^{1,1}} V^{1,9} \quad (7)$$

Ao substituir a velocidade de escoamento pela vazão, tem-se:

$$hf = \frac{K_S}{387} \left( \frac{4Q}{\pi} \right)^{1,9} \frac{L}{D^{4,9}} \quad (8)$$

Em que:  $K_S$  é o coeficiente de Scobey.

A equação de Scobey é indicada para o cálculo da perda de carga nas tubulações de até 3 polegadas (GOMES, 1999), sendo usada com frequência em sistemas de irrigação por aspersão e por gotejamento (GOMES, 1997). O valor do coeficiente  $K_S$  para tubos plásticos ou lisos é de 0,32 de acordo a literatura (NETO et al., 2016; GOMES, 1999). Entretanto esse valor pode variar em função do diâmetro do tubo e a velocidade de escoamento, sendo que o uso de um coeficiente fixo também pode atribuir erros na estimativa da perda de carga (SOUSA, 2018).

### 2.5.3 Fórmula de Flamant



A equação de Flamant (1892) foi desenvolvida por Alfred Aimé Flamant, e atualmente é muito utilizada para a determinar a perda de carga distribuída nos tubos (MIRANDA, 2016) de pequenos diâmetros, ou seja, menores que 50 mm. A equação de Flamant (1892), apresentada a seguir (Equação 9), pode ser aplicada para tubulações de diferentes diâmetros. Entretanto, sua aplicabilidade pode ser ampliada desde que seus coeficientes sejam ajustados através de novos experimentos.

$$hf=4b \cdot V^{1,75} \cdot D^{-1,25} \cdot L \quad (9)$$

Em que: b é o coeficiente da equação.

O valor do coeficiente da equação de Flamant varia de acordo o tipo do material do tubo, sendo utilizado o valor de 0,000120 para tubos de PVC, b = 0,00052 para tubos de vidro, b = 0,00074 para tubos de ferro fundido novo e b = 0,00092 para tubos de ferro fundido usado (ASSY, 1977; AZEVEDO NETO et al, 2015). Entretanto, dependendo do diâmetro e a velocidade de escoamento em que é aplicada para a determinação da perda de carga, a equação pode super ou subestimar a perda de energia nas tubulações (SOUSA, 2018). Além do mais, as rugosidades dos tubos podem se alterar ao longo do tempo, fazendo necessário a correção deste valor para seguir apresentando resultados confiáveis.

#### **2.5.4 Fórmula de Manning**

A fórmula empírica de Manning (ou Strickler, como é chamada na Europa) foi usada com sucesso em uma ampla gama de projetos e estudos de engenharia em todo o mundo ao longo do século passado (LUMBROSO; GAUME, 2012) e considerada satisfatória para a determinação da perda de carga em tubulações pressurizadas, além de possuir uma ampla utilidade sobre o fluxo em condutos livres (CUNLIFFE et al. 2021). A equação para uso em tubulações pressurizadas se apresenta da seguinte forma:

$$hf=2,87 n^2 \frac{L V^2}{D^{4/3}} \quad (10)$$

Em que: n é o coeficiente da equação de Manning.

A equação empírica de Manning é aplicável apenas para fluxo de água com temperatura ambiente e com um grau de turbulência elevado, seja em número de Reynolds altos, ou quando a tubulação é bastante irregular (TWORT et al., 2000; HAKTANIR; ARDICLIOGLU, 2004). O coeficiente n da equação de Manning está relacionado com a rugosidade da parede do tubo. Seu valor é descrito na literatura entre 0,009 a 0,0092 para tubos de PVC liso (BISHOP, JEPSON, 1975; CUNLIFFE et al. 2021), e 0,008 para tubos plásticos (GOMES, 1997).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente capítulo apresenta os procedimentos metodológicos utilizados neste trabalho para determinar a rugosidade absoluta, a perda de carga contínua e o coeficiente de perda de carga para as equações empíricas em tubulações de PVC da linha Irrigação e Agropecuário.

#### 3.1 MEDIÇÃO DA PERDA DE CARGA EM LABORATÓRIO

A perda de carga medida foi realizada em um sistema de bombeamento de circuito fechado, representado pela Figura 4, localizado no Laboratório de Hidráulica do Centro de Ciências Rurais da Universidade Federal de Santa Maria (Santa Maria, RS).

O conjunto motobomba utilizado é constituído de uma bomba hidráulica da marca Schneider, modelo Centrífuga BC – 20R, vazão máxima de  $17 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Alimentado por um motor elétrico de indução trifásico, da marca WEG, com potência nominal de 3,7 kW (5 cv).

Na canalização de saída do conjunto motobomba, foram inseridos um registro de gaveta, que possibilitou a variação da vazão, e um hidrômetro do tipo turbina, com vazão nominal de  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , para medição do volume em determinado tempo. Na Figura 5 é representado o conjunto motobomba e as peças especiais inseridas no início do sistema de bombeamento.

Figura 4 - Conjunto motobomba e peças especiais presentes no sistema de bombeamento de circuito fechado.



Fonte: Autor.

As peças especiais apresentadas na Figura 4 foram conectadas a jusante das tubulações de PVC, utilizadas para inserir as tomadas de pressões e medir a perda de carga. Na Tabela 1 são descritos os tubos novos de PVC da Linha Irrigação e Agropecuário utilizados na pesquisa. Os tubos foram adquiridos no mercado local na quantidade de duas unidades de cada. Uma unidade foi utilizada no ensaio de perda de carga e outra para a determinação da rugosidade absoluta.

Tabela 1 - Descrição dos tubos utilizados nos ensaios de perda de carga e avaliação da rugosidade absoluta.

Sigla	Fabricante	Característica do tubo	Pressão nominal (m c a)	Diâmetro nominal (mm)
AGRO-PN60-DN32	A	Tubo linha Agropecuário	60	32
AGRO-PN60-DN40	B	Tubo linha Agropecuário	60	40
FIXA-PN40-DN50	A	Tubo linha irrigação FIXA	40	50
FIXA-PN60-DN50	B	Tubo linha irrigação FIXA	60	50
FIXA-PN80-DN50	A	Tubo linha irrigação FIXA	80	50
MÓVEL-PN80-DN50	A	Tubo linha irrigação MÓVEL	80	50
FIXA-PN80-DN75	B	Tubo linha irrigação FIXA	80	75
MÓVEL-PN80-DN75	B	Tubo linha irrigação MÓVEL	80	75

Fonte: Autor

### 3.1.1 Ensaio da perda de carga contínua em laboratório

As perdas de carga nas tubulações foram determinadas levando em consideração a equação de Bernoulli (Equação 11) para descrever o comportamento da água em movimento no interior dos tubos. Sendo que, aplicada a duas seções quaisquer de um líquido real em movimento, em que a soma das energias potencial e cinética, é constante. Esse fenômeno pode ser representado pela seguinte equação:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2 g} + Z_2 + hf \quad (11)$$

Em que:  $\frac{P}{\gamma}$  é a carga de pressão (m c a);  $\frac{V}{2g}$  a carga de velocidade ou cinética (m c a);  $Z_1$  e  $Z_2$  são as cargas geométricas ou de posição (m c a);  $h_f$  a perda de carga (m c a).

Considerando que a tubulação se encontra em nível, em uma seção constante, com um escoamento plenamente estabelecido, obteve-se a análise dos dados segundo a Equação 12:

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma} = \frac{\Delta P}{\gamma} = h_f \quad (12)$$

Em que:  $P_1$  é a pressão no início do trecho ( $\text{Kgf m}^{-2}$ );  $P_2$  a pressão no final do trecho ( $\text{Kgf m}^{-2}$ );  $\gamma$  o peso específico do fluido ( $\text{Kgf m}^{-3}$ ); e  $h_f$  a perda de carga entre o início e o final do trecho (m c a).

Foram conectadas duas tomadas de pressões (Figura 5) na tubulação utilizada no ensaio. A perda de carga da seção foi a leitura da diferença de pressão entre as duas tomadas de pressão, com auxílio de um manômetro diferencial com coluna de mercúrio (Figura 6).

Figura 5 - Representação da tomada de pressão inserida nos tubos, para o ensaio da perda de carga.



Fonte: Autor

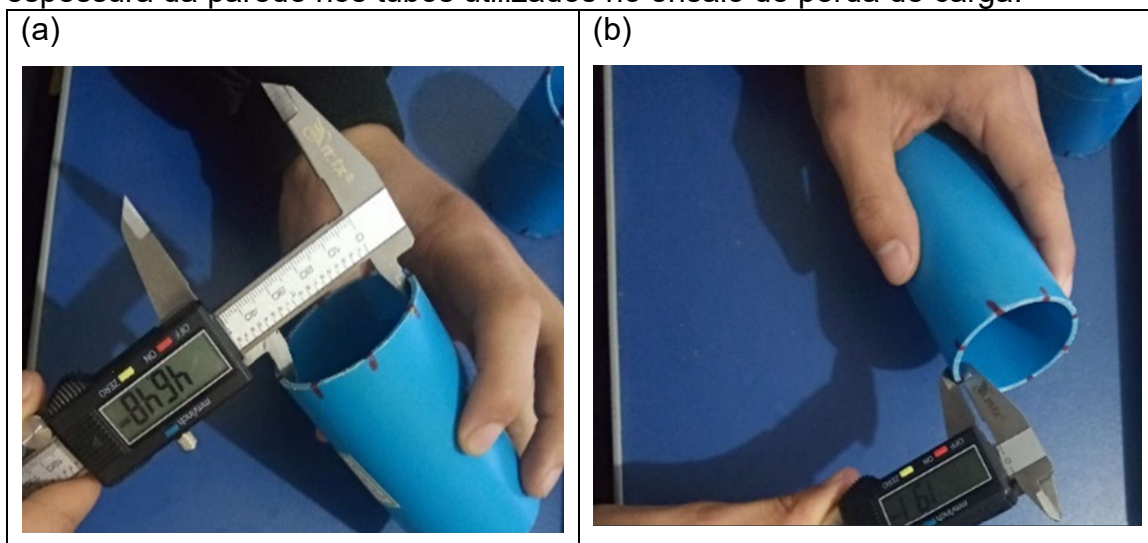
Figura 6 - Medidor de pressão diferencial com coluna de mercúrio.



Fonte: Autor

A determinação do diâmetro interno médio e da espessura da parede da tubulação foi realizada de acordo com a metodologia utilizada por Zitterel et al. (2009), em que, com o auxílio de um paquímetro digital com precisão de  $\pm 0,02$  mm (Figura 7) é medido em quatro pontos equidistantes, em duas seções transversais ao comprimento da tubulação, compreendendo, assim, 24 amostras no total e que posteriormente foram utilizadas para calcular o valor médio do diâmetro interno.

Figura 7 - Procedimento de medição com paquímetro, do diâmetro interno e espessura da parede nos tubos utilizados no ensaio de perda de carga.



Fonte: Autor

A seguir, é demonstrado o diâmetro interno obtido pela metodologia citada. Além disso, foi realizado o teste de Shapiro-Wilk para analisar se os dados medidos seguem uma distribuição normal.

Tabela 2 - Comprimento (L) útil entre dois pontos ao longo do tubo, diâmetro interno médio ( $D_i$ ) com seu respectivo desvio padrão ( $\sigma$ ) teste de normalidade para cada tubulação utilizada no estudo.

Tubo	L (útil)	$D_i$	$\sigma (D_i)$	Shapiro-Wilk	
	(m)	(mm)		P-valor	Normalidade
AGRO-PN60-DN32	4,41	28,81	0,15	0,771	Sim
AGRO-PN60-DN40	4,08	35,25	0,20	0,243	Sim
FIXA-PN40-DN50	3,66	47,71	0,09	0,113	Sim
FIXA-PN60-DN50	3,60	46,91	0,31	0,321	Sim
FIXA-PN80-DN50	3,66	46,71	0,16	0,458	Sim
MÓVEL-PN80-DN50	3,52	46,67	0,06	0,325	Sim
FIXA-PN80-DN75	3,44	70,62	0,18	0,185	Sim
MÓVEL-PN80-DN75	3,25	70,45	0,24	0,177	Sim

Fonte: Autor

### 3.1.2 Rugosidade absoluta

A rugosidade absoluta em tubos de PVC foi obtida através da medição do parâmetro Ra com auxílio do rugosímetro de bancada (Mitutoyo, série SJ-410), com resolução de 0,001  $\mu\text{m}$  e ponta de apalpação de formato cônico com ponta esférica. Os parâmetros mensurados e suas especificações estão de acordo com norma ISO 4287:1997. O equipamento foi configurado para um comprimento de avaliação de rugosidade (ln) de 4,0 mm, comprimento de amostragem de 0,8 mm e velocidade de deslocamento de 0,5  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Figura 8 - Rugosímetro de bancada utilizado para a avaliação do parâmetro Ra do perfil de rugosidade.



Fonte: Autor.

O preparo das amostras foi realizado de acordo a metodologia adaptado de Miranda et al. (2019), em que cada tubo foi dividido em 10 partes iguais. Cada parte foi realizada 3 medidas no sentido transversal e longitudinal ao fluxo, totalizando 60 amostragens de rugosidade para cada tubulação estudada.

### 3.2 AJUSTE DOS COEFICIENTES DE PERDA DE CARGA DAS EQUAÇÕES EMPÍRICAS.

Neste tópico será apresentado o processo para desenvolver as equações que estimem os coeficientes de perda de carga das equações de Hazen-Williams (coeficiente C), Scobey (coeficiente Ks), Flamant (coeficiente b) e Manning (coeficiente n). Buscou-se uma relação da perda de carga obtida pelas equações empíricas com a equação de Darcy-Weisbach.

#### 3.2.1 Cálculo do coeficiente C da equação de Hazen-Williams

Igualando a equação Universal de perda de carga de carga com a equação empírica de Hazen-Williams, tem-se:



$$0,0826 \cdot f \cdot \frac{Q^2}{D^5} = 10,645 \cdot \frac{Q^{1,852}}{C^{1,852} \cdot D^{4,87}} \quad (13)$$

Isolando-se na Equação 13 o coeficiente C, obtém-se:

$$C = \left[ 10,645 \cdot \left( \frac{Q^{-0,148}}{0,0826 \cdot f \cdot D^{-0,13}} \right) \right]^{1/1,852} \quad (14)$$

Inserindo a Equação 3 na Equação 14, obtém-se a seguinte resolução matemática:

$$C = \sqrt[1,852]{10,645 \cdot \left( \frac{Q^{-0,148}}{0,0826 \cdot \left[ \left( \frac{8}{Re} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{1,5}} \right]^{0,5} \cdot D^{-0,13}} \right)} \quad (15)$$

### 3.2.2 Cálculo do coeficiente K<sub>s</sub> da equação de Scobey

Igualando a Equação 2 com a equação 7, tem-se:

$$f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} = 10,645 \cdot \frac{K_S}{387} \cdot D^{-1,1} \cdot V^{1,9} \quad (16)$$

Isolando-se, na Equação 16 o coeficiente K<sub>s</sub> e considerando g com o valor fixo de 9,81 m s<sup>-2</sup>, tem-se:

$$K_S = \frac{D^{0,1} \cdot V^{0,1} \cdot f}{19,62} \cdot 387 \quad (17)$$

Substituindo o valor de f pela Equação 3. Tem-se a seguinte resolução matemática para determinar o coeficiente K<sub>s</sub>.

$$K_S = \left\{ \frac{D^{0,1} \cdot V^{0,1} \cdot \left[ \left( \frac{8}{Re} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{1,5}} \right]^{0,5}}{19,62} \cdot 387 \right\} \quad (18)$$

### 3.2.3 Cálculo do coeficiente b da equação de Flamant

Igualando a Equação 2 com a Equação 9, tem-se:

$$f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} = 4b \cdot V^{1,75} \cdot D^{-1,25} \quad (19)$$

Isolando-se, na relação anterior, o coeficiente b. Considerando a g com o valor fixo de 9,81 m.s<sup>-2</sup>, tem-se:

$$b = \frac{\left( \frac{f \cdot D^{0,25} \cdot V^{0,25}}{19,62} \right)}{4} \quad (20)$$

Substituindo o valor de f pela Equação 3. Tem-se a seguinte fórmula para determinar o coeficiente b.

$$b = \frac{\left\{ \frac{\left[ \left( \frac{8}{Re} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{1,5}} \right]^{0,5} \cdot D^{0,25} \cdot V^{0,25}}{19,62} \right\}}{4} \quad (21)$$

### 3.2.4 Cálculo do coeficiente n da equação de Manning

Igualando a Equação 2 com a Equação 10, tem-se:

$$f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} = 2,87 \times n^2 \cdot \frac{L \cdot V^2}{D^{4/3}} \quad (22)$$

Isolando-se na Equação 22, o coeficiente n e considerando g com o valor fixo de 9,81 m.s<sup>-2</sup>, tem-se:

$$n = \sqrt{\frac{\left( \frac{f \cdot D^{0,33}}{19,62} \right)}{6,36}} \quad (23)$$

Substituindo o valor de f pela Equação 3. Tem-se a seguinte fórmula para determinar o coeficiente b.

$$n = \sqrt{\frac{\left[ \left[ \left( \frac{8}{Re} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{1,5}} \right]^{0,5} \cdot D^{0,33} \right]}{19,62}}{6,36}} \quad (24)$$

A equação proposta para determinar o coeficiente  $n$  apresentou variações em relação as outras equações quando comparada a equação universal de perda de carga. Ambos os expoentes da velocidade de escoamento apresentam o mesmo valor. Portanto, ao reduzir a equação em uma só, essa varável foi excluída na fórmula final. Nesse caso, o valor do coeficiente  $n$  dependerá somente do diâmetro da tubulação e o fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach.

### 3.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

#### 3.3.1 Parâmetro Ra do Perfil de Rugosidade

Para avaliar a concordância entre os valores de perda de carga medidos e simulados pela equação universal, com valores de rugosidade do parâmetro Ra medidos tanto em sentido transversal e longitudinal, utilizou-se o índice de concordância de Willmott “d”, coeficiente linear de correlação de Pearson “r”, e o índice de desempenho de Camargo e Sentelhas “c”, conforme apresentado nas equações 25, 26 e 27.

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - O_i| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (25)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - P)(O_i - O)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - P)^2 \sum_{i=1}^n (O_i - O)^2}} \quad (26)$$

$$c = r \cdot d \quad (27)$$

Em que:  $P_i$  são valores estimados através da equação de Darcy-Weisbach ( $m \cdot c \cdot a$ ),  $O_i$  os valores observados pelo método de coluna em U ( $m \cdot c \cdot a$ ),  $P$  é a média dos valores estimados;  $O$  é a média dos valores observados, e  $n$  é o número de observações.

Os resultados obtidos pelo “d”, “r” apresentam seu valor limitado por 0 e 1. Quando os resultados forem mais próximos de 1, maior a correlação com os dados medidos. O coeficiente  $c$  é interpretado, segundo Pimenta et al. (2018), como: “Excelente” ( $c > 0,90$ ); “ótimo” ( $c$  entre 0,90 e 0,80); “muito bom” ( $c$  entre 0,70 e 0,80); “bom” ( $c$  entre 0,60 e 0,70), “moderadamente bom” ( $c$  entre 0,50 e 0,60), “moderado” ( $c$  entre 0,40 e 0,50) “moderadamente ruim” ( $c$  entre 0,30 e 0,40) “ruim” ( $c$  entre 0,30 e 0,20) “muito ruim” ( $c$  entre 0,10 e 0,20) e “péssimo” ( $c < 0,10$ ).

Com a finalidade de oferecer suporte à análise estatística, o maior nível de detalhamento foi determinado pelo Erro Relativo Percentual (ER %), Equação 29, e a Frequência Acumulada do Erro Relativo

$$ER (\%) = \frac{|VT - VR|}{VR} \cdot 100 \quad (28)$$

Em que: Erro é o erro percentual (%); VT o valor teórico calculado equação de Darcy-Weisbach ( $m \cdot c \cdot a$ ); e VR é o valor real medido em laboratório pelo método de coluna em U ( $m \cdot c \cdot a$ ).

### 3.3.2 Fórmula para o cálculo do coeficiente das equações empíricas.

Para verificar a precisão da equação desenvolvida para calcular os coeficientes, comparou-se a perda de carga estimada pelas equações empíricas com a perda de carga calculada pela equação Universal (perda de carga de referência).

A concordância entre as perdas de carga das equações empíricas com seu coeficiente fixo e calculado, foi quantificada por “d”, “r”, e “c”, conforme apresentado nas equações 25, 26 e 27. Com a finalidade de oferecer suporte à análise estatística, o maior nível de detalhamento foi determinado pelo ER % (Equação 28).

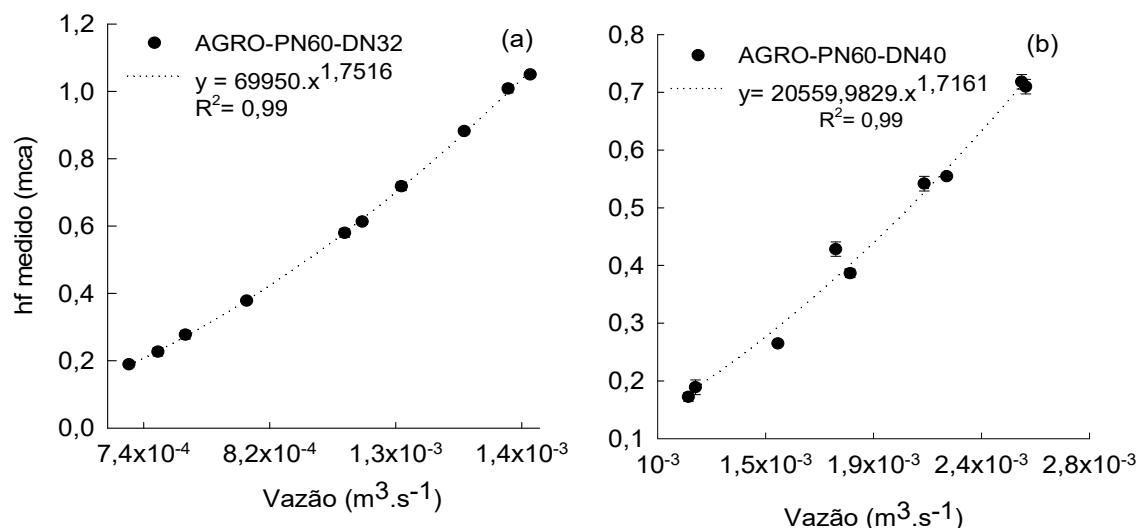
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão mostrados e argumentados os resultados alcançados neste estudo. Os resultados serão divididos em dois momentos. Primeiramente serão apresentados os dados referentes a perda de carga medida em laboratório e seu uso para comparar com os dados calculados. Posteriormente serão apresentados os resultados em relação a determinação da perda de carga pelas equações empíricas, utilizando o coeficiente fixo e o coeficiente ajustado pela equação proposta.

### 4.1 AJUSTE DA EQUAÇÕES DE PERDA DE CARGA

Na Figura 09, demonstra-se os resultados da perda de carga medida em laboratório, em função de diferentes vazões ao longo do comprimento útil das tubulações da linha Agropecuário, juntamente com seu respectivo desvio padrão.

Figura 9 - Perda de carga contínua em função da vazão medida em laboratório com o manômetro diferencial de mercúrio, para os tubos da linha Agropecuário nos diâmetros nominais (DN) de a) 32 mm e b) 40 mm.

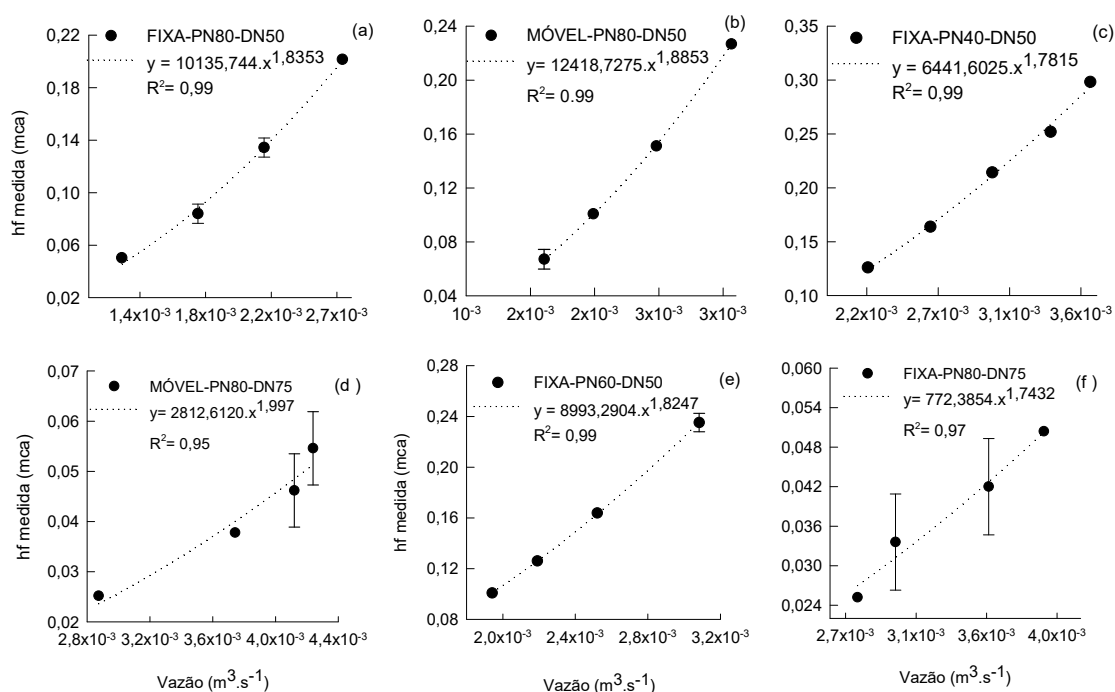


Ao total foram 10 medições para o tubo com DN 32 mm, e 9 medidas para o tubo com DN 40 mm. Pode-se analisar que as equações de potência obtidas na Figura 10<sup>o</sup> apresentam coeficiente de determinação de 0,99 e o expoente de

1,75 e 1,72 o que corrobora com os dados encontrados por CAIXETA (1991) em seu estudo na determinação da perda de carga em tubos de PVC da Linha Irrigação de 50, 75 e 100mm de diâmetro, obtendo expoentes variando de 1,7 a 2,0.

Na Figura 10 demonstra-se os resultados da perda de carga medida em metros de coluna de água em função da vazão ao longo do comprimento útil das tubulações de PVC da linha Irrigação.

Figura 10 - Perda de carga contínua em função da vazão medida com o manômetro diferencial de mercúrio, para os tubos da linha Irrigação de sistemas fixos (FIXA) com diâmetro nominal (DN) de 50mm com pressões nominais (PN) de a) 80m c a, c) 40 m c a.



Os tubos DN 75, figuras (d) e (f), apresentaram os maiores desvios padrões em seus resultados em relação aos demais. Este fato resulta de intervalos menores entre as medições e baixos valores de perda de carga, sendo justificado pela variação dos dados devido a vazão do sistema de bombeamento, pois os tubos de menor diâmetro apresentaram resultados mais visíveis neste estudo. Entretanto, o valor do  $R^2$  se apresentou elevado na equação ajustada para o diâmetro nominal de 75 mm e aos demais tubos, devido a linha de regressão ficar próxima aos valores medidos.

#### 4.2 MÉDIAS DO PARÂMETRO Ra DO PERFIL DE RUGOSIDADE

Na Tabela 3, demonstra-se os resultados de rugosidades médias obtidas em diferentes tubos de PVC da linha Irrigação e Agropecuário. A demonstração é realizada para as avaliações em sentido transversal e longitudinal ao fluxo, as mesmas são comparadas em teste t com amostras pareadas a 95% de significância.

Tabela 3 - Rugosidade média e desvio padrão das amostras analisadas em sentido transversal e longitudinal ao fluxo, com o respectivo resultado do P-valor.

Tubo	Longitudinal		Transversal		P-valor
	Média ( $\mu\text{m}$ )	desvio padrão	Média ( $\mu\text{m}$ )	desvio padrão	
AGRO-PN60-DN32	0,770	0,052	0,931	0,061	$0,0301E^{-5}$
AGRO-PN60-DN40	2,364	0,370	2,728	0,351	0,0134
FIXA-PN40-DN50	0,977	0,086	0,935	0,071	0,0931
FIXA-PN60-DN50	3,365	0,365	3,187	0,236	0,1622
MÓVEL-PN80-DN50	1,155	0,087	1,061	0,077	0,0172
FIXA-PN80-DN50	1,247	0,087	1,064	0,081	0,0004
MÓVEL-PN80-DN75	2,291	0,159	2,227	0,225	0,3968
FIXA-PN80-DN75	2,320	0,257	2,136	0,184	0,0178

Através da tabela 3, é possível avaliar que os resultados de rugosidade variaram de 0,77 a 3,365  $\mu\text{m}$ . Menores valores de rugosidade da parede interna dos tubos representam superfícies mais lisas (JERIN; KARUNAKARAN, 2021). O menor valor de rugosidade foi observado nos tubos AGRO-PN60-DN40, seguido dos tubos da linha FIXA-PN40-DN50, tanto em sentido transversal como em sentido longitudinal. Os maiores valores de rugosidade foram observados nos tubos da linha FIXA-PN60-DN50.

Os valores observados se apresentaram menores que os descritos na literatura, pesquisas científicas demonstram resultados de rugosidade entre 3 a 20 micrômetros para tubos de PVC (ALLEN, 1999; ALZBA, 2012; SOUZA et al., 2014; URIBE et al., 2015; KELLNER et al., 2016; BEZZERA et al., 2017; ROCHA et al., 2017). Esse fato pode ser explicado com a melhoria no processo de

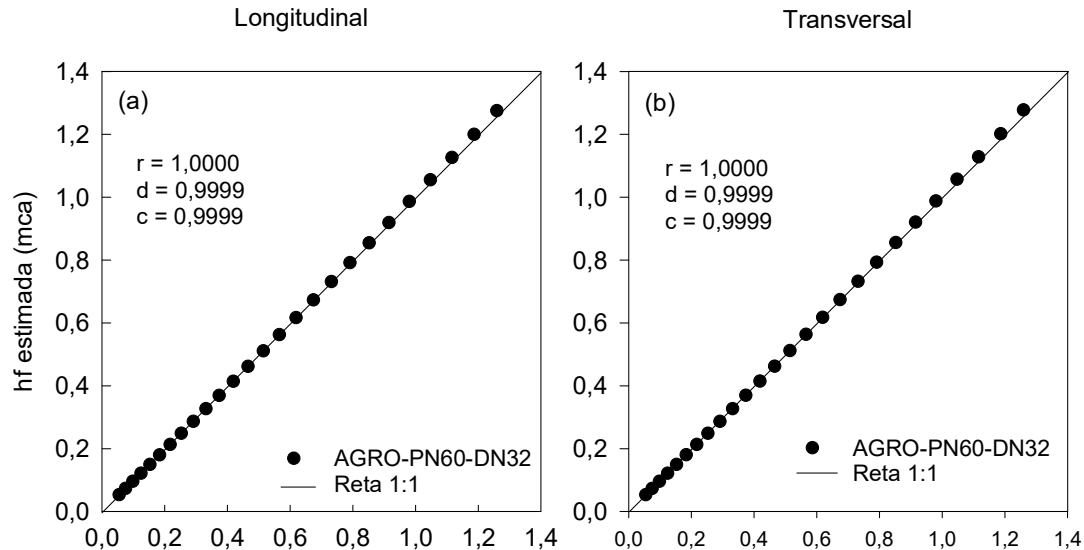
fabricação dos tubos e na qualidade da sua matéria prima que contribuem para a redução das imperfeições nas paredes dos tubos.

Os tubos da linha FIXA-PN40-DN50, FIXA-PN60-DN50 e MÓVEL-PN80-DN75, não apresentam diferença nos valores de rugosidade medidas em sentido transversal e longitudinal ao fluxo, levantando a hipótese de que a medida de rugosidade obtida pelo rugosímetro em somente um sentido de leitura, já é suficiente para determinar a perda de carga.

Na Figura 11 demonstra-se os índices estatísticos para perda de carga calculada pela equação de Darcy-Weisbach ( $h_f$  estimada) com o fator de atrito calculado pela equação de Churchill, utilizando o valor de rugosidade relativa medida em sentido longitudinal e transversal ao fluxo, e comparados com a perda de carga medida em laboratório ( $h_f$  observada), para tubos da linha Agropecuário.

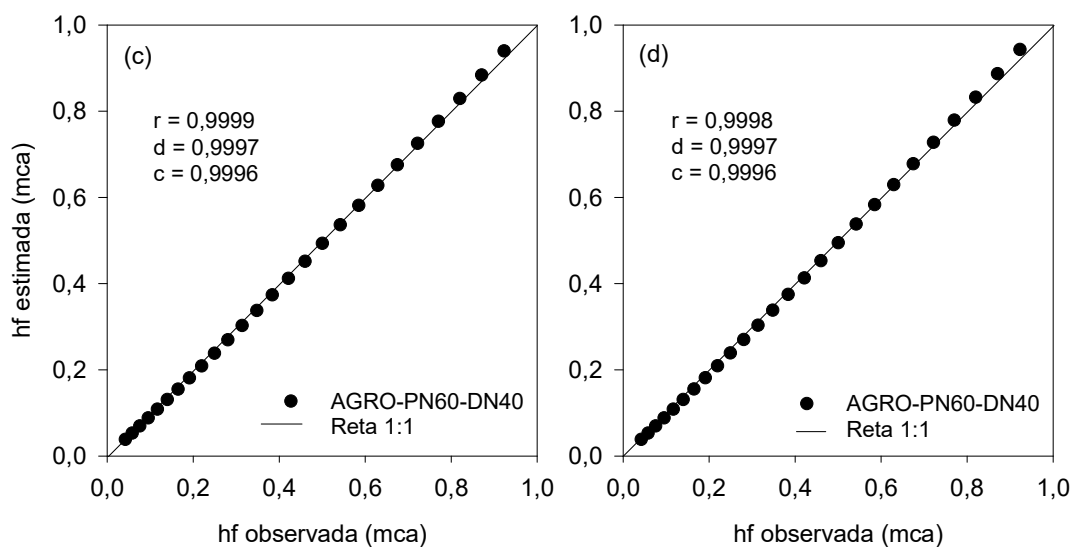
Figura 11 - Perda de carga observada versus estimada pela equação de Darcy-Weisbach, com a rugosidade avaliada em sentido longitudinal e transversal ao fluxo nos tubos da linha Agropecuário.

(continua)





(continuação)

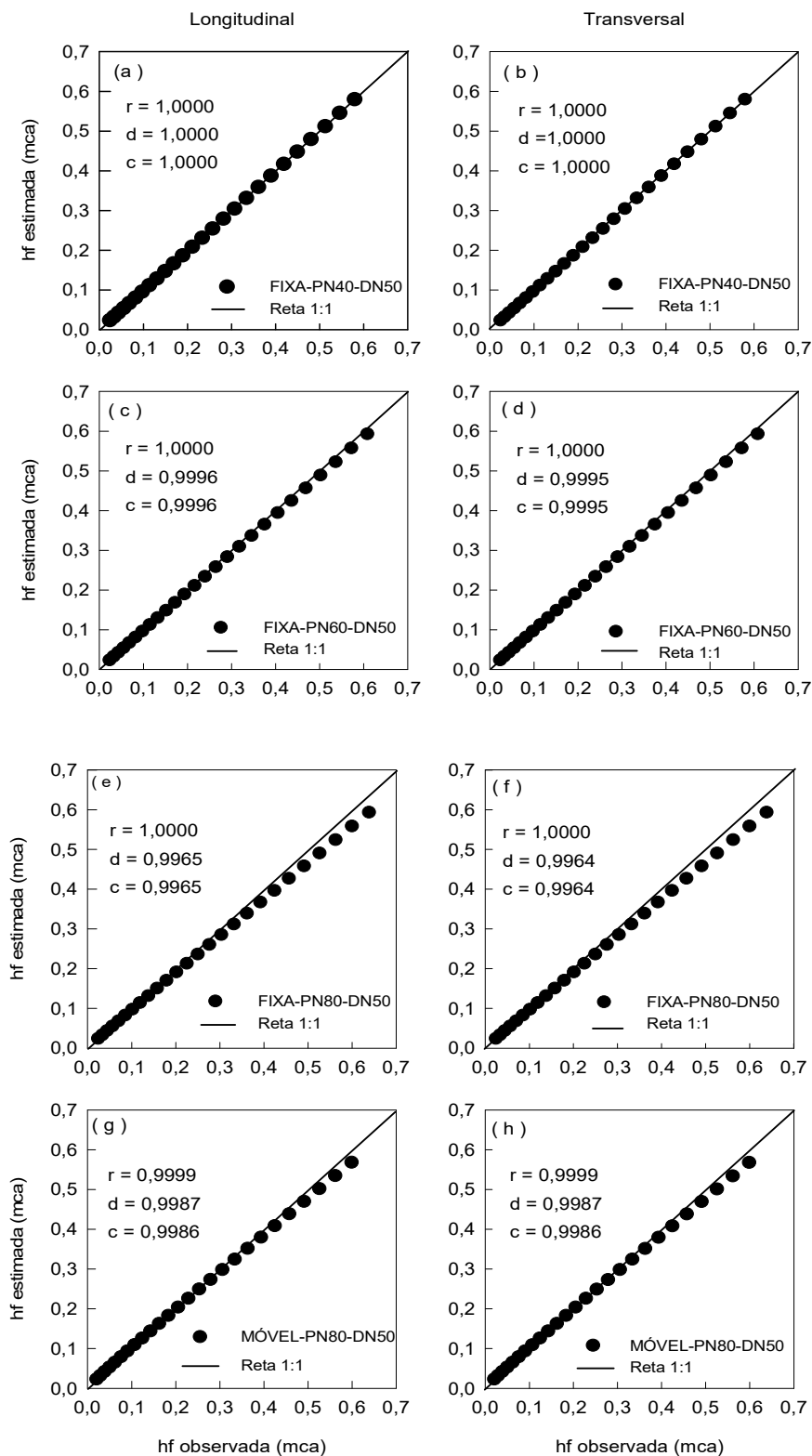


Nos ensaios realizados nos tubos da linha Agropecuário, todos apresentaram o índice “c” com valores maiores que 0,99, podendo ser classificado como “Excelente”. A perda de carga estimada pela equação de Darcy-Weisbach apresentou boa correlação com os resultados observados em laboratório, tanto com valores de rugosidade medido em sentido transversal e longitudinal ao fluxo, com  $r$  de 1,00 e 0,99 para os diâmetros de 32 e 40 mm respectivamente. Classificando-se como “Excelente” e apresentando elevado grau de exatidão entre as variáveis envolvidas.

Na Figura 12, demonstra-se os resultados da perda de carga calculada pela equação de Darcy-Weisbach (hf estimada) com o fator de atrito calculado pela equação de Churchill, utilizando o valor de rugosidade relativa medida em sentido longitudinal e transversal ao fluxo e comparados com a perda de carga medida em laboratório (hf observada), em tubos da linha Irrigação com diâmetro nominal de 50mm.

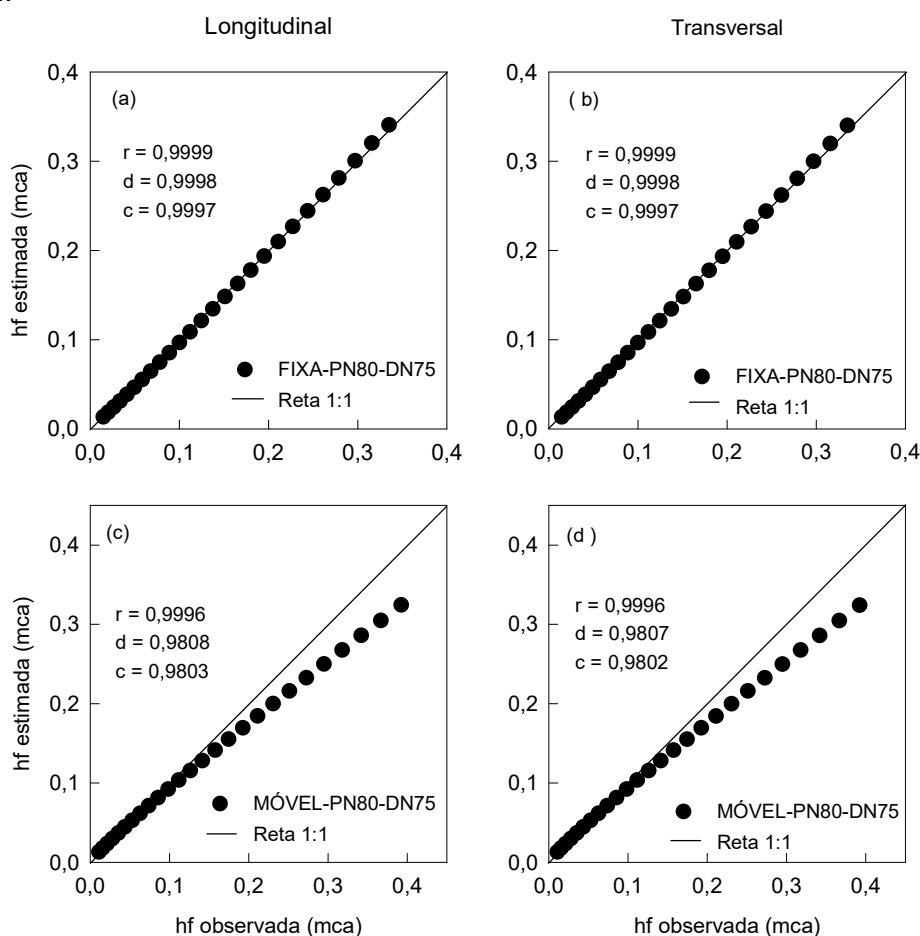
Os resultados obtidos neste estudo corroboram com valores encontrados por VILAÇA (2012), em seu experimento com tubos de PVC com diâmetros nominais de 50 e 75mm. Onde o uso do valor de rugosidade a partir do parâmetro  $R_a$ , apresentou boa correlação com dados medidos. Entretanto faltam estudos que demonstrem a comparação entre os sentidos de medições com o rugosímetro.

Figura 12 - Perda de carga observada versus estimada pela equação de Darcy-Weisbach utilizando dados de rugosidade relativa avaliadas no sentido transversal e longitudinal, em diferentes tubos da linha Irrigação com diâmetro nominal de 50mm.



Na Figura 13, demonstra-se os resultados da perda de carga calculada pela equação de Darcy-Weisbach ( $h_f$  estimada) com o fator de atrito calculado utilizando o valor de rugosidade relativa medida em sentido longitudinal e transversal ao fluxo, e comparando-se com a perda de carga medida no laboratório ( $h_f$  observada), em tubos da linha Irrigação com diâmetro nominal de 75mm.

Figura 13 - Perda de carga observada versus estimada pela equação de Darcy-Weisbach utilizando dados de rugosidade relativa avaliadas no sentido longitudinal e transversal nos tubos da linha Irrigação com diâmetro nominal de 75mm.



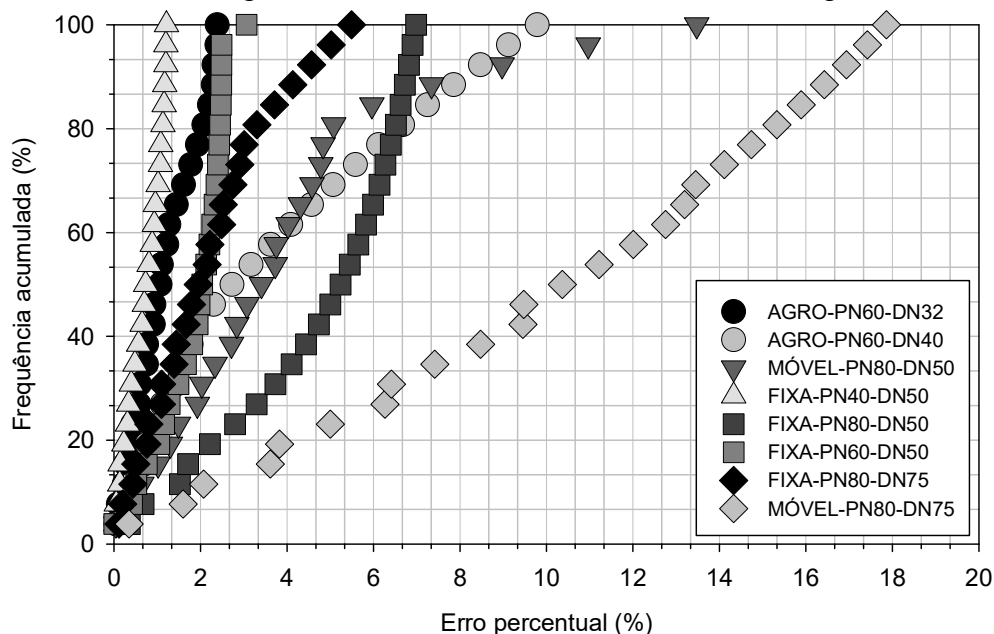
Os ensaios realizados em tubos da linha FIXA-PN80-DN75 apresentou dados com boa aderência a reta 1:1. Os índices de concordância, correlação, e desempenho ficaram na faixa de 0,99, e, também, não houve diferença nos índices estatísticos ao variar os dados de rugosidade de acordo o seu sentido de medição do fluxo.

Os dados obtidos nos tubos da linha MÓVEL-PN80-DN75 apresentaram boa correlação dos dados estimados. Os índices de desempenho e concordância apresentaram o menor valor ao comparar com todos os tubos ensaiados neste estudo, com valores de  $d= 0,9808$  e  $c= 0,9806$ , entretanto os seus resultados podem ser considerados “Excelentes”.

Os tubos da Linha Agropecuário e Irrigação analisados neste estudo, apresentaram resultados semelhantes no que se refere ao uso do valor de rugosidade medido em sentido transversal ou longitudinal ao fluxo. As Figuras 11, 12 e 13, destacam a semelhança na perda de carga estimada pela equação de Darcy-Weisbach com a rugosidade medida em sentido transversal ou longitudinal ao fluxo, comparada com a perda de carga medida em laboratório pela pressão diferencial entre dois pontos. A partir dos resultados obtidos, pode-se aderir a hipótese de haver uma regularidade nas condições físicas e assumir que o fluxo é governado pela força unidirecional, ou seja, somente pelo sentido longitudinal ao fluxo (MARUSÍĆ-PALOKA; PAZANI, 2020).

Na Figura 14, demonstra-se a frequência acumulada do erro percentual, ao comparar a perda de carga calculada pela equação de Darcy-Weisbach com dados de rugosidade medido em sentido longitudinal ao fluxo, em relação a perda de carga medida em laboratório.

Figura 14 - Frequência acumulada do erro percentual entre a perda de carga observada com a perda de carga estimada pela equação de Darcy-Weisbach utilizando dados de rugosidade relativa medidas em sentido longitudinal ao fluxo.

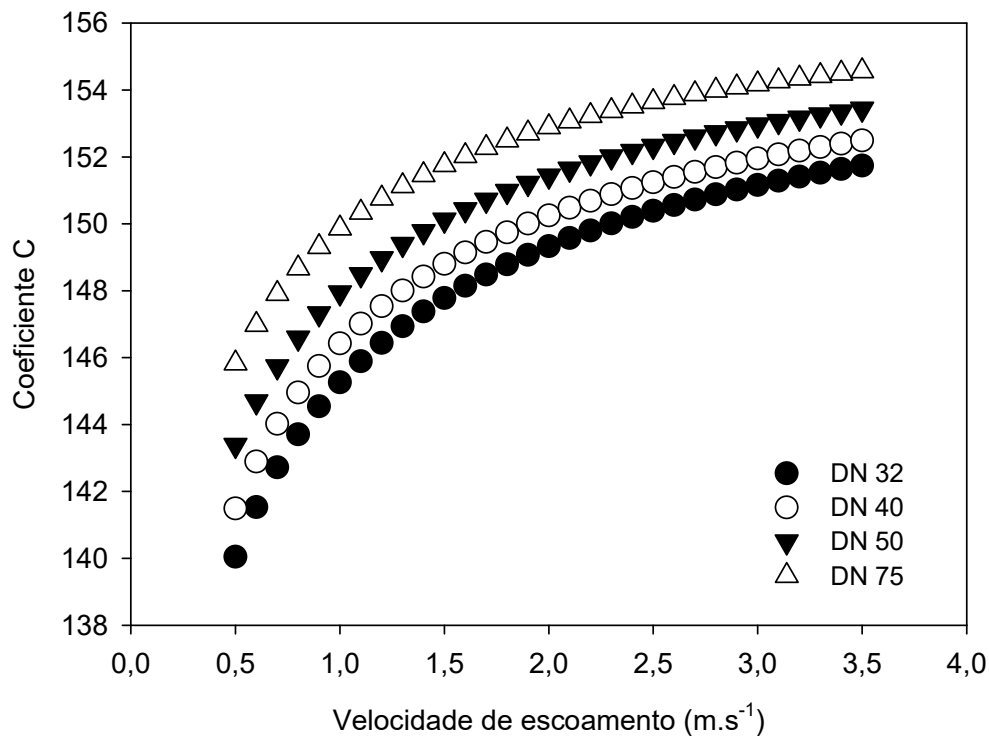


Os maiores erros percentuais são observados em tubos da linha Irrigação do tipo Móvel. Nos tubos PN80-DN75 e PN80-DN50, os erros máximos verificados são de 17,9% e 13,5% respectivamente. Os tubos da linha Agropecuário analisados neste ensaio apresentaram erros abaixo de 1,27% e 4,08% nos diâmetros nominais 32 e 40mm, com probabilidade de ocorrência de 61,5%.

#### 4.3 COEFICIENTES DAS EQUAÇÕES EMPÍRICAS CALCULADOS PELAS SUAS RESPECTIVAS FÓRMULAS.

Na Figura 15, demonstra-se os resultados do coeficiente C da fórmula de Hazen-Williams, estimado pela Equação 15, em função da velocidade de escoamento de 0,5 a 3,5  $\text{m.s}^{-1}$  para os tubos de PVC com diâmetros nominais de 32, 40, 50 e 75 mm. Os valores calculados estão de acordo com os valores de "C" encontrados por Sampaio et al. (2000, 2001, 2007), em seu trabalho comparando a perda de carga em tubulações conduzindo água pura e residuária.

Figura 15 - Coeficiente C estimado, para o cálculo da perda de carga pela equação de Hazen-Williams em diferentes velocidades de fluxo e diâmetros dos tubos de PVC.

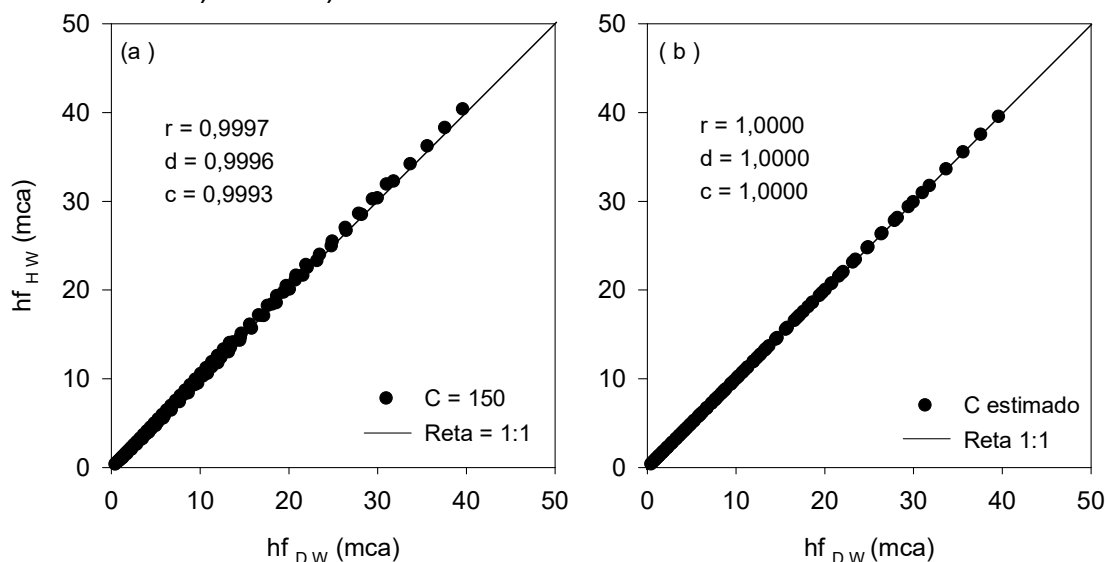


Através da Figura 15, é possível analisar que o coeficiente  $C$  elevou-se com o aumento do diâmetro da tubulação e velocidade de escoamento, variando de 140 a 155 no intervalo estudado. De modo geral, o coeficiente  $C$  é fixado a 150 para o cálculo da perda de carga em tubos de PVC (URIBE et al., 2015), o que pode trazer erros ao calcular este parâmetro (CARVALHO et al., 2009).

Na Figura 16, demonstra-se os resultados da perda de carga pela equação de Hazen-Williams com o coeficiente  $C$  estimado pela equação proposta (Eq. 15), e fixado em 150, comparados com a perda de carga calculada pela equação de Darcy-Weisbach, em função da velocidade de escoamento de 0,5 a 3,5 m.s<sup>-1</sup> para os tubos de PVC com diâmetros nominais de 32, 40, 50 e 75 mm. Os dados são comparados pela reta 1:1, índices de correlação, concordância e desempenho.

De acordo com a Figura 16, os dados apresentam boa aderência à reta 1:1 e os índices estatísticos igual a 1,00, para o cálculo com o coeficiente  $C$  estimado, observa-se melhores resultados em comparação ao uso do valor fixado em 150.

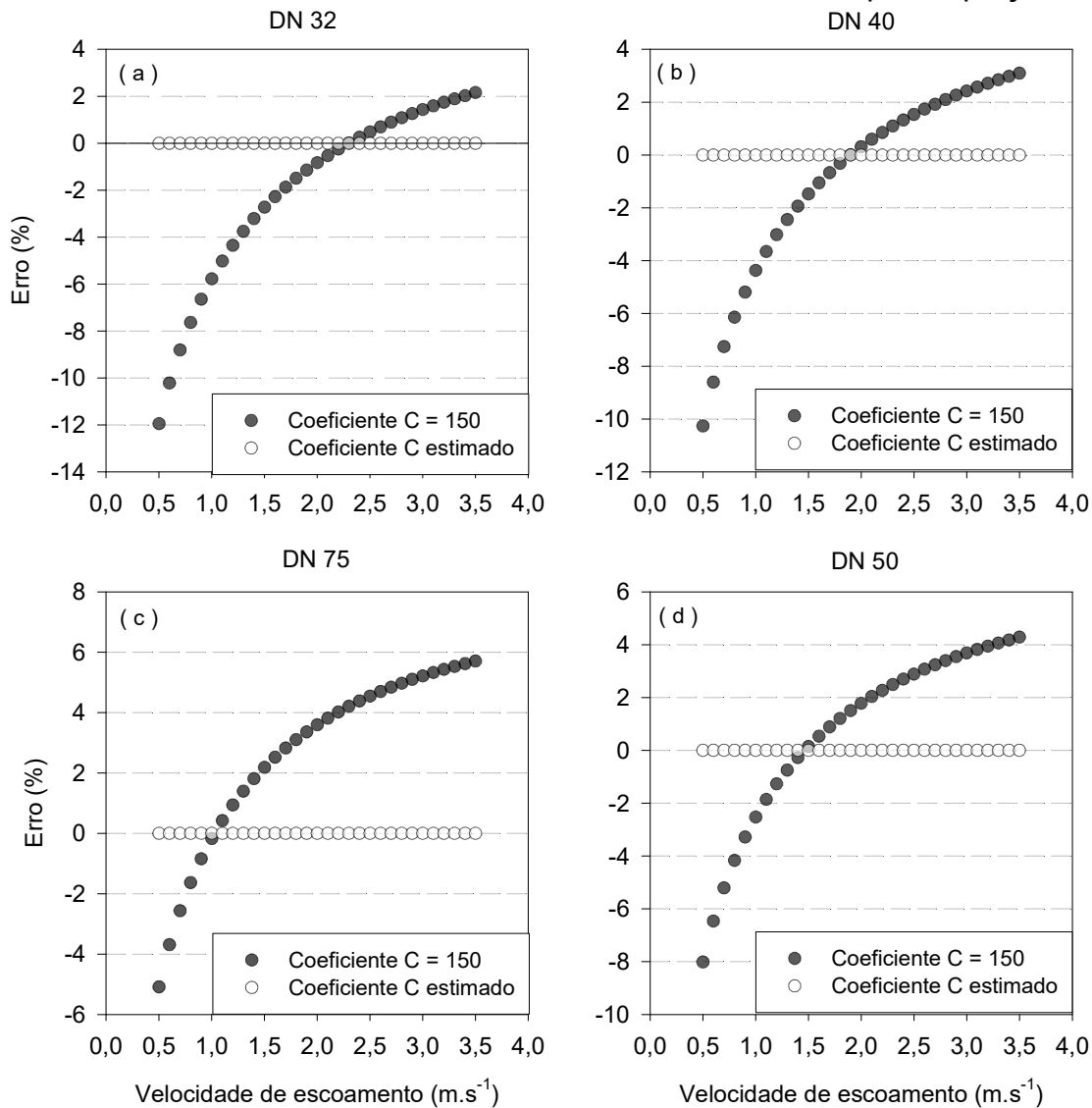
Figura 16 - Perda de carga calculada pela equação de Darcy-Weisbach versus a perda de carga calculada pela equação de Hazen-Williams com o coeficiente  $C$  fixado em a) 150 e b) estimado.



Na Figura 17 demonstra-se os resultados do erro percentual de perda de carga gerados a partir da equação de Hazen-Williams com o coeficiente  $C$

estimado (Equação 15) e o seu valor fixado em 150, comparados com a perda de carga calculada pela equação de Darcy-Weisbach.

Figura 17 - Erro percentual da perda de carga calculada pela equação de Hazen-Williams usando o coeficiente C com valor de 150 e estimado pela equação 15.



Fonte: Autor

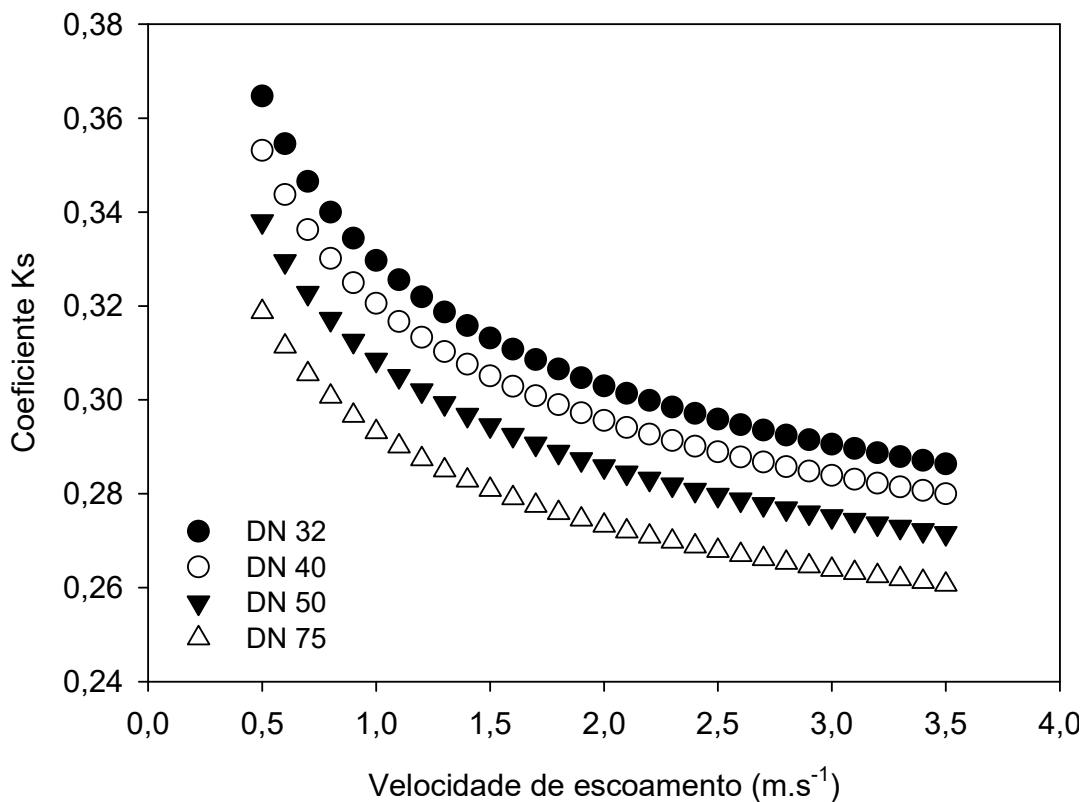
A perda de carga calculada pela equação de Hazen-Williams com seu coeficiente fixado em 150 subestimou e superestimou os seus resultados quando comparada com os resultados obtidos pela fórmula Universal, nos diâmetros e velocidades analisados. Os maiores erros percentuais são observados no diâmetro de 32 mm com a perda de energia subestimada em até 12%, e no diâmetro nominal de 75 mm com a perda superestimada em 6% na velocidade de escoamento de  $3,5 \text{ m.s}^{-1}$ . Os resultados de perda de carga apresentados na

figura 18, com o coeficiente C estimado pela fórmula ajustada neste trabalho (equação 15), não proporcionou erro em nenhum momento nas simulações realizadas.

Miranda et al., (2019) em seu trabalho, identificou que com o aumento da vazão a perda de carga contínua determinada pelo método de Hazen-Willians passa a ser maior que o método de Darcy-Weisbach. Usando a Equação de Hazen-Willians em simulações realizadas para tubos de PVC, com o coeficiente “C” fixado em 140, as maiores diferenças entre os dois métodos foram de 17,6%, 16,98%, 19,79% e 21,38%, respectivamente, para os diâmetros internos de 0,0508 m, 0,0762 m, 0,1016 m e 0,12 m.

Na Figura 18, demonstra-se os resultados do coeficiente Ks da equação de Scobey em função da velocidade de escoamento para os tubos de PVC com diâmetros nominais de 32, 40, 50 e 75 mm, que foram obtidos pela equação proposta neste estudo (equação 18).

Figura 18 - Coeficiente Ks da equação de Scobey estimado para diferentes velocidades de fluxo e diâmetros dos tubos de PVC.



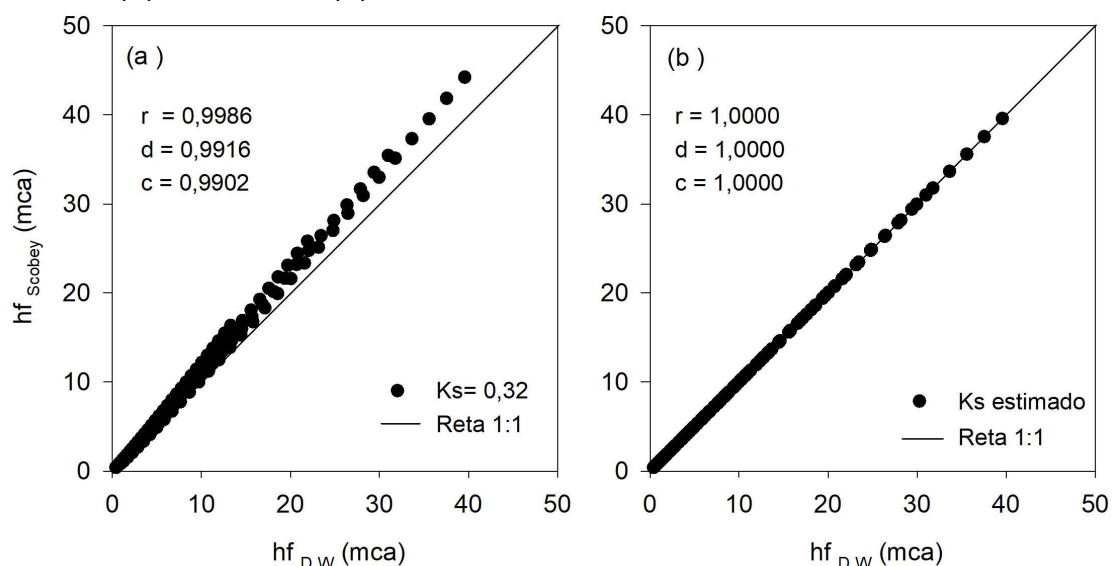
Fonte: Autor



Pode-se analisar na figura 18 que o coeficiente  $K_s$  apresentou um comportamento inverso ao que foi observado com o coeficiente  $C$  (figura 16). Neste caso, o coeficiente de perda de carga da equação empírica de Scobey diminui com o aumento do diâmetro da tubulação e da velocidade de escoamento.

Na Figura 19 demonstra-se os resultados das perdas de carga pela equação empírica de Scobey com o coeficiente  $K_s$  estimado pela Equação 18 e fixado em 0,32, comparados com a perda de carga calculada pela equação de Darcy-Weisbach ( $hf_{DW}$ ). Os dados são analisados através da reta 1:1, índices de correlação, concordância e desempenho.

Figura 19 - Perda de carga calculada pela equação de Darcy-Weisbach, versus a perda de carga calculada pela equação de Scobey com o coeficiente  $K_s$  fixo em 0,32 (a) e estimado (b).



Fonte: Autor

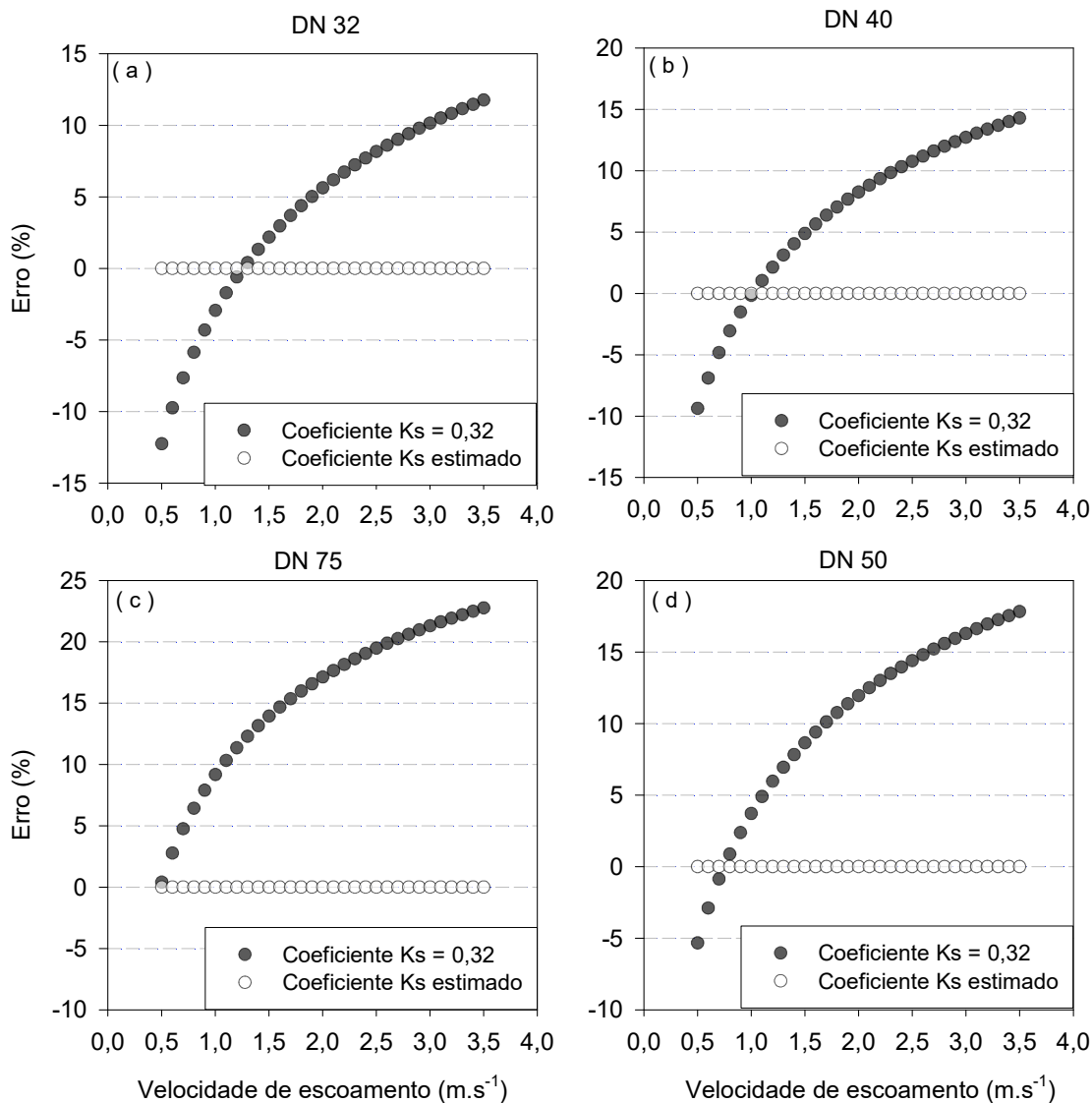
Pode-se analisar através das simulações demonstradas na figura 15 que o uso do coeficiente calculado pela equação 18 apresenta melhores resultados do que o uso de um valor fixo para determinado material. Os dados de perda de carga calculada pela equação empírica de Scobey com o coeficiente estimado (Figura 19b) pela equação proposta neste estudo (Equação 18), apresentou melhor aderência a reta 1:1 e índices estatísticos superiores em relação aos resultados obtidos com a aplicação do coeficiente com valor fixo igual a 0,32.

Na Figura 20, demonstra-se os resultados do erro percentual de perda de carga gerados a partir da equação de Scobey com o coeficiente  $K_s$  calculado

pela equação proposta e fixado em 0,32, comparados com a perda de carga calculada pela equação de Darcy-Weisbach.

Pode-se analisar que a determinação da perda de carga com a equação empírica de Scobey com o coeficiente estimado, não apresentou erros em todos os diâmetros e velocidades de escoamento analisadas.

Figura 20 - Erro percentual da perda de carga calculada pela equação de Scobey usando o coeficiente  $K_s$  com valor de 0,32 e estimado pela equação 18.



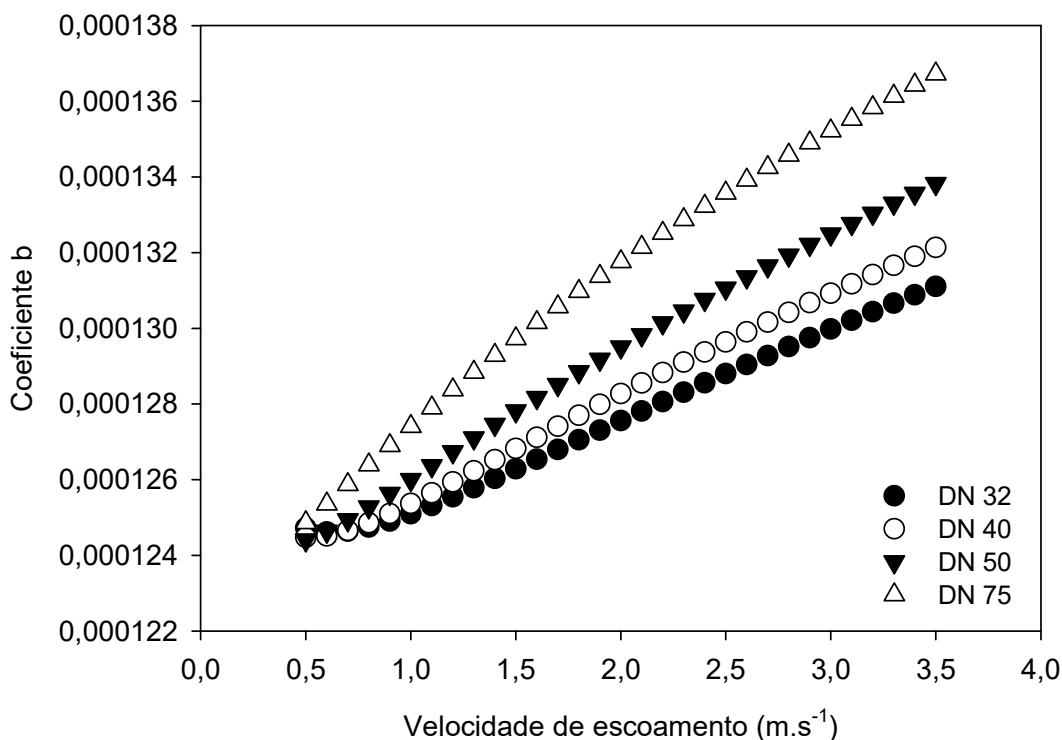
Fonte: Autor

A determinação da perda de carga com a equação empírica de Scobey com o coeficiente fixo, apresentou erros em todos os diâmetros analisados. Os erros percentuais nos tubos com diâmetros nominais de 32, 40 e 50 mm subestimaram e superestimaram os valores chegando até 22%. Já no diâmetro

nominal de 75 mm os valores ficaram somente superestimados. Observa-se no intervalo de 0,5 a 3,5 na velocidade de escoamento, o erro percentual causado no resultado de perda de carga varia em torno de 20 a 30%. Entretanto, estudos anteriores já constataam que a equação de Scobey aplicada em diâmetros inferiores a 50 mm, apresentam erros percentuais maiores que 20% na estimativa perda de carga (NETO, 2016).

Na Figura 21 demonstra-se os resultados do coeficiente b da equação de Flamant em função da velocidade de escoamento para os tubos de PVC com diâmetros nominais de 32, 40, 50 e 75 mm, obtidos pela equação proposta neste estudo (equação 21).

Figura 21 - Coeficiente b da equação de Flamant em diferentes velocidades de fluxo e diâmetros nos tubos de PVC.



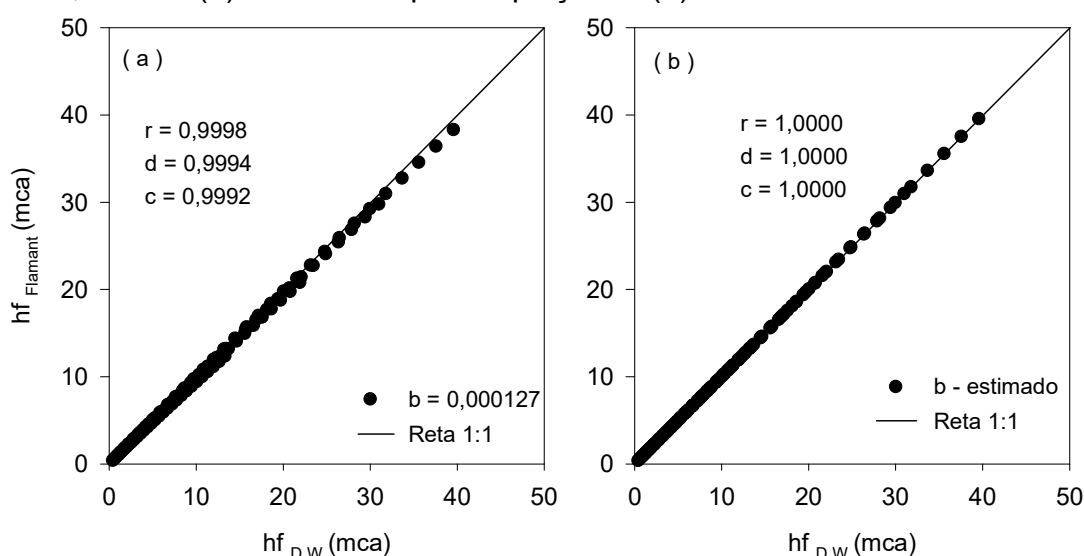
Fonte: Autor

Pode-se analisar na figura 21 que o valor do coeficiente b da equação de Flamant cresce com o aumento do diâmetro da tubulação e a velocidade de escoamento. Neste caso, com diâmetro variando de 32 à 75 mm e a velocidade de escoamento num intervalo de 0,5 a 3,5 m.s<sup>-1</sup>, o coeficiente variou de 0,000124 a valores de aproximadamente 0,000137. Além do mais, os dados são aplicados

aos tubos de PVC que geralmente se utiliza um valor fixo de 0,000127 para o cálculo, trazendo variações em comparação com equações mais precisas.

Na Figura 22 demonstra-se os resultados da perda de carga pela equação de Flamant com o coeficiente  $b$  estimado pela equação proposta e fixado em 0,000127, comparados com a perda de carga calculada pela equação de Darcy-Weisbach ( $hf_{DW}$ ), onde os dados são comparados pela reta 1:1, índices de correlação, concordância e desempenho.

Figura 22 - Perda de carga calculada pela equação de Darcy-Weisbach, versus a perda de carga calculada pela equação de Flamant com o coeficiente  $b$  fixo em 0,000127 (a) e estimado pela Equação 21(b).



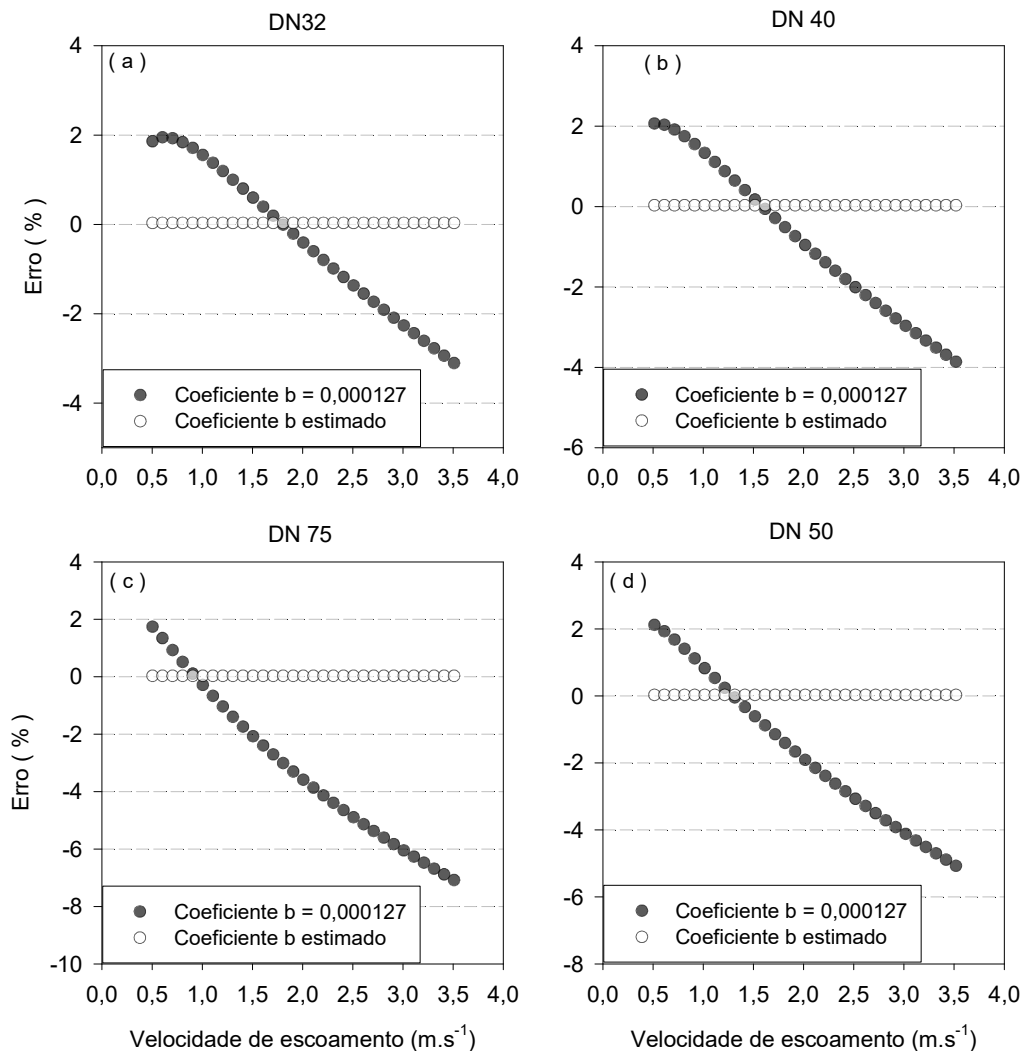
Fonte: Autor

Pode-se analisar na Figura 22, que a perda de carga calculada pela equação empírica de Flamant, com o coeficiente  $b$  ajustado ou fixo, apresentou índices estatísticos similares. Apesar de ambos resultados apresentarem boa aderência a reta 1:1, os melhores resultados são observados com valor de  $b$  estimado.

Na Figura 23, demonstra-se os resultados dos erros percentuais da perda de carga obtida a partir da equação de Flamant com o coeficiente  $b$  calculado pela equação proposta e fixado em 0,000127, comparados com a perda de carga calculada pela equação de Darcy-Weisbach.

Observa-se que os resultados de perda de carga encontrados na equação de Flamant, com seu coeficiente  $b$  estimado pela equação proposta neste estudo (Equação 21) apresentaram menores erros percentuais ao invés do uso do coeficiente fixo de 0,000127, quando aplicada a tubos de PVC.

Figura 23 - Erro percentual da perda de carga calculada pela equação de Flamant com o coeficiente  $b$  igual a 0,000127 e estimado pela equação proposta neste trabalho.



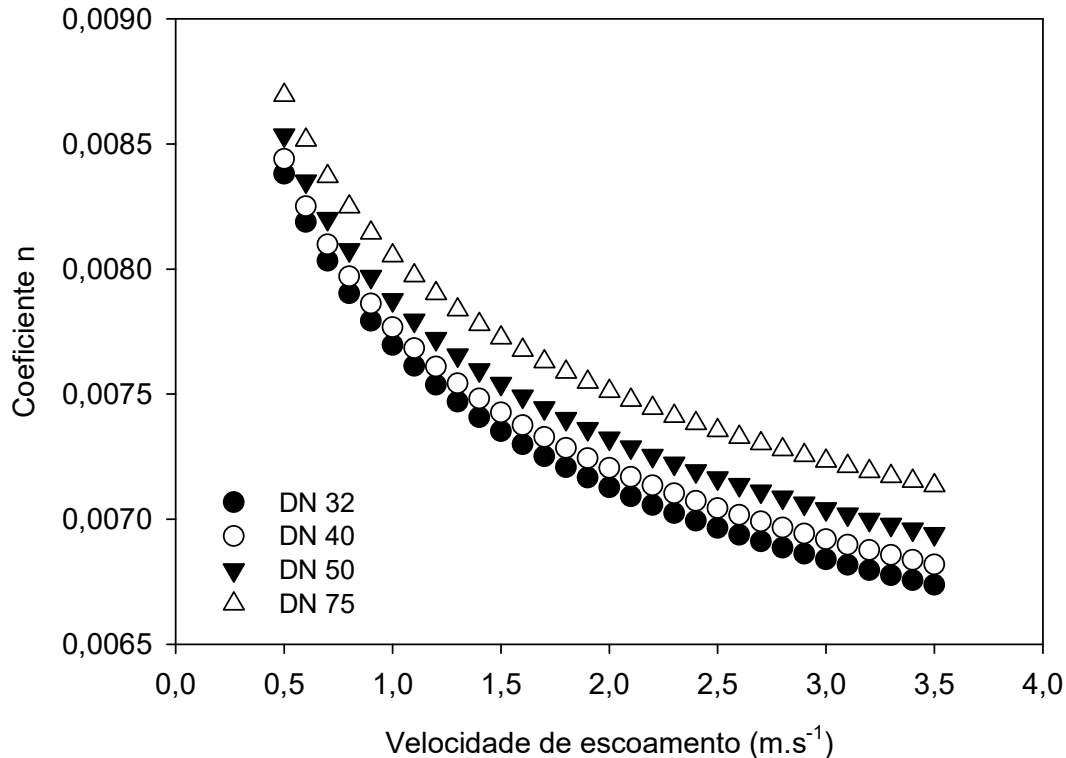
Fonte: Autor

Os resultados de perda de carga encontrados pela equação empírica de Flamant com o seu coeficiente fixado, apresentou erros percentuais que variam de 2 a -7% na faixa de diâmetro em estudo, quando comparada com a perda de carga calculada pela equação Universal. O uso do coeficiente da equação de Flamant,  $b$ , igual a 0,000127 proporciona menores erros para tubulações de até 75 mm de diâmetro com qualquer velocidade de fluxo (SOUSA, 2018).

Entretanto, a faixa de erros encontrada foi menor do que nas equações empíricas de Hazen-Williams, Scobey e Manning, (figuras 17 e 20) quando utilizado seu respectivo coeficiente fixo de acordo o material da tubulação.

Na Figura 25 demonstra-se os resultados do coeficiente  $n$  da equação de Manning em função da velocidade de escoamento para os tubos de PVC com diâmetros nominais de 32, 40, 50 e 75 mm, que foram obtidos pela equação 24.

Figura 24 - Coeficiente  $n$  da equação de Manning em diferentes velocidades de fluxo e diâmetros dos tubos de PVC.



Fonte: Autor

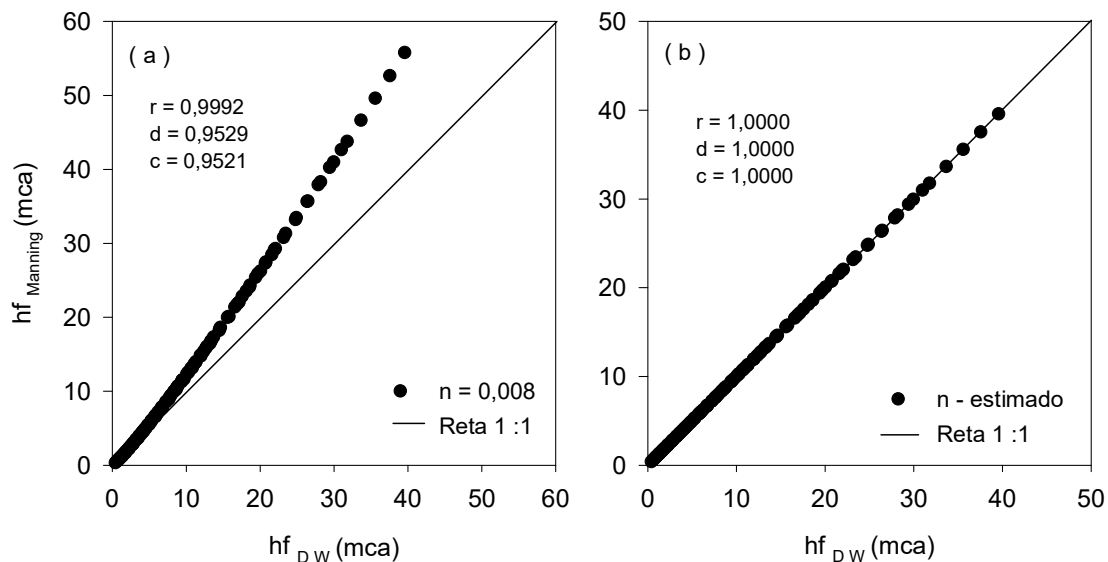
A partir da figura 25, observa-se que o coeficiente  $n$  variou em diferentes velocidades de fluxo da água e diâmetros de tubulações com mesmo material de fabricação. O valor de  $n$  aumentou com o aumento do diâmetro da tubulação e diminuiu, cerca de 25%, com o aumento da velocidade de escoamento de 0,5 a 3,5 m.s<sup>-1</sup>.

Os valores encontrados são diferentes dos descritos na literatura (CUNLIFFE et al. 2021; BISHOP; JEPPSON, 1975). Contudo os valores encontrados estão relacionados com as propriedades do material e as características do escoamento e não somente pela rugosidade da tubulação.

Na Figura 26 demonstra-se os resultados da perda de carga pela equação de Manning com o coeficiente  $n$  estimado pela equação proposta, e fixado em 0,008. Comparando-se com a perda de carga calculada pela equação de Darcy-

Weisbach ( $hf_{DW}$ ). Os dados são comparados pela reta 1:1, índices de correlação, concordância e desempenho.

Figura 25 - Perda de carga calculada pela equação de Darcy-Weisbach, versus a perda de carga calculada pela equação de Manning com o coeficiente  $n$  fixado em 0,008 (a) e estimado (b).

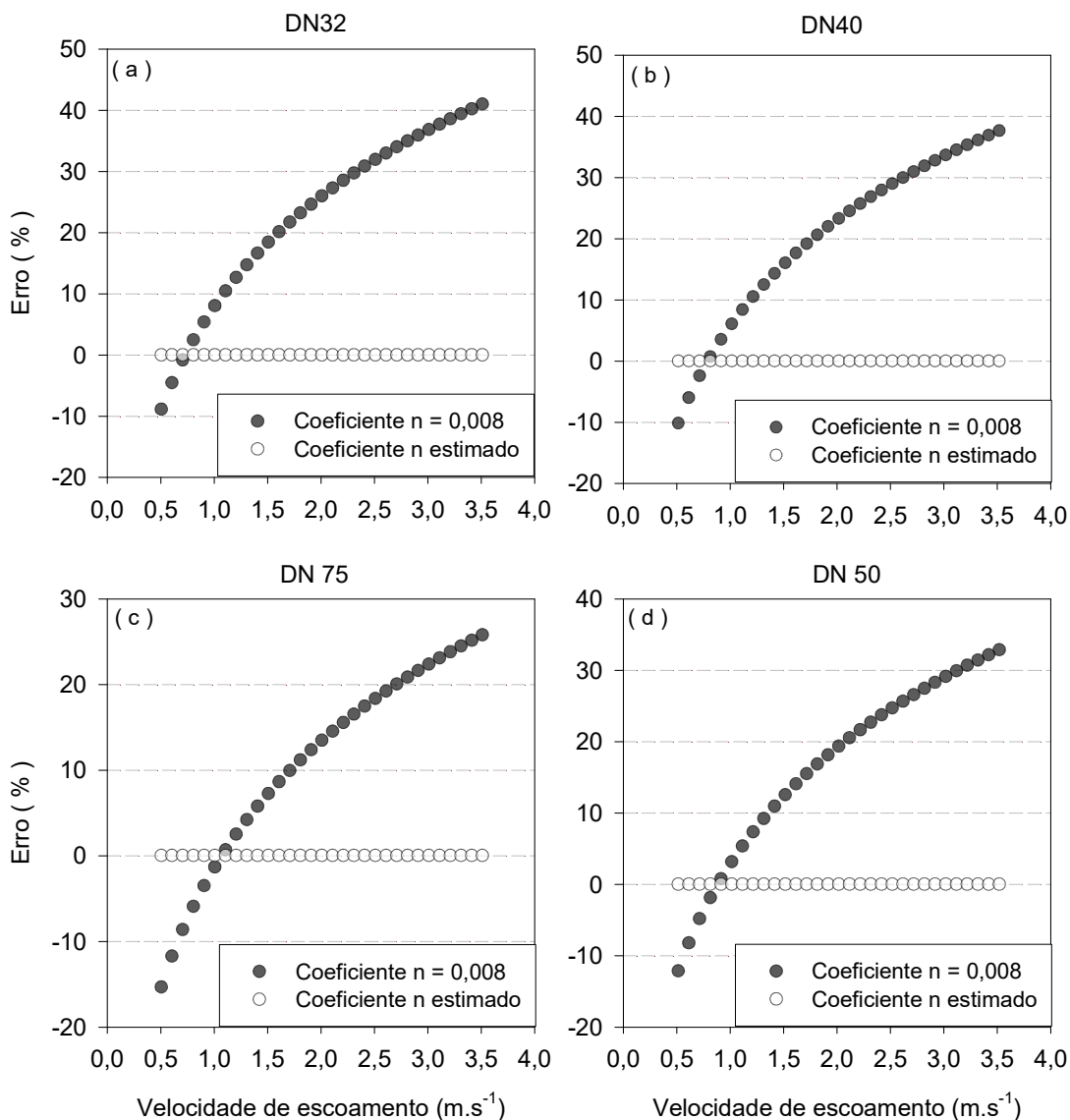


Fonte: Autor

Entre todas as equações empíricas estudadas, a de Manning foi a que em seu coeficiente fixo apresentou o maior desvio em relação a reta 1:1. Mesmo com os dados apresentando boa correlação,  $r = 0,9992$ , na Figura 21a, os índices de concordância e desempenho apresentaram valores de aproximadamente 0,95, em comparação com a perda de carga calculada pela equação de Darcy-Weisbach.

Na Figura 27, demonstra-se os resultados do erro percentual de perda de carga gerados a partir da equação de Manning com o coeficiente  $n$  calculado pela equação proposta (Eq. 24), e o seu valor fixado em 0,008. Ambos resultados foram comparados com a perda de carga calculada pela equação de Darcy-Weisbach. Pode-se analisar que os erros percentuais da perda de carga com o coeficiente fixo foram superiores na Equação Manning em relação as outras equações empíricas, figuras 17, 20 e 23, com o coeficiente da equação fixado.

Figura 26 - Erro percentual da perda de carga calculada pela equação de Manning usando o coeficiente  $n$  com valor de 0,008 e estimado pela equação 24.



Fonte: Autor

A fórmula de Manning com o coeficiente  $b$  fixado em 0,008, apresenta erros elevados em comparação com a equação Universal de perda de carga. No diâmetro nominal de 32m, os erros percentuais chegaram a 40% em velocidades superiores a 3,0 m.s<sup>-1</sup>. Em tubos DN 40, 50 E 75mm, os resultados ficaram subestimados em mais de 10%. O coeficiente fixo da equação de Manning é uma representação pura da rugosidade da tubulação (CUNLIFFE et al. 2021), justificando os devidos erros para estimar a perda de energia em tubulações pressurizadas. Além disso, as novas correlações são mais amplamente aplicáveis, pois se concentram no comportamento geral do fluxo de fluido e não



se limitam a uma aplicação específica (CUNLIFFE et al. 2021, p.2). Portanto, aplicações do coeficiente  $b$ , estimados pela equação proposta neste estudo (Equação 24), pode-se tornar uma excelente alternativa para minimizar os erros em seus resultados.

## 5 CONCLUSÕES

A rugosidade da parede interna dos tubos de PVC da linha Agropecuário medida em sentido transversal e longitudinal em relação ao comprimento do tubo apresentaram diferença significativa em seus valores. Entretanto a diferença no valor de rugosidade em ambos os sentidos apresentou o mesmo comportamento quando realizada a determinação da perda de carga pela equação de Darcy-Weisbach e comparada com dados medidos.

As equações desenvolvidas para a determinação dos coeficientes das equações de Hazen-Williams, Scobey, Flamant e Manning, apresentaram melhor desempenho e menores erros percentuais quando comparado ao uso de um coeficiente fixo de acordo o material de fabricação dos tubos, possibilitando obter resultados similares aos obtidos com a equação Universal de perda de carga.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABO-GHOBAR, H. M., Friction Coefficient for Center Pivot Systems, Journal of King Saud University. **Engineering Sciences**, v. 7, p. 139-148. 1995.

AYENSA-JIMÉNEZ, J.; DOWEIDAR, M. H.; SANZ-HERRERA, J. A.; DOBLARÉ, M. Prediction and identification of physical systems by means of Physically-Guided Neural Networks with meaningful internal layers. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 381, 2021.

ALAZBA, A. A.; MATTAR, M.A.; ELNESR, M.N.; AMIN, M.T. Field assessment of friction head loss and friction correction factor equations. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 167, 2012.

ALLEN, R. G. Relating the Hazen-Williams and Darcy-Weisbach friction loss equations for pressurized irrigation. **American Society of Agricultural Engineers**. v. 12, 1996.

ALMEIDA, A. **Perda de carga em peças especiais de sistemas de irrigação por aspersão convencional**. 1995. 105p. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil. Campinas, SP. 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISSO 3274**: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil – Características nominais de instrumentos por contato (pontas de apalpação). Rio de Janeiro, pág. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4288**: Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Regras e procedimentos para a avaliação de rugosidade. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287**: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15282**: Sistemas móveis de irrigação – Tubos de PVC rígido com junta de engate rápido PN 80. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14654**: Irrigação e drenagem – Tubos agropecuários de PVC rígido com junta soldável PN60 e PN80. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR14311**: Irrigação e drenagem - Tubos de PVC rígido DEFOFO PN 60,80 e 125 com junta elástica, para sistemas permanentes de irrigação. Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR14312**: Irrigação e drenagem - Tubos de PVC rígido com junta soldável ou elástica PN 40 e PN 80 para sistemas permanentes de irrigação. Rio de Janeiro, 1999.

ASSY, T. M. **O emprego da fórmula universal de perda de carga e as limitações das fórmulas empíricas**. São Paulo: CETESB, 1997.

AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNANDEZ Y FERNANDEZ, M. **Manual de hidráulica**. 9. ed. São Paulo: Blucher, 632p. 2015.

BARDESTANI, S.; GIVEHCHI, M.; YOUNESI, E.; SAJJADI, S.; SHAMSHIRBAND, S.; PETKOVIC, D. Predicting turbulent flow friction coefficient using ANFIS technique. **Springer**, v. 11, p.341-347, 2017.

BEZZERA, A. A.; CASTRO, M. A. H. C.; ARAÚJO, R. S. A.; Absolute roughness calculation by the friction factor calibration using the Alternative Hydraulic Gradient Iterative Method on water distribution networks. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, 2017.

BISHOP, R.R., JEPSON, R.W. **Hydraulic characteristics of PVC sewer pipe in sanitary sewers**. State University, Utah. 1975.

BUSSE, A.; LUTZNER, M.; SANDHAM, N. D.; **Direct numerical simulation of turbulent flow over a rough surface based on a surface scan**. **Computers & Fluids**, v. 116, p. 129–147, 2015.

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

CARVALHO, J. A; AQUINO, R. F.; PEREIRA, G. M.; RODRIGUES, R. C.; CAMPOS, T. B. Perda de carga em tubos de PVC conduzindo água residuária do processamento de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, p. 811–817, 2009.

CHURCHILL, S. W. Friction-factor equation spans all fluid-flow regimes. **Chemical Engineering**, v.84, n.24, p. 91 – 92, 1977.

COELHO, A. P; ZANINI, J. R; FARIA, R. T.; DALRI, A. B; PALARETTI, L. F. Comparação de equações para estimativa da perda de carga em tubulação de polietileno. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, v.11, n. 1, p. 25-31, 2018.

COLEBROOK, C. F. Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws. **Journal of the Institution of Civil Engineers**, v. 11, n. 4, p. 133-156,1939.

CUNLIFFE, C. J.; DODDS, J. M.; DENNIS, D. J. C. Flow correlations and transport behaviour of turbulent slurries in partially filled pipes. **Chemical Engineering Science**, v. 235, 2021.

D'AMBROSIO, C.; LODI, A.; WIESE, S.; BRAGALLI, C. Mathematical programming techniques in water network optimization. **European Journal of Operational Research**, v. 243, n. 3, p. 774-788, 2015.

DUBA, J. G. **A correlation of formulas for the flow of fluids in pipes**. 1949. 85p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Minas e Metalurgia da Universidade do Missouri. Missouri, EUA. 1949.

ELYAMANY, A. H.; EL-NASHAR, W. Y. Estimating life cycle cost of improved field irrigation canal. **Water Resources Management**, v. 30, n. 1, p. 99-113, 2015.

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

GERRARD, J. H. An experimental investigation of pulsating turbulent water flow in a tube. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 46, n. 1, p. 43-64, 1971.

GHUMATKAR, A.; BUDHE, S.; SEKHAR, R.; BANEJA, M. D.; BARROS, S. Influence of Adherend Surface Roughness on the Adhesive Bond Strength. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 13, n. 13, 2016.

GOMES, H.P. **Engenharia de irrigação**. Editora UFPB, 2 ed., 390 p., 1997.

GOMES, H. P. **Engenharia de irrigação: hidráulica dos sistemas pressurizados, aspersão e gotejamento**. Editora UFPB, 3 ed., 412p., 1999.

HAKTANIR, T.; ARDICHOGLU, L. Numerical modeling of Darcy–Weisbach friction factor and branching pipes problem. **Advances in Engineering Software**, v. 35, n. 12, p.773-779, 2004.

HIDALGO, M. Á. M.; ALANDI, P. P.; ÁLVAREZ, J. F. O.; MARTÍN-BENITO, J. M. T. Calibration of On-Demand Irrigation Network Models. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 134, n. 1, 2008.

HOUGHTALEN, R. J.; OSMAN, A.; HWANG, N. H. **Fundamentals of hydraulic engineering systems**. Prentice Hall New York, 2016.

JABER, S. A.; RUGGIERO, A.; BATTAGLIA, S.; AFFATATO, S. On the roughness measurement on knee prostheses. **The International Journal of Artificial Organs**, v.38, n.1, 2015.

JAFAR JAFARI-ASL, GHOLAMREZA AZIZYAN, SEYED ARMAN HASHEMI MONFARED, MOHSEN RASHKI, ANTONIO G. ANDRADE-CAMPOS, Anenhanced binary dragonfly algorithm based on a V-shaped transfer function for optimization of pump scheduling program in water supply systems (case study of Iran). **Engineering Failure Analysis**, v.123, 2021.

JEREZ, D.J.; JENSEN, H. A.; BEER, M.; BROGGI, M. Contaminant source identification in water distribution networks: A Bayesian framework. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v.159, 2021.

JERIN, A.; KARUNAKARAN, K. Machinability investigation and optimizing process parameters in ECM of stainless steel –12X18H10T for minimizing surface roughness, **Materials Today: Proceedings**, 2021.

JIMENEZ, J. Turbulent flows over rough walls. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 36, p.173-196, 2004.

KAMAND, F. Z. Hydraulic friction factors for pipe flow. **Journal of Irrigation And Drainage Engineering.**, v. 114, n.2, p.311–323, 1988.

KELLNER, E.; AKUTSU, J.; REIS, L. F. R.; Avaliação da rugosidade relativa dos tubos de PVC com vistas ao dimensionamento das redes de distribuição de água. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 2, 2016.

KLIMES, L.; POSPÍSIL, J.; STETINA, J.; KRACÍK, P. Semi-empirical balance-based computational model of air-cooled condensers with the A-frame layout, **Energy**, v. 182, p. 1013-1027, 2019.

KIM, B.; CHOI, M.; KIM, G.; KIM, H. Evaluation and Analysis of Characteristics for Hazen-Williams C Based on Measured Data in Multi-Regional Water Supply Systems. **Journal of Korean Society of Water and Wastewater**, v. 30, n. 2, 2016.

KING, H. W. **Manning Formula Table**. Vol. 1 Flow in Pipes., Vol. 2 Flow in Open Channels, New York, 1937.

KING, H. W.; WISLER, C. O. **Hydraulics**, New York, 1922.

KUN, D.; TIAN-YU, L.; JUN-HUI, W.; JIN-SONG, G. Inversion model of water distribution systems for nodal demand calibration. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 141, n. 9, 2015.

LEA, F. C. **Hydraulics**. New York.1908.

LI, Y.; LINKE, B. S.; VOET, H.; FALK, B.; SCHMITT, R.; LAM, M. Cost, sustainability and surface roughness quality – A comprehensive analysis of products made with personal 3D printers. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, 2017.

LI, X.; HE, L.; LUO, X.; LIU, H.; HE, S.; LI, Q. Numerical simulation and experimental study of bypass pigging slippage. **Ocean Engineering**, v. 230, 2021.

LIMA, F. A.; CÓRCOLES, J. I.; TARJUELO, J. M.; MARTÍNEZ-ROMERO, A. Model for management of an on-demand irrigation network based on irrigation

scheduling of crops to minimize energy use (Part II): Financial impact of regulated deficit irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 215, p.44-54, 2019.

LUMBROSO, D.; GAUME, E. Reducing the uncertainty in indirect estimates of extreme flash flood discharges, **Journal of Hydrology**, v. 414, p.16-30, 2012.

MAOSHENG, G.; PUTE, W.; DELAN, Z.; ZHANG, L.; CAI, Y. Optimized configuration of a hose reel traveling irrigator, **Agricultural Water Management**, v. 240, 2020.

MARUSIC-PALOKA, E.; PAZANIN, I. Effects of boundary roughness and inertia on the fluid flow through a corrugated pipe and the formula for the Darcy Weisbach friction coefficient. **International Journal of Engineering Science**. v. 152, 2020.

MELLO, C. R.; CARVALHO, J. A. Análise da equação de perda de carga de Hazen-Williams, associada aos regimes hidráulicos para tubos de PVC e polietileno de pequeno diâmetro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, n. 3, p.247-252, 1998.

MITUTOYO. Quick guide to surface roughness measurement – Reference guide for laboratory and workshop. Boletim n. 2229, p. 1-7. USA. 2016.

MESQUITA, M.; TESTEZLAF, R.; SALCEDO, J. C.; BIZARI, D. R. Contribuição da estrutura interna na perda de carga de filtros de areia utilizados na irrigação. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 1, p. 121-130, 2012.

MINHONI, R. T. A.; PEREIRA, F. F. S.; DA SILVA, T. B. G.; CASTRO, E. R.; SAAD, J. C. C. The performance of explicit formulas for determining the darcy-weisbach friction factor. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.40, n.2, p.258-265, 2020.

MIRANDA, E. P. Programa computacional para dimensionamento e determinação dos custos de energia elétrica consumida por um sistema de irrigação localizada. 250p. Tese (Doutorado em Agronomia) Faculdade de Ciências Agrônômica da UNESP. Botucatu, 2016.

MIRANDA, E. P.; CUSTODIO, T. B. S.; LIMA, F. U.; PEREIRA, T. A.; BICUDO, A. L. R.; Ajuste da equação de Hazen-Williams para determinação da perda de carga contínua em tubulações de PVC. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial Inovagri – notas técnicas, v. 1, n. 1, p. 94-100, 2019.

MOAZENI, F.; KHAZAEI, J. Sequential false data injection cyberattacks in water distribution systems targeting storage tanks; a bi-level optimization model. **Sustainable Cities and Society**. v. 70, p. 1-14, 2021.

NAGANO, T.; KAJITA, J.; YOSHIDA, A.; AMANO, Y. Estimation of the utility value of unused heat sources for a CO2 network system in Tokyo, **Energy**, v. 226, 2021.

NASCIMENTO, V. F.; FEITOSA, E. O.; SOARES, J. I. Uniformidade de distribuição de um sistema de irrigação por aspersão via pivô central. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia-MS, v. 4, n. 4, p. 65-69, 2017.

NETO, J. L.; CRUZ, R. L.; FILHO, J. L.; PLETSCHE, T. A. Perda de carga em mangueiras gotejadoras novas e usadas. **Irriga**, Botucatu, v. 16, n. 3, p. 329-338, 2011.

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

NETO, O. R.; TAVARES, V. E. Q.; FARIA, L. C.; KOPP, L. M.; TIMM, L. C. Comportamento das equações de Scobey, Manning e Fair-Whipple-Hsiao quando utilizadas para estimativa da perda de carga em tubos com comportamento elástico. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada** v.10, n.1, p. 420 - 427, 2016.

NETTO, A.; FERNANDEZ, M. F.; ARAUJO, R.; ITO, A. E. **Manual de hidráulica**. Editora Edgard Blucher. 8º edição, São Paulo. 1998.

OLIVEIRA, A. L. B. M.; GARCIA, P. P. N. S. G.; SANTOS, P. A.; CAMPOS, J. A. D. B. Surface roughness and hardness of a composite resin: influence of finishing and polishing and immersion methods. **Materials Research**. v. 13, n. 3, 2010.

PARLIN, B. W.; LUSK, M. W.; International irrigation development: Factors affecting projects success. **Journal Society & Natural Resources**. v. 1, 2008.

PECCI, F.; STOIANOV, I.; OSTFELD, A. Relax-tighten-round algorithm for optimal placement and control of valves and chlorine boosters in water networks. **European Journal of Operational Research**. 2021.

PEREIRA, F. F. S.; DA SILVA, T. B. G.; CASTRO, E. R.; SAAD, J. C. C. O Desempenho de fórmulas explícitas para determinar o fator de fricção Darcy-Weisbach. **Revista Engenharia Agrícola**, v.40, n. 2, 2020.

PICK, F. C.; FISH, K. E.; BOXALL, J. B. Assimilable Organic Carbon Cycling within Drinking Water Distribution Systems. **Water Research**, 2021.

PIMENTA, B. D. **Análise de formulações explícitas do coeficiente de carga em condutos forçados**. 2017. 67p. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais. Santa Maria, 2017.

PIMENTA, B. D.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; KIRCHNER, J. H.; MEZZOMO, W.; TORRES, R. R. Desempenho do medidor ultrassônico de vazão em diferentes tubos de Policloreto de Vinila. **Irriga**, Botucatu, v. 23, n. 1, p. 87-95, 2018.



PINTO M. F.; Modelagem da redução de vazão em parcelas de irrigação devido ao incremento da perda de carga do sistema de filtragem. **Irriga**, Botucatu, v. 21, n. 3, p. 425-437, 2016.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. 4 ed. São Carlos: USP, 540p, 2006.

RADHAKRISHNA, A. R.; RAVIKUMAR, A. S.; DUGAD, S. B. A study on hydraulics of underground buried pipe system. **International Journal of Current Research**, v. 9, n. 8, 2017.

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

ROUSE, H. **Elementary mechanics of fluids**. Cap. 4, p. 100-140. New York, EUA. 1946.

SAMPAIO, S. C.; CILENE, K; VILAS BOAS, M. A.; QUEIROZ, M. F. DE; GOMES, B. G.; FAZOLO, A. Equação de Hazen-Williams corrigida para água residuária proveniente da suinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 1, p.5-10, 2007.

SAMPAIO, S. C.; DENICULI, W.; OLIVEIRA, R. A.; SILVA, D. D.; CECON, P. R.; PINTO, F. A. Equações de perda de carga distribuída para tubulações comerciais conduzindo água residuária de bovinocultura. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 20, n. 2, p. 108-118, 2000.

SAMPAIO, S. C.; DENÍCULI, W.; OLIVEIRA, R. A., SILVA, D. D.; MATOS, A. T.; MARTINEZ, M. A. Perda de carga contínua em tubulações conduzindo água residuária da suinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 3, p.391-396, 2001.

SANTANA, T. C.; Simulação do gradiente de energia da linha lateral com microaspersores. **Brazilian Journal of Development**. Curitiba, v. 6, n. 7, 2020.

SIMPSON, A.; ELHAY, S. Jacobian Matrix for Solving Water Distribution System. **Journal of Hydraulic Engineering**. Nota técnica. Vol.137, ed. 6. 2011.

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

SOUSA, J. S. C. Equações de perda de carga para dimensionamentos hidráulicos em projetos de irrigação pressurizada. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada** v. 12, n. 7, p.3159 - 3168, 2018.

SWEETEN, J. M. **The hydraulic roughness of an irrigation channel with decreasing spatially varied flow**. Journal American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 12, p. 466-470, 1969.

TESTEZLAF, R. **Estudo da perda de carga em tubulações e engates rápidos utilizados em linha de irrigação**. 1982. p.102. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola, 1982.

TWORT, A. C.; RATNAYAKA, D. D.; BRANT, M. J. Water Supply. In: TWORT, A. C.; RATNAYAKA, D. D.; BRANT, M. J. **Hydraulics**. 50. ed. Butterworth-Heinemann, Oxônia, Reino Unido: 2000, cap.10, p. 463 – 498.

VASCONCELOS, G. C. M. P.; COSTA, B. C. A.; ARAÚJO, J. K. Identificação do fator de atrito em rede de distribuição de água por meio do Método do Transiente Inverso - Algoritmo Genético (MTI-AG) e Fórmula de Swamee. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 980-990, 2015.

VON BERNUTH, R.D. Simple and accurate friction loss equation for plastic pipe. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, n.2, v.116, p.294-297, 1990.

VRACHIMIS, S. G.; TIMOTHEOU, S.; ELIADES, D. G.; POLYCARPOU, M. M. Leakage detection and localization in water distribution systems: A model invalidation approach. **Control Engineering Practice**. Volume 110, 2021.

WICHOWSKI, P.; SIWIEC, T.; KALENIK, M. Effect of the Concentration of Sand in a Mixture of Water and Sand Flowing through PP and PVC Elbows on the Minor Head Loss Coefficient. **Water**, v. 11, p. 01-02. 2019.

WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, J. J.; FEDDEMA, K. M.; KLINK, D. R. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v .90, n..5, p. 8995-9005, 1985.

YASMINA, L.; RACHID, L. Avaliação das perdas de energia em tubos, **American Journal of Mechanical Engineering**, vol.3, n. 3, p. 32–37, 2015.

ZITTERELL, D. B.; FRIZZONE, J. A.; NETO, O. R.; ULLMAN, M. N. Perda de carga em microtubos e conectores utilizados em microaspersão. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.4, p.591-604, 2009

ZITTERELL, D.B. **Perda localizada de carga em conectores utilizados em microirrigação**. 65 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2011.

ZHOU, K.; MAO, J.; LI, Y.; ZHANG, H.; LI, C. A numerical investigation to analyze the effect of changing ambient conditions on accurate and stable identification of thermal conductivity of ground source heat pump system using thermal response test. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, n. 46, n.10, 2021.