



Universidade Federal de São Carlos
Centro de Ciências Agrárias - CCA
Curso de Bacharelado em Agroecologia



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM SISTEMA HIDRÁULICO PARA ESTUDO
DE PERDAS DE CARGA DISTRIBUÍDAS E LOCALIZADAS.**

Discente: Tiago Rosales Matheus

Orientador: Prof^o. Dr. Ronaldo Antonio
dos Santos

ARARAS/SP

2023

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por me proporcionar esta oportunidade e todo o conhecimento adquirido ao longo desta trajetória. A minha esposa Larissa pela paciência, companheirismo e por sempre estar ao meu lado ao longo de todos estes anos me incentivando. Ao Prof^o Dr. Ronaldo Antonio dos Santos por ter me orientado nesse processo final, aos meus irmãos que a Universidade me deu, em específico, Renan Oliveira, Caio Macedo e Matheus Palhares. Aos meus familiares.

SUMÁRIO

RESUMO	3
ABSTRACT	4
LISTA DE FIGURAS	5
1. INTRODUÇÃO	6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1. Propriedades físicas dos fluídos	6
2.1.1. Fluídos	6
2.1.2. Viscosidade	7
2.1.3. Atrito externo	7
2.2. Tipos de tubos	7
2.2.1. Especificações de tubos e acessórios	7
2.2.2. Tubos de Policloreto de Vinila	8
2.2.3. Tubo de alumínio	8
2.2.4. Tubo de cobre	8
2.2.5. Tubo de aço galvanizado	9
2.2.6. tubos de ferro fundido	9
2.2.7. Tubos construídos com outros materiais	9
2.3. Perdas de cargas em condutos forçados	10
2.4. Métodos de estimativa da perda de carga contínua	11
2.4.1. Método de Hagen-Poiseuille	11
2.4.2. Método de Darcy-Weisbach	11
2.4.3. Método de Hazen-Williams	12
2.4.4. Método de Flamant	13
2.4.5. Estimativa da perda de carga em tubulações com múltiplas saídas	14
2.5. Métodos de estimativa da perda de carga localizada	14
2.5.1. Método dos comprimentos equivalentes	14
2.5.2. Método dos coeficientes	14
3. JUSTIFICATIVA	15
4. OBJETIVOS	15
4.1. Objetivo geral	15
4.2. Objetivo específico	15
5. MATERIAL E MÉTODOS	16
7. CONCLUSÃO	24
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25

RESUMO

CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM SISTEMA HIDRÁULICO PARA ESTUDO DE PERDAS DE CARGA DISTRIBUÍDAS E LOCALIZADAS.

Considerando as dificuldades de entendimento prático pelos discentes da Universidade, a relevância para a Agroecologia e a grande importância da hidráulica para a agricultura, sobretudo nas áreas de construções rurais, mecanização agrícola, hidrologia, irrigação e drenagem, entre outras, foi projetado, construído e analisado um sistema de irrigação pressurizado para demonstrar a variabilidade de perdas de carga, contínuas e localizadas, em tubos e acessórios. A perda de carga refere-se à perda de energia que um fluido, em uma tubulação sob pressão, sofre em razão de vários fatores como o atrito deste com uma camada estacionária aderida à parede interna do tubo ou em razão da turbulência devido às mudanças de direção do traçado. Essa energia da perda de carga se dissipa na forma de calor para o ambiente, em consequência da viscosidade (atrito interno das partículas do fluido) e do atrito externo (fluido com as paredes do conduto) e da turbulência do escoamento. A variabilidade da perda de carga deste sistema hidráulico foi quantificada com piezômetros, sendo os resultados obtidos comparados com dados estimados por modelos matemáticos, utilizados normalmente em hidráulica. Os resultados obtidos indicaram que as perdas de carga medidas em piezômetros eram semelhantes as estimadas pelos métodos de Darcy-Weisbach e dos coeficientes, com coeficientes de determinação e de Concordância maiores que 0,977 e 0,98%, respectivamente.

Palavras-chave: Perda de energia, fórmula universal, tipos de tubulação, fluidos.

ABSTRACT

CONSTRUCTION AND ANALYSIS OF A HYDRAULIC SYSTEM FOR THE QUANTIFICATION OF DISTRIBUTED AND LOCAL HEAD LOSS.

Considering the difficulties of practical understanding by the students of the University, the relevance to Agroecology, and the great importance of hydraulics for agriculture, especially in rural construction, agricultural mechanization, hydrology, irrigation, and drainage, among others, a pressurized system was designed, constructed, and analyzed to demonstrate the variability of continuous and localized head losses in pipes and fittings. Head loss refers to the energy loss that a fluid, in a pressurized pipeline, experiences due to various factors such as friction with a stationary layer adhered to the inner wall of the pipe or due to turbulence caused by changes in flow direction. This head loss energy dissipates in the form of heat to the surroundings, as a result of viscosity (internal friction of fluid particles) and external friction (fluid with the conduit walls) as well as flow turbulence. The variability of head loss in this hydraulic system was quantified with piezometers, and the obtained results were compared to estimated data from mathematical models commonly used in hydraulics. The obtained results indicated that the head losses measured by the piezometers were similar to those estimated by the Darcy–Weisbach equation and coefficients, with determination coefficients and agreement coefficients greater than 0.977 and 0.98%, respectively.

Keywords: Energy loss, universal formula, pipe types, fluids.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Reservatório de água, tubulação de recalque e retorno	16
Figura 2 - Registros, manômetro, piezômetros, tubulações estudadas e interruptor da motobomba	16
Figura 3 - Ventosas de recalque e retorno	17
Figura 4 - piezômetros utilizados no estudo da perda de carga.....	17
Figura 5 - Mangueira translúcida (A), tubo de ½ polegada com cotovelos (B), tubo corrugado (C), tubo de ½ polegada (D) e tubo de 1 polegada (E).....	18
Figura 6 - Condutos e respectivas vazões (Q)	20
Figura 7 - Condutos e respectivas vazões (Q)	21
Figura 8 - hf estimadas pelo método de Darcy-Weisbach e medidas em piezômetros	22
Figura 9 - Perdas de carga estimadas pelos métodos de Darcy-Weisbach e dos coeficientes e medidas em piezômetros.....	23
Figura 10 - Concordância dos valores obtidos no experimento comparado com modelos matemáticos	24

1. INTRODUÇÃO

A perda de carga, corresponde à perda de energia que um fluido, em uma tubulação sob pressão, sofre em razão de vários fatores como o atrito deste com uma camada estacionária aderida à parede interna do tubo ou em razão da turbulência devido às mudanças de direção do traçado (BRUNETTI, 2008).

Assim, as perdas de carga, contínuas e localizadas, variam em função do tipo de material adotado, da velocidade de escoamento, do diâmetro e do comprimento de tubos (AZEVEDO NETTO, et. al, 1998; GRIBBIN, 2009; PERES, 2006).

A energia da perda de carga é dissipada na forma de calor, em consequência da viscosidade (atrito interno das partículas do fluido) e do atrito externo (fluido com as paredes do conduto) e da turbulência do escoamento (FRIZZONE, 2012).

O escoamento de um fluido através de tubulações sofre a influência das paredes e de obstáculos no seu interior, dissipando a energia ao longo do conduto (AMARAL, 2016).

O estudo das perdas de carga é de suma importância, significando na minimização dos custos do projeto e maior eficiência do sistema (FONSECA et. al, 2019).

De acordo com Braun et al. (2019), o conhecimento sobre as perdas de carga em tubulações e acessórios hidráulicos são de grande importância, pois influenciam nos dimensionamentos dos projetos hidráulicos e das máquinas de fluxos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Propriedades físicas dos fluídos

2.1.1. Fluídos

É qualquer tipo de matéria com pouca resistência à deformação, podendo ser líquido, gás ou vapor. Muitas vezes o fluido é a própria substância de trabalho. Essa substância se deforma continuamente sob a ação de uma força tangencial (cisalhante), por menor que seja esta força. Portanto, o fluido tem a propriedade de escoar, como os líquidos (água, gasolina), os gases (ar, oxigênio, hidrogênio) ou como uma combinação de ambos (vapor úmido) (SILVA et al., 2018).

Desta forma, pode-se definir fluido como uma substância que se deforma continuamente, isto é, escoar, sob ação de uma força tangencial por menor que ele seja (SILVA et al., 2018).

2.1.2. Viscosidade

Viscosidade é a propriedade que determina o grau de resistência do fluido à força cisalhante, ou seja, que está relacionada com sua habilidade de fluir (JUNIOR E ALVES, 2018).

Para os líquidos, quanto mais elevada for a temperatura, menor será a viscosidade e para os gases, temperaturas elevadas fornecem maiores valores para a viscosidade (VASQUES et al., 2016; CANCIAN, 2012).

2.1.3. Atrito externo

Ao escoar em contato com uma superfície sólida, o fluido forma uma película fluída, que se adere a esta e não participa do movimento (PERES, 2006).

Desta forma, durante o escoamento, em um conduto de seção circular totalmente preenchida, também surgem camadas de fluido com distintas velocidades, com o atrito externo provocando resistência ao deslizamento, ao longo da sua superfície sólida, enquanto a máxima é registrada na parte central (RODRIGUES JUNIOR, 2019).

2.2. Tipos de tubos

2.2.1. Especificações de tubos e acessórios

Geralmente, os tubos e acessórios de uso comum são classificados por um número adimensional, denominado diâmetro nominal (DN), ou diâmetro de referência (DR), que sugere o diâmetro interno em mm, embora sem precisão.

Os tubos e acessórios também são classificados em classes de pressão, obedecendo normas brasileiras (ABNT) e internacionais (ASAE/ASABE; ISO) de especificações e ensaios;

Os tubos e acessórios são construídos com diversos tipos de materiais, dependendo da pressão interna e externa do projeto, da temperatura e características químicas do fluido, da sua resistência ao escoamento, do grau de segurança aceitável e do custo, entre outros (PERES, 2006).

2.2.2. Tubos de Policloreto de Vinila

PVC é a sigla usada para identificar o polímero de adição policloreto de vinila. Ele é obtido pela reação de polimerização de cloretos de vinila (cloroeteno) (RAUBACH, 2018).

Assim como ocorre com os outros polímeros de adição, a ligação dupla entre os carbonos é rompida, permitindo então a formação de ligações simples entre as moléculas do cloreto de vinila (PIATTI e RODRIGUES, 2005).

O PVC é o polímero mais utilizado no mundo. A sua principal aplicação é em tubos para encanamento de água e esgoto (SOUZA et al., 2009).

De acordo com Peres (2006), os tubos de PVC são empregados na condução de líquidos em temperatura ambiente, em instalações prediais, para condução de água potável e efluente, assim como na maioria dos sistemas de irrigação. Geralmente, são comercializados em barras de 6 metros, em diâmetros que variam entre 10 e 250 mm, apresentando baixa rugosidade das paredes internas, grande resistência a agentes químicos e alta durabilidade, principalmente quando protegidos da radiação solar. Entretanto, este tipo de tubo não suporta choques físicos intensos, resistindo no máximo a 1,2 MPa de pressão;

2.2.3. Tubo de alumínio

Os tubos de alumínio são manufaturados a partir de alumínio de alta qualidade, apresentando excelente resistência à corrosão, alta capacidade de troca térmica e alta capacidade de conformação (BUZINELLI, 2000).

Este tipo de tubo era muito utilizado em sistemas de aspersão portáteis, devido ao baixo peso (BERNARDO et al., 2006).

No entanto estes tubos possuem baixa resistência à pressão, choques físicos e alto custo de aquisição, sendo também confeccionados com 6 metros de comprimento, com diâmetros variando entre 50 e 200 mm (PERES, 2006).

2.2.4. Tubo de cobre

Os tubos de cobre apresentam boa resistência química, boa resistência à corrosão, fácil manuseio, pouca tendência à incrustação, boa resistência mecânica e longa vida útil, além de ser reciclável (GHISI; GUGEL, 2005).

Segundo SOARES (2022), os tubos de cobre são um dos materiais de construção mais eficientes para instalações em que há a necessidade de passagem de água quente, fria ou gás (

2.2.5. Tubo de aço galvanizado

Tubos de aço galvanizados possuem uma liga metálica mais robusta, pois é fabricado com uma mistura de aço e cerca de 10% de zinco, o que permite uma alta resistência à pressão, choques físicos, oxidação e à corrosão (PARANHOS, 2010).

A união entre estes tubos pode ser realizada por juntas elásticas, flanges, parafusos ou engates rápidos (PEREIRA, 2011).

Segundo Bernardo et al. (2006), estes tubos são utilizados em sistemas de irrigação autopropelidos, como nos de aspersão por pivô-central e sobre rodas com deslocamento lateral.

2.2.6. tubos de ferro fundido

Os tubos de ferro fundido são geralmente empregados em usinas hidrelétricas, indústria petroquímica (PERES, 2006), adutoras de água potável (SANTANA et. al, 2019) e sistemas de irrigação de grande porte (BERNARDO et al., 2006).

Peres (2006) afirma que estes tubos resistem a altas pressões, de até 4 MPa, são duráveis e resistentes a choques físicos, embora apresentem custo de aquisição elevado, sejam pouco flexíveis e muito susceptíveis a corrosão química, quando não são revestidos, interna e externamente. Os diâmetros variam entre 50 e 1200 mm e suas uniões são realizadas através de juntas elásticas e franges parafusadas.

2.2.7. Tubos construídos com outros materiais

Os tubos de fibrocimento são resistentes a corrosão química e, geralmente, utilizados em redes de distribuição de água e esgoto (QUEIROGA, 2008), resistindo as pressões de até 1,5 MPa, com diâmetro variando entre 50 e 500 mm (PERES, 2006).

Os tubos de concreto armado são utilizados em sistema de drenagem urbana (SILVA et. al, 2019), com diâmetro entre 300 e 1500 mm, apresentando resistência média a pressão e alta em relação a corrosão química (PERES, 2006).

Os tubos de inox são muito resistentes as condições agressivas de corrosão química, sendo normalmente utilizados na indústria alimentícia e na condução de produtos químicos (PERES, 2006).

2.3. Perdas de cargas em condutos forçados

O teorema de Bernoulli baseia-se no princípio da conservação da energia para estabelecer que, a energia hidráulica total de um fluido perfeito, ou seja, fluido teórico, incompressível e sem viscosidade, é composta pela soma das energias cinética, piezométrica e de posição, permanecendo constante durante o escoamento permanente, o longo da linha de fluxo de um conduto retilíneo e uniforme. Entretanto, no escoamento de fluidos reais, sempre ocorre uma perda de energia para o ambiente, na forma de calor, devido ao atrito interno das partículas do fluido e externo, entre o fluido e o sólido que o contém (PERES, 2006; VERTCHENKO, 2009).

De fato, Fox et. Al (2010) afirma que as partículas em contato com a parede adquirem a velocidade da parede, ou seja, velocidade nula, e passam a influir nas partículas através da viscosidade e da turbulência, dissipando energia.

Essa dissipação de energia provoca uma redução de pressão total do fluido ao longo do escoamento, a qual é denominado perda de carga, sendo esta perda de energia contínua e/ou localizada (AZEVEDO NETTO et. al, 1998; LIMA,2017; PERES, 2006).

As paredes de um conduto retilíneo são responsáveis pela perda de carga continua ao longo do seu comprimento, fazendo com que a pressão total diminua gradativamente ao longo do seu comprimento, enquanto a perda de carga localizada é causada pelos acessórios da tubulação, como válvulas, curvas, redução, entre outros, provocando variação brusca na velocidade, em módulo ou direção, o que intensifica a perda de energia nos pontos onde estão instalados (AZEVEDO NETTO et al., 1998; LIMA,2017; PERES, 2006).

De acordo com Azevedo Netto et. al (1998) e Peres (2006), a perda de carga contínua, que ocorre durante o escoamento turbulento em um conduto retilíneo, uniforme e suficientemente longo, varia em função do comprimento do conduto, da velocidade do fluxo, do diâmetro do conduto, da rugosidade do conduto, da massa específica e viscosidade do fluido,

2.4. Métodos de estimativa da perda de carga contínua

2.4.1. Método de Hagen-Poiseuille

Este método é aplicado somente em condições de regime laminar, sendo que, para escoamento em um conduto circular, o modelo matemático adotado é descrito pela Eq. (1):

$$hf = \frac{32 \cdot \mu \cdot L \cdot v}{\gamma \cdot D^2} \quad (1)$$

sendo:

hf - Perda de carga continua, J.N⁻¹;

L - Comprimento, m;

D - Diâmetro, m;

v - Velocidade do fluxo, m.s⁻¹;

μ - Viscosidade dinâmica, N.s.m⁻²;

γ - Peso específico do fluido, N.m⁻³.

2.4.2. Método de Darcy-Weisbach

Na dinâmica de fluidos, a equação de Darcy-Weisbach, também denominada fórmula universal da perda de carga, é um modelo matemático fenomenológico, que correlaciona a perda de carga, ou de pressão, ao longo de uma tubulação de seção circular, ao seu comprimento, diâmetro, velocidade do fluxo e um fator de atrito, assim como a aceleração da gravidade (PERES, 2006; SOUSA e DANTAS, 2014), segundo o modelo matemático Eq. (2):

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

sendo:

hf - Perda de carga, mca;

f - Fator de atrito, adimensional,

L - Comprimento, m;

D - Diâmetro, m;

v - Velocidade do fluxo, m.s⁻¹;

g - Aceleração da gravidade, m.s⁻².

O fator de atrito varia em função do Número de Reynolds e da Rugosidade Relativa, sendo obtido através do diagrama de Moody, que é uma representação gráfica em escala duplamente logarítmica do fator de atrito em função do número de Reynolds e da rugosidade relativa de uma tubulação (OLIVEIRA, 2022).

O f também pode ser estimado por modelos matemáticos, com os propostos por Swamee e Jain, para escoamento laminar Eq. (3) e turbulento Eq. (4), ou por Colebrook-White Eq. (5), citados por Azevedo Netto et al. (1998) e Peres (2006):

$$f = \left[\left(\frac{64}{Re} \right)^8 \right]^{0,125} \quad (3)$$

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{Re} \right)^8 + 9,5 \cdot \left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{Re} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (4)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \cdot \log \left(\frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}} + \frac{0,27 \cdot e}{D} \right) \quad (5)$$

sendo:

f - Fator de atrito, adimensional,

Re - Número de Reynolds, adimensional;

Ln - Logaritmo natural;

ε - Rugosidade absoluta interna do tubo, m;

D - Diâmetro, m.

2.4.3. Método de Hazen-Williams

Um dos métodos frequentemente utilizados para estimar as perdas de cargas distribuídas é através da equação de Hazen-Williams. Uma das principais vantagens deste método é a sua simplicidade, quando comparado a outros métodos (MIRANDA et. al, 2019).

No entanto, Peres (2006) afirma que esse modelo somente é aplicável no escoamento da água em regime turbulento, ao redor de 20 °C, em condutos livres ou forçados, com uma única entrada e saída, de qualquer material, com diâmetro entre 50 e 3500 mm. A equação de Hazen-Williams pode ser expressa de diversas formas, como Eq. (6) e (7):

$$hf = \frac{10,65 \cdot L \cdot Q^{1,852}}{C^{1,852} \cdot D^{4,87}} \quad (6)$$

$$hf = \frac{6,81 \cdot L \cdot v^{1,852}}{C^{1,852} \cdot D^{1,167}} \quad (7)$$

sendo:

hf - Perda de carga, mca;

L - Comprimento, m;

Q - Vazão, m³.s⁻¹;

C - Coeficiente de rugosidade interna do tubo, adimensional.

D - Diâmetro, m;

2.4.4. Método de Flamant

O método de Flamant (Eq. 8) é usado para instalações prediais e linhas laterais de irrigação localizada, em tubulações de diâmetros de até 50 mm, escoamento de água à temperatura ambiente e sendo muito utilizada para tubos de aço-galvanizado e ferro (PERES, 2006; TORRES et al., 2014).

$$hf = \frac{4 \cdot b \cdot L \cdot v^{1,75}}{D^{1,25}} \quad (8)$$

sendo:

hf - Perda de carga, mca;

L - Comprimento, m;

v - Velocidade do fluxo, m.s⁻¹;

b - Coeficiente de rugosidade interna do tubo, adimensional.

D - Diâmetro, m.

2.4.5. Estimativa da perda de carga em tubulações com múltiplas saídas

Quanto menor for a vazão, menor também será a perda de carga na tubulação. Desta forma, em tubulações de múltiplas, como as das linhas laterais de sistemas de irrigação, que apresentam vazões decrescentes ao longo do seu comprimento, é necessário estimar a perda de carga em cada trecho da tubulação, entre duas derivações adjacentes, ou, o que é mais comum, empregar o fator F de Christiansen (PERES, 2006; PIAZENTIN, 2019).

2.5. Métodos de estimativa da perda de carga localizada

2.5.1. Método dos comprimentos equivalentes

O método dos comprimentos equivalentes consiste em substituir, para simples efeito de cálculo, cada acessório da instalação por comprimentos de tubos retilíneos, de igual diâmetro, nos quais a perda de carga seja igual à provocada pelo acessório, quando a vazão em ambos é a mesma (BARRETO JUNIOR, 2006; PERES, 2006).

2.5.2. Método dos coeficientes

A estimativa da perda de carga localizada também pode ser realizada a partir da quantificação da energia cinética do fluxo e do emprego de coeficientes, característicos de cada acessório, segundo o modelo Eq. (9) (PERES, 2006):

$$hf_{Loc} = \frac{K \cdot v^2}{2 \cdot g} \quad (9)$$

sendo:

hf_{Loc} - Perda de carga localizada, mca;

K - Coeficiente, adimensional;

v - Velocidade do fluxo, m.s⁻¹;

g - Aceleração da gravidade, m.s⁻².

3. JUSTIFICATIVA

Devido a importância da determinação dos valores de perda de carga para a viabilidade técnica e econômica de projetos hidráulicos, torna-se necessário difundir esse conhecimento disponível para o público interessado o qual já está sendo utilizado em aulas práticas para discentes de Agroecologia do Centro de Ciências Agrárias da UFSCar, permitindo demonstrar que o uso de metodologias para a determinação de perda de cargas em sistemas hidráulicos é eficiente e confiável não necessitando a realização de medidas.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo geral

Empregar um protótipo hidráulico de bancada para quantificar as perdas de cargas distribuídas e localizadas de tubulações e acessórios de PVC.

4.2. Objetivo específico

Projetar, construir e avaliar uma bancada de teste com circuito hidráulico fechado, quantificar a perda de carga em tubulações e acessórios de PVC e outros materiais, com distintos diâmetros, comparar os resultados obtidos na bancada de teste com os estimados por modelos matemáticos teóricos, disponíveis na literatura;

4.3 Hipótese

As perdas de carga registradas na bancada de teste são semelhantes às aquelas estimadas por modelos matemáticos disponíveis na literatura;

As perdas de cargas medidas na bancada de teste são diferentes daquelas estimadas por modelos matemático adotados.

5. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho com conduzido no laboratório de Hidráulica e Irrigação, do Departamento de Desenvolvimento Rural, da Universidade Federal de São Carlos, *campus* Araras.

Na construção da bancada hidráulica foram utilizadas tubulações, cotovelos, “T”, registros, mangueiras translúcidas, tubos translúcidos de acrílicos, conjunto motobomba de ½ cv, reservatório de 1000 litros, manômetro e piezômetros (Figuras 1 e 2).



Figura 1 - Reservatório de água, tubulação de recalque e retorno



Figura 2 - Registros, manômetro, piezômetros, tubulações estudadas e interruptor da motobomba

Foram instaladas ventosas para impedir o esvaziamento da tubulação, após o desligamento da motobomba, uma vez que, quando o sistema voltava a pressurizar, bolhas de ar não eram eliminadas e comprometendo a qualidade dos dados (Figura 3)



Figura 3 - Ventosas de recalque e retorno

Cada tubulação estudada possuía 2,03 m de comprimento (Figura 2), dois registros de esfera e dois piezômetros (Figura 4), um situado no início e outro no final da tubulação em questão. Desta forma, a perda de carga que ocorria nas tubulações era representada pelas diferenças de níveis dos respectivos pares piezométricos.

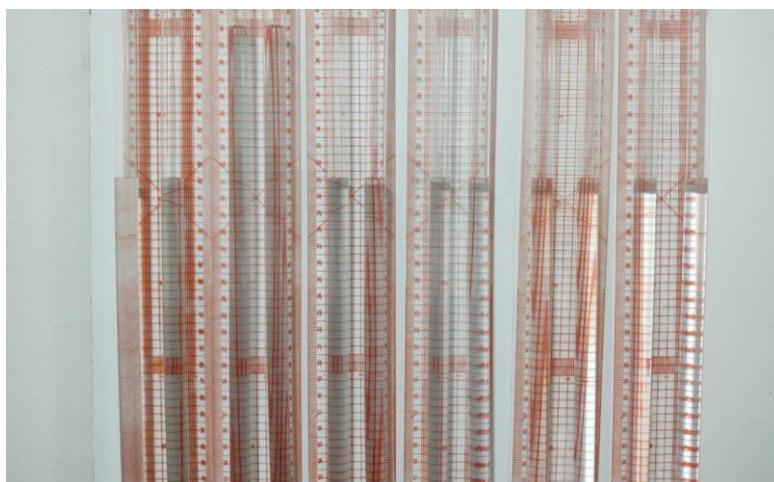


Figura 4 - piezômetros utilizados no estudo da perda de carga

As tubulações estudadas foram (Figura 5):

Mangueira translúcida, com diâmetro interno 0,0076 m (Figura 5A);

Tubo de ½ polegada, com 24 cotovelos e diâmetro interno de 0,01672 m (Figura 5B);
 Tubo corrugado, com diâmetro interno de 0,01862 m (Figura 5C);
 Tubo de ½ polegada, com diâmetro interno de 0,01672 m (Figura 5D);
 Tubo de 1 polegada, com diâmetro interno 0,02773 m (Figura 5E).

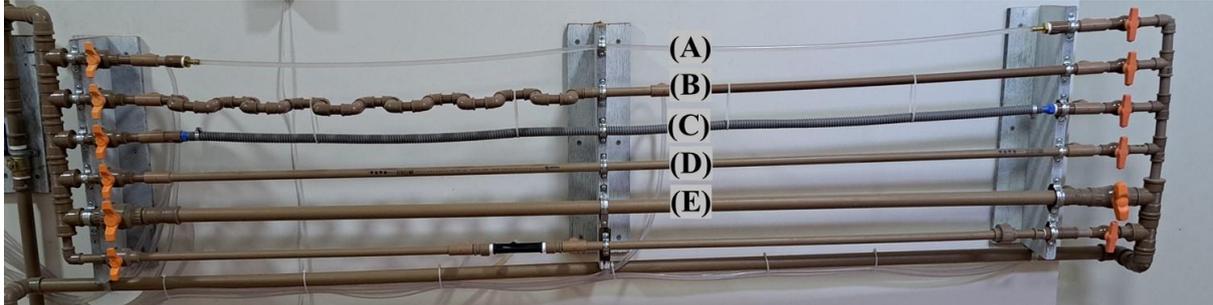


Figura 5 - Mangueira translúcida (A), tubo de ½ polegada com cotovelos (B), tubo corrugado (C), tubo de ½ polegada (D) e tubo de 1 polegada (E)

Cada tubulação foi testada individualmente e submetida a sete vazões distintas, registrando-se as respectivas as leituras dos piezômetros.

As vazões, controladas através de registro instalado na linha de recalque, foram medidas pelo método volumétrico, com o emprego de balde, proveta e cronômetro, com três repetições cada.

A estimativa da viscosidade cinemática foi realizada considerando a temperatura da água do reservatório e o modelo matemático Eq. (10) (PERES, 2006):

$$\nu = \frac{1,78 \cdot 10^{-6}}{1 + 0,0337 \cdot t + 0,000221 \cdot t^2} \quad (10)$$

sendo:

ν - Viscosidade cinemática, $m^2 \cdot s^{-1}$;
 t - Temperatura da água, $^{\circ}C$.

A perda de carga localizada foi estimada pela Eq. (9), enquanto o Número de Reynolds foi estimado pela Eq. (11) (PERES, 2006):

$$Re = \frac{\nu \cdot D}{\nu} \quad (11)$$

sendo:

Re - Número de Reynolds, adimensional;

v - velocidade do fluxo de água, m.s⁻¹;

ν - Viscosidade cinemática, m².s⁻¹;

D - Diâmetro da tubulação, m.

A velocidade da água foi estimada através da equação da continuidade, (Eq. 12) (AZEVEDO NETTO et. al, 1998; PERES, 2006):

$$v = \frac{Q}{S} \quad (12)$$

sendo:

v - velocidade do fluxo de água, m.s⁻¹;

Q - Vazão, m³.s⁻¹;

S - Área da seção transversal do conduto, m².

Foram empregadas as equações de Darcy-Weisbach (Eq. 2) e Swamee e Jain (Eq. 4) para se estimar a perda de carga contínua das tubulações e respectivas vazões.

As perdas de carga estimadas pelas equações foram comparas com perdas de cargas registradas nos piezômetros, através de regressões lineares e índice de Concordância (Eq. 13).

O coeficiente de determinação (r^2) foi empregado para se descrever à precisão do sistema hidráulico, indicando sua repetibilidade e estabilidade de mensuração, enquanto a exatidão foi determinada a partir do afastamento dos dados estimados em relação aos reais, pelo modelo (Eq. 13) de Willmott et al. (1985):

$$d = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - R_i)^2}{\sum_{i=1}^n [|E - \bar{M}| + |R - \bar{M}|]^2} \right) \quad (13)$$

sendo:

d - Concordância, adimensional;

E - Dado estimado;

R - Dado real;

\bar{M} - Média dos dados reais.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste estudo foram empregadas diversas vazões para se quantificar as perdas de carga e respectivos condutos, conforme ilustra a Figura 6.

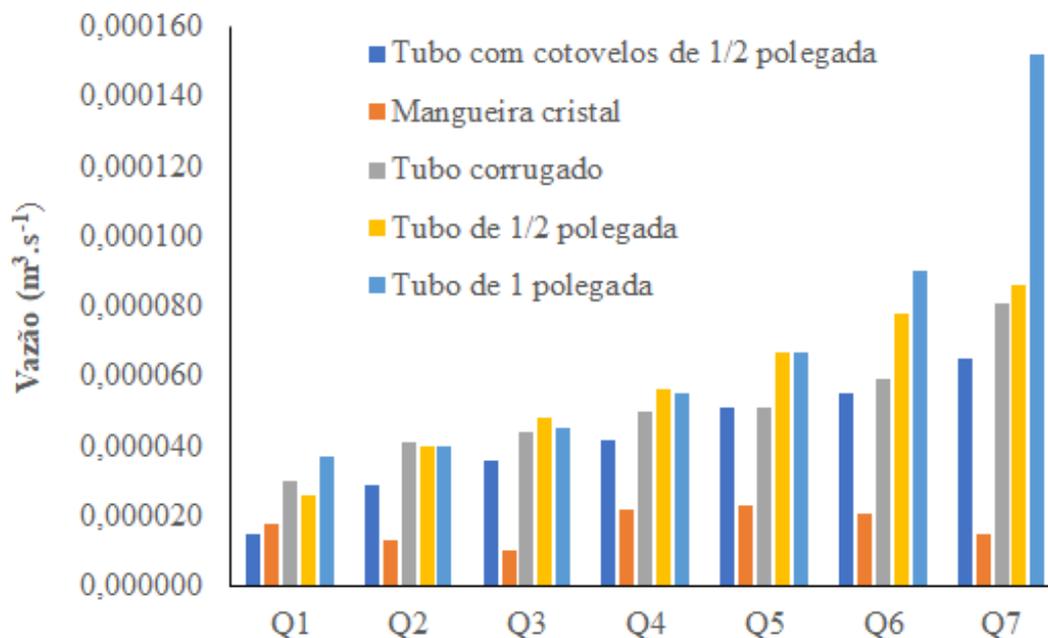


Figura 6 - Condutos e respectivas vazões (Q)

Como pode ser observado na Figura 6, o circuito hidráulico foi submetido a baixíssimas vazões, que variaram entre 0,00001 e 0,000152 m³.s⁻¹. A adoção de baixa magnitude de vazão foi necessária devido ao fato de que os piezômetros adotados trabalham com baixa pressão (AZEVEDO NETTO et. al, 1998; PERES, 2006). Assim, caso a vazão fosse maior do que estas, inevitavelmente ocorreria o transbordamento no líquido piezômetro, que neste estudo é a própria água. Desta forma, caso se deseje estudar vazões e pressões maiores, será necessário substituir estes piezômetros por outros sensores de pressão mais adequados.

Considerando que a equação da continuidade obedece a lei da conservação de massa, sendo geralmente empregada no estudo dos fluidos em escoamento permanente, como neste experimento, para se estimar a vazão, a área da seção molhada do conduto ou a velocidade do fluido, de acordo com a necessidade de cada trabalho. A partir deste princípio e de dados de vazão e diâmetro interno da tubulação foi possível estimar a velocidade do fluxo em cada situação, conforme ilustra a Figura 7.

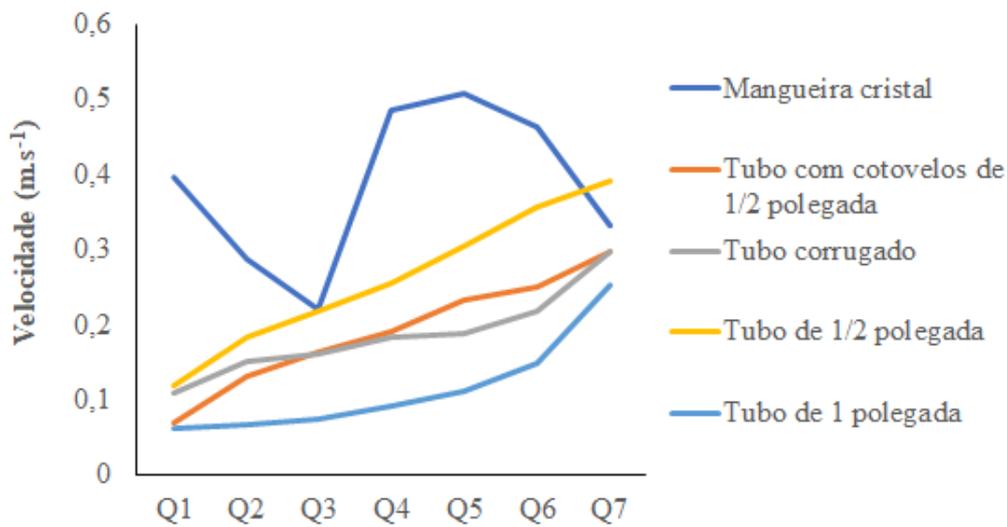


Figura 7 - Condutos e respectivas vazões (Q)

Assim como a vazão, a velocidade da água atingiu valores diminutos (Figura 7), variando entre 0,061 e 0,51 m.s⁻¹. Como comparação, Bernardo et al. (2006) cita que a velocidade da água na linha principal de um sistema de irrigação de se encontrar entre 1 e 2 m.s⁻¹, ou seja, um valor aproximadamente quatro vezes maior que a maior velocidade estimada neste estudo.

A avaliação da performance do sistema hidráulico projetado também foi baseada nos resultados obtidos de modelos matemáticos, tendências lineares e coeficiente de determinação de R².

O coeficiente de determinação (R²) é uma métrica muito utilizada para a análise de qualidade de ajuste de modelos lineares. Este coeficiente assume valores no intervalo entre 0 e 1, de modo que, quanto mais próximo de 1, a maior parte da variação da variável resposta está sendo explicada pelo modelo, ou seja, expressa a proporção da variação de uma medida que é explicada pela variação de outra (PALA 2019).

A tendência linear é uma linha reta de melhor ajuste que é usada com conjuntos de dados lineares simples. Seus dados serão lineares se o padrão em seus pontos de dados se parecer com uma linha. Uma linha de tendência linear geralmente mostra que algo está aumentando ou diminuindo a uma taxa constante.

Quando comparadas as leituras piezométricas com as estimas pela equação universal de perda de carga, obteve-se os resultados ilustrados pela Figura (8).

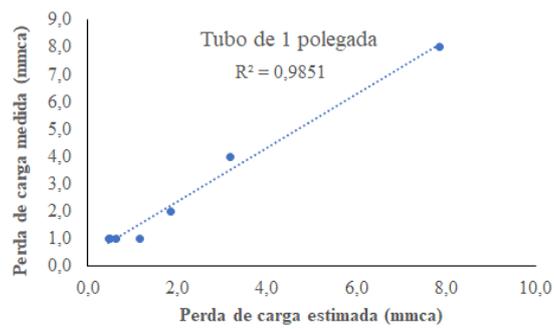
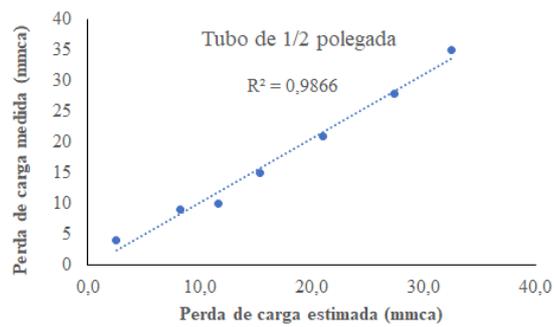
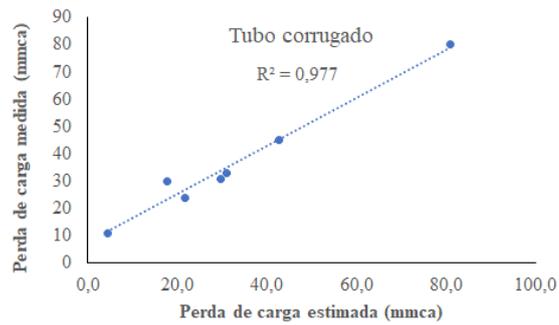
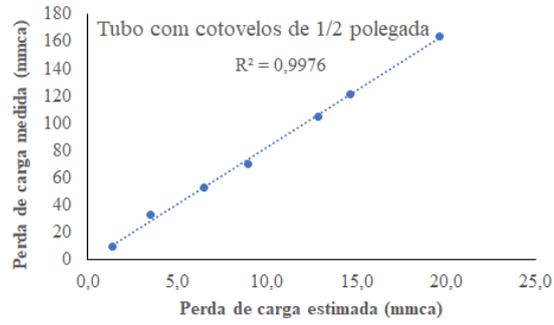
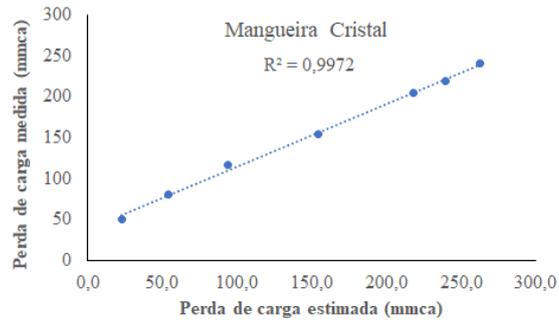


Figura 8 - hf estimadas pelo método de Darcy-Weisbach e medidas em piezômetros

Observa-se na Figura 8, que as perdas de carga medidas nos piezômetros tenderam a variar semelhantemente as estimadas pela equação de Darcy-Weisbach, sob as mesmas vazões, sendo que, ao se aumentar as vazões, ocorreu também o aumento das perdas de carga.

Como a perda de carga é inversamente proporcional ao diâmetro da tubulação, as menores hf foram registradas na tubulação de 1 polegada, enquanto as maiores hf foram na mangueira cristal (Figura 8).

Nota-se também na Figura 8 que os coeficientes de determinação (R^2) resultaram em valores muito próximo de 1, sendo o menor 0,977 para o tubo corrugado e 0,9976 para o tubo de ½ polegadas com cotovelos.

Embora o tubo de ½ polegadas com cotovelos tenha apresentado o melhor desempenho, dentre os estudados neste trabalho, deve-se ressaltar que este não apresentou respostas proporcionais de perdas de carga medida e estimada, como os demais (Figura 8).

De acordo com a Figura 8, a perda de carga estimada pela equação de Darcy-Weisbach no tubo ½ polegada com cotovelos equivaleu a cerca de 11 a 14% das medidas pelos piezômetros correspondentes, demonstrando assim que essa metodologia subestima a hf real para esta tubulação, o que já era esperado, devido a grande quantidade de cotovelos, 24 ao todo.

Embora o tubo de ½ polegadas com cotovelos tenha o mesmo comprimento das demais e o mesmo diâmetro do tubo de ½ polegadas, as perdas de cargas medidas sugerem o predomínio das perdas de carga localizada sobre as perdas contínuas (Figura 8).

Segundo Peres (2006), a perdas de carga localizadas podem ser desprezadas, quando o comprimento da tubulação for maior que 1000 vezes o seu diâmetro e/ou apresentar um número pequeno de acessórios, o que não é o caso desta tubulação.

Aplicando-se então o método dos coeficientes (Eq. 9), obteve-se a Figura 9:

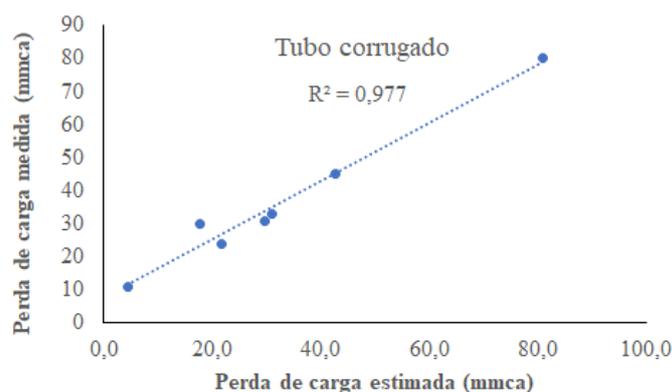


Figura 9 - Perdas de carga estimadas pelos métodos de Darcy-Weisbach e dos coeficientes e medidas em piezômetros

A Figura 9 mostra que as perdas de carga estimadas pelos métodos de Darcy-Weisbach e dos coeficientes são proporcionalmente mais próximas daquelas medidas nos piezômetros, como ocorreu com as demais tubulações.

A Figura 10 ilustra a exatidão do sistema hidráulico testado neste trabalho.

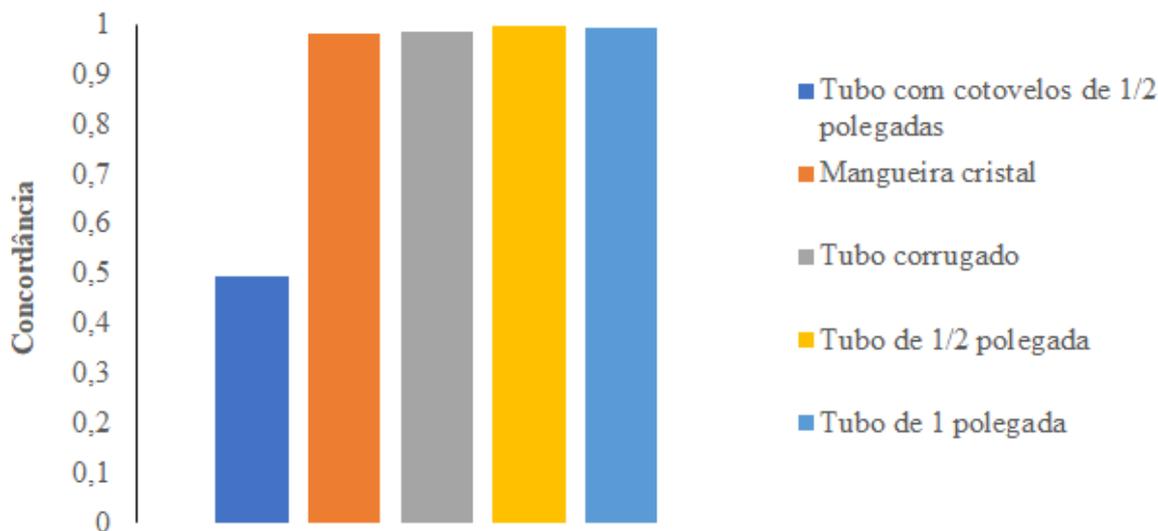


Figura 10 - Concordância dos valores obtidos no experimento comparado com modelos matemáticos

Conforme pode ser observado na Figura 10, o sistema hidráulico deste trabalho apresentou uma excelente exatidão com valores índices de Concordância (d), predominantemente acima de 0,98, com exceção do tubo de 1/2 polegada com cotovelos como era de se esperar devido a grande quantidade de acessórios um total de 24 cotovelos em uma tubulação de 2,03 m.

7. CONCLUSÃO

Nas condições que este trabalho foi conduzido, concluiu-se que as perdas de carga medidas no sistema hidráulico eram semelhantes às aquelas estimadas pelos modelos matemáticos de Darcy-Weisbach e dos coeficientes, com coeficientes de determinação e de Concordância maiores que 0,977 e 0,98%, respectivamente.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO NETTO, J.M.; FERNANDEZ Y FERNANDEZ, M.; ARAÚJO, R.de; ITO, A.E. **Manual de hidráulica**. 8 ed: São Paulo: Edgard Blucher, 1998. 670 p.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. Manual de irrigação. 8.ed. Viçosa: UFV, 2006. 625 p.

BRAUN, A.; STASIAK, R. A.; LEIDENS, N. **Avaliação da influência do diâmetro na perda de carga em tubos de aço inox**. III Amostra de Trabalhos de Engenharia Química. **Anais...Santo Ângelo: 2019 Disponível em:**

<http://www.uesc.br/editora/livrosdigitais_20140513/r_cientistas.pdf>

BRUNETTI, F. **Mecânica dos Fluidos**. São Paulo: Pearson/Prentice Hall, 2008

BUZINELLI, D. V. **Dimensionamento de elementos estruturais em Alumínio**. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, 2000.

CANCIAM, C. Estimativa da energia de ativação de fluxo dos óleos lubrificantes SAE 30, SAE40 e SAE 50. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, v. 10, n. 2, p. 202–210, dez. 2012.

FONSECA, M. M.; FINKLER, R.; TIMM, A. U. **Estudo da perda de carga em tubulações nas redes de instalações hidráulicas**. VII Congresso de Pesquisa e Extensão da FSG & V Salão de Extensão. **Anais...Caxias do Sul: 2019**.

FOX, R. W., MCDONALD, A. T., PRITCHARD, P. J., **Introdução a Mecânica dos fluidos**. 7º Ed., LTC, 2010.

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

GHISI, E.; GUGEL E. C. Instalações Prediais de Água Quente. Disciplina - Instalações I. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis-SC, 2005.

GONÇALVES, T. DOS SANTOS et al. Avaliação de fator de atrito pelo método de newton para solução da equação de Colebrook–White. **Revista Perspectiva**, v. 45, n. 171, p. 55–64, 13 out. 2021.

GRIBBIN, J. E. **Introdução à hidráulica, hidrologia e gestão de águas pluviais**. [Introduction to hydraulics and hidrology with applications for stormwater management]. DAMAS, GP. (Trad.). 3 ed. São Paulo, SP: Cengage Learning, 2009. 494 p.

JUNIOR, P. M. F. G.; ALVES, I. H. S. **Análise De Viscosidade Do Óleo Sae 20W50 Pelo Método De Stokes**. Trabalho de Conclusão de Curso. **Anais...Mossoró: 2018**.

LIMA, P. S. **Mensuração experimental da perda de carga localizada em conexões especiais de PVC soldável**. Trabalho de Graduação. Universidade Federal do Pampa, 2017.

MIRANDA, E. P. et al. AJUSTE DA EQUAÇÃO DE HAZEN-WILLIAMS PARA DETERMINAÇÃO DA PERDA DE CARGA CONTÍNUA EM TUBULAÇÕES DE PVC. **IRRIGA**, v. 1, n. 1, p. 94–100, 30 out. 2019.

OLIVEIRA, D. A. **Aplicação de métodos numéricos e comparação com o método implícito de colebrook-white na determinação do fator de atrito em escoamentos turbulentos**. Trabalho de Graduação. Instituto Federal do Espírito Santo, 2022.

PALA, L. O. DE O. **Revisitando a estimação de coeficiente de determinação**. Disponível em: <http://bdtd.unifal-mg.edu.br:8080/handle/tede/1419>. Acesso em: 12 ago. 2023.

PARANHOS, R. M. V. **Caracterização de fases intermetálicas presentes em aço galvanizado por imersão à quente com tratamento térmico do revestimento metálico**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.

PERES, J. G. Hidráulica agrícola. São Carlos: EDUFSCAR, 2015. 429 p.

PEREIRA, M. R. S. **Criação de novo procedimento que possibilite a rastreabilidade das tubulações de uma indústria química**. Curso de Graduação. Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, 2011.

PIATTI, T. M.; RODRIGUES, R. A. F. Plásticos: características, usos, produção e impactos ambientais. **Série: Conversando sobre ciências em alagoas**, p. 51, 2005.

PIAZENTIN, J. C. **Estimativa da perda de carga em tubulação com múltiplas saídas equidistantes**. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, 2019.

QUEIROGA, N. C. M. DE. Amianto. In: **Rochas e Minerais Industriais**. Lavra: 2008. p. 79–102.

RAUBACH, M. A. G. **Situações de ensino investigativas com atividade experimentais no eletromagnetismo**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande, 2018.

RODRIGUES JUNIOR, J. A. **Avaliação da Técnica de “ Core Annular Flow ” em Escoamento de Fluido de Alta Viscosidade em Duto Horizontal**. Trabalho de Graduação. Universidade Estadual do Maranhão, 2019.

SANTANA, K. G. S. et al. **Comparativos dos transientes hidráulicos em tubulação de aço e ferro fundido, quando à interrupção abrupta no sistema elétrico**. XII Encontro de Recursos Hídricos em Sergipe. **Anais...Aracaju**: 2019

SILVA, B. L. DE A. et al. **Conjunto De Drenagem Urbana Nas Cidades E Sua Importância Na Redução De Inundações E Enchentes**. Revista Pesquisa e Ação.

<<https://revistas.brazcubas.br/index.php/pesquisa/article/view/693>>

SILVA, B. S. S. et al. **Quebra de correntes marinhas decorrentes dos corais: diminuição da velocidade da onda com o atrito de viscosidade**. III Colóquio Estadual de Pesquisa Multidisciplinar. **Anais...2018**

SOARES, D. B. **Análise do custo e benefício dos sistemas elétrico e a gás no aquecimento de água fria na edificação multifamiliar de alto padrão: um estudo de caso**. Trabalho de Graduação. Centro Universitário Christus, 2022.

SOUZA, S. H. F.; SILVA, F. A.; VILELA, E. C. Uso de Carbonato de Cálcio na Formulação de Tubos de PVC Rígido. **Revista Processos Químicos**, v. 3, n. 6, p. 42–47, 1 jul. 2009.

TORRES, R. R. et al. **Determinação de velocidade de escoamento através de diferentes métodos**. XLIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. **Anais...Campo Grande: 2014**

VASQUES, E. J.; MENEGASSO, P.; SOUZA, M. DE. Explorando a conexão entre a mecânica dos fluidos e a teoria cinética. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 38, n. 1, p. 1–9, mar. 2016.

VERTCHENKO, L.; DICKMAN, A. G.; FERREIRA, F. Transferência de fluido por meio de um sifão vs. aplicação da equação de Bernoulli. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 31, n. 3, p. 3301, 2009.