

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARCOS GODOY CREPALDI

COMPARATIVO DAS EQUAÇÕES PARA OBTENÇÃO DO FATOR DE ATRITO DA
EQUAÇÃO DE DARCY-WEISBACH NO ESCOAMENTO DE VINHAÇA COM E SEM
POLIACRILAMIDA

JANDAIA DO SUL

2021

MARCOS GODOY CREPALDI

COMPARATIVO DAS EQUAÇÕES PARA OBTENÇÃO DO FATOR DE ATRITO DA
EQUAÇÃO DE DARCY-WEISBACH NO ESCOAMENTO DE VINHAÇA COM E SEM
POLIACRILAMIDA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao curso de Engenharia Agrícola, Campus Avançado de Jandaia do Sul, Universidade Federal do Paraná, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrícola .

Orientador(a): Prof. Dr. André Luiz Justi.

JANDAIA DO SUL

2021

C917c Crepaldi, Marcos Godoy
Comparação das equações para obtenção do fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach no escoamento de vinhaça com e sem poliacrilamida. / Marcos Godoy Crepaldi. – Jandaia do Sul, 2021. 47 f.

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Justi
Trabalho de Conclusão do Curso (graduação) – Universidade Federal do Paraná. Campus Jandaia do Sul. Graduação em Engenharia Agrícola.

1. Irrigação. 2. Fertirrigação. 3. Vinhaça. 4. Poliacrilamida. 5. Fator de atrito. 6. Perda de carga. I. Justi, André Luiz. II. Título. III. Universidade Federal do Paraná.

CDD 631

TERMO DE APROVAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Título: **COMPARATIVO DAS EQUAÇÕES PARA OBTENÇÃO DO FATOR DE ATRITO DA EQUAÇÃO DE DARCY-WEISBACH NO ESCOAMENTO DE VINHAÇA COM E SEM POLIACRILAMIDA**

Autor: Marcos Godoy Crepaldi

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrícola, aprovado pela seguinte banca examinadora:

Prof. Dr. André Luiz Justi (Orientador)
Prof. Dr. Maycon Diego Ribeiro
Prof. Dr. Carlos Henrique Wachholz de Souza



Documento assinado eletronicamente por **ANDRE LUIZ JUSTI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 22/12/2021, às 14:54, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **MAYCON DIEGO RIBEIRO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 22/12/2021, às 14:57, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **CARLOS HENRIQUE WACHHOLZ DE SOUZA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 23/12/2021, às 11:25, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida [aqui](#) informando o código verificador **4147529** e o código CRC **11B21282**.

Dedico ao meu pai (in memoriam), que sempre me ensinou sobre o campo, a proteger e apreciar o meio ambiente, mas recentemente partiu.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me mostrar o caminho e abençoar na jornada da vida.

A minha noiva, que me incentivou nos momentos mais difíceis e sempre esteve ao meu lado.

A minha mãe, por sempre me incentivar aos estudos e ao trabalho e por cuidar de mim.

Aos meus filhos Nathan, Bernardo e Diego, minha felicidade.

Aos meus amigos Robson, Fernando e Rafael e aos meus amigos que conheci na faculdade Lucas, Daiane, Roberto, Jean, Ligia e Zequiel que compartilharam momentos difíceis e momentos felizes.

Ao primeiro e melhor líder que conheci Adir por seus ensinamentos de como trabalhar com pessoas.

A minha primeira professora e irmã Marlene, que me passava atividades desafiadoras de matemática ainda na infância.

Aos professores Elsa, Maria, Ana Paula, Valeria, Diego que me alfabetizaram e com o acúmulo dos esforços do dia a dia me permitiram entrar na graduação.

Aos professores de graduação, André, Maycon, Carlos, Valquíria, Daniel e Jair pelas sábias lições dentro e fora da faculdade.

Uma jornada de duzentos quilômetros começa com um simples passo.

(Provérbio Chinês.)

RESUMO

A agricultura representa em média 70% da captação total de água sendo assim considerada a atividade de maior consumo de água, (JACOBI; GRANDISOLI, 2017) fato que é evidenciado no aumento do potencial agrícola do Brasil nos últimos anos utilizando as áreas irrigadas e multiplicando os projetos de irrigação em diversas regiões do país tornando-se rotina no agronegócio brasileiro (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006). Este trabalho, tem o propósito de reunir diferentes equações de atrito, desde as mais simples, mais utilizadas e mais complexas avaliando através da perda de carga qual mais se aproxima do resultado experimental tendo como fluido a vinhaça e vinhaça com poliacrilamida, uma vez que a vinhaça está diretamente ligada a agricultura e irrigação onde a agricultura irrigada, especialmente em áreas com escassez de água que desempenha um papel importante no crescimento da produtividade e desenvolvimento agrícola e socioeconômico (CAVALCANTE, 2020). A metodologia, utiliza recursos computacionais para encontrar valores do fator de atrito, os cálculos do fator de atrito usaram o software RStudio, variando os valores de vazão e diâmetros foi possível obter pontos e conseqüentemente possibilitou elaborar tabelas e gráficos de perda de carga que foram comparados com os valores observados de Justi, 2012. Em seu resultado final não faz parte do propósito indicar qual a melhor equação, mas sim demonstrar qual a equação mais indicada para as condições apresentadas através de suas restrições, respeitando o diâmetro da tubulação, número de Reynolds, regime de escoamento e características do fluido. Possibilitando assim divulgar que em determinadas condições uma equação pode manter ou ter uma maior precisão do que as equações mais utilizadas, sendo portanto melhor recomendada no dimensionamento em projetos de irrigação. Nos resultados obtidos foi possível examinar cada equação e sua relação numérica com os valores reais, a relação foi comprovada aplicando a soma de resíduos. Os resultados examinados e discutidos trouxeram que a equação de Nikuradse para tubos lisos melhor se ajusta aos valores observados, a equação de Nikuradse para tubos rugosos é melhor indicada para fluido de vinhaça com poliacrilamida e a equação de Blasius obteve o melhor resultado entre as equações explícitas.

Palavras-chave: Irrigação. Fertirrigação. Vinhaça. Poliacrilamida. Fator de atrito. Perda de Carga.

ABSTRACT

Agriculture represents on average 70% of the total water abstraction, thus being considered the activity with the highest consumption of water, (JACOBI; GRANDISOLI, 2017) a fact that is evidenced in the increase in agricultural potential in Brazil in recent years using irrigated areas and multiplying irrigation projects in different regions of the country becoming routine in Brazilian agribusiness (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006). This work has the purpose of bringing together different friction equations, from the simplest, most used and most complex, evaluating through the pressure drop which is closest to the experimental result having vinasse and vinasse with polyacrylamide as fluid, since the Vinasse is directly linked to agriculture and irrigation where irrigated agriculture, especially in areas with water scarcity, plays an important role in productivity growth and agricultural and socioeconomic development (CAVALCANTE, 2020). The methodology uses computational resources to find values of the friction factor, the friction factor calculations used the RStudio software, varying the flow values and diameters it was possible to obtain points and consequently made it possible to prepare tables and graphs of pressure drop that were compared with the observed values of Justi, 2012. In its result, it is not part of the purpose to indicate which is the best equation, but rather to demonstrate which equation is most suitable for the conditions presented through its restrictions, respecting the pipe diameter, Reynolds number, flow regime and fluid characteristics. Thus, making it possible to disclose that under certain conditions an equation can maintain or have a greater precision than the most used equations, being therefore better recommended in the dimensioning in irrigation projects. In the results obtained it was possible to examine each equation and its numerical relationship with the real values, the relationship was proven by applying the sum of residuals. The results examined and discussed showed that the Nikuradse equation for smooth tubes best fits the observed values, the Nikuradse equation for rough tubes is better indicated for vinasse fluid with polyacrylamide and the Blasius equation obtained the best result among the explicit equations.

Keywords: Irrigation. Fertigation. Vinasse. Polyacrylamide. Friction factor. Head loss.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- LAYOUT DO CIRCUITO MONTADO PARA OS ENSAIOS.....	29
FIGURA 2 - LOCAL DE LEITURAS DOS DIÂMETROS.....	29
FIGURA 3 - (a) ESQUEMA DE OPERAÇÃO DO VISCOSÍMETRO. (b) VISCOSÍMETRO DE BROOKFIELD.....	30

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - VAZÃO POR DADOS OBSERVADOS E EQUAÇÕES CALCULADAS DA VINHAÇA COM 1 POLEGADA DE DIÂMETRO.....	36
GRÁFICO 2 - VAZÃO POR DADOS OBSERVADOS E EQUAÇÕES CALCULADAS DA VINHAÇA + POLÍMERO COM 1 POLEGADA DE DIÂMETRO....	38
GRÁFICO 3 - VAZÃO POR DADOS OBSERVADOS E EQUAÇÕES CALCULADAS DA VINHAÇA COM 3/4 POLEGADA DE DIÂMETRO.....	39
GRÁFICO 4– VAZÃO POR DADOS OBSERVADOS E EQUAÇÕES CALCULADAS DA VINHAÇA + POLÍMERO COM 3/4 POLEGADA DE DIÂMETRO.	40
GRÁFICO 5 - VAZÃO POR DADOS OBSERVADOS E EQUAÇÕES CALCULADAS DA VINHAÇA COM 1/2 POLEGADA DE DIÂMETRO.....	42
GRÁFICO 6– VAZÃO POR DADOS OBSERVADOS E EQUAÇÕES CALCULADAS DA VINHAÇA + POLÍMERO COM 1/2 POLEGADA DE DIÂMETRO.	43

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - ALGORITMO PARA CÁLCULO DO NÚMERO DE REYNOLDS.....	31
QUADRO 2 - ALGORITMO PARA CÁLCULO DA EQUAÇÃO DE BLASIUS.....	32
QUADRO 3 - ALGORITMO PARA CÁLCULO DA EQUAÇÃO DE VON KARMAN- PLANDTL.....	32
QUADRO 4 - ALGORITMO PARA CÁLCULO DA EQUAÇÃO DE NIKURADSE (TUBOS LISOS).....	32
QUADRO 5 - ALGORITMO PARA CÁLCULO DA EQUAÇÃO DE NIKURADSE (TUBOS RUGOSOS).....	33
QUADRO 6 - ALGORITMO PARA CÁLCULO DA EQUAÇÃO DE COLEBROOK- WHITE.....	33
QUADRO 7 - ALGORITMO PARA CÁLCULO DA EQUAÇÃO DE MOODY.....	33
QUADRO 8 - ALGORITMO PARA CÁLCULO DA EQUAÇÃO DE PLANDTL- COLEBROOK.....	34
QUADRO 9 ALGORITMO PARA CÁLCULO DA EQUAÇÃO DE SWAMEE & JAIN.	34

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - TABELA DE VAZÃO, DADOS OBSERVADOS E EQUAÇÕES CALCULADAS DA VINHAÇA COM 1 POLEGADA DE DIÂMETRO..	36
TABELA 2 - RESÍDUOS PARA VINHAÇA COM DIÂMETRO DE 1 POLEGADA.....	36
TABELA 3 - - TABELA DE VAZÃO, DADOS OBSERVADOS E EQUAÇÕES CALCULADAS DA VINHAÇA + POLÍMERO COM 1 POLEGADA DE DIÂMETRO.....	37
TABELA 4 - RESÍDUOS PARA VINHAÇA COM ADIÇÃO DE POLIACRILAMIDA COM DIÂMETRO DE 1 POLEGADA.....	38
TABELA 5 - TABELA DE VAZÃO, DADOS OBSERVADOS E EQUAÇÕES CALCULADAS DA VINHAÇA COM 3/4 POLEGADA DE DIÂMETRO.....	39
TABELA 6 - RESÍDUOS PARA VINHAÇA COM DIÂMETRO DE 3/4 DE POLEGADAS.....	39
TABELA 7 - TABELA DE VAZÃO, DADOS OBSERVADOS E EQUAÇÕES CALCULADAS DA VINHAÇA + POLÍMERO COM 3/4 POLEGADA DE DIÂMETRO.....	40
TABELA 8 - RESÍDUOS PARA VINHAÇA COM ADIÇÃO DE POLIACRILAMIDA COM DIÂMETRO DE 3/4 DE POLEGADAS.....	41
TABELA 9 - TABELA DE VAZÃO, DADOS OBSERVADOS E EQUAÇÕES CALCULADAS DA VINHAÇA COM 1/2 POLEGADA DE DIÂMETRO.....	41
TABELA 10 - RESÍDUOS PARA VINHAÇA COM DIÂMETRO DE 1/2 POLEGADA.	42
TABELA 11 - TABELA DE VAZÃO, DADOS OBSERVADOS E EQUAÇÕES CALCULADAS DA VINHAÇA + POLÍMERO COM 1/2 POLEGADA DE DIÂMETRO.....	43
TABELA 12 - RESÍDUOS PARA VINHAÇA COM ADIÇÃO DE POLIACRILAMIDA COM DIÂMETRO DE 1/2 POLEGADA.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

- ANA - Agência Nacional de Águas
- FAO - Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- UNESP - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

f	- fator de atrito
f	- fator de atrito
Re	- número de Reynolds
v	- velocidade de escoamento do fluido
D	- diâmetro interno da tubulação
μ	- viscosidade dinâmica do líquido
C	- constante
m	- constante
E	- rugosidade absoluta do tubo
k	- rugosidade equivalente
e	- rugosidade relativa
ΔH	- perda de carga distribuída
Ro	- massa específica
expe	- espessura da parede
De	- diâmetro nominal
Q	- vazão
Mi	- viscosidade dinâmica
A	- área
v	- velocidade de escoamento
x	- parâmetro inicial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	19
1.1.1	Objetivo geral	19
1.1.2	Objetivos específicos.....	20
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	21
2.1	EQUAÇÃO DE BLASIUS.....	22
2.2	EQUAÇÃO DE VON KARMAN- PRANDTL	23
2.3	EQUAÇÃO DE NIKURADSE	23
2.4	EQUAÇÃO DE COLEBROOK-WHITE	24
2.5	EQUAÇÃO DE MOODY	25
2.6	EQUAÇÃO DE PRANDTL-COLEBROOK	26
2.7	EQUAÇÃO DE SWAMEE & JAIN.....	26
2.8	EQUAÇÃO DE DARCY-WEISBACH.....	27
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	27
3.1	METODOLOGIA DO EXPERIMENTO DE JUSTI, 2012.....	28
3.2	METODOLOGIA DA ANÁLISE COMPARATIVA DOS DADOS	30
4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	35
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	46

1 INTRODUÇÃO

O uso da água é um tema que tem gerado muita discussão, a questão em si é saber como, quanto e quando utilizar a água corretamente, de forma a evitar desequilíbrios e conflitos em sua gestão. Além de sua importante função, a água também é utilizada como fonte econômica e energética de uso coletivo e, todas as classes sociais devem ter acesso aos recursos hídricos. O maior problema no uso desse recurso no mundo está relacionado a sua má distribuição geográfica, pois nessas circunstâncias, os custos sociais e econômicos têm maior peso na decisão de atender as necessidades de todas as partes. Para essas e outras questões, considerando análises sociais, econômicas e ambientais, os projetos hidráulicos vem tomando vários critérios para atender a vários requisitos de uso múltiplo da água (SELBORNE, 2001; UNESCO, 2001).

A discussão sobre o uso da água não é de hoje, a irrigação no planeta, ocorre desde as civilizações antigas nas regiões secas, no Brasil surgiu na cultura do arroz, na década de 1900. É a atividade humana que demanda a maior quantidade de água, pois essa atividade proporciona a segurança na produção de alimentos garantindo-a e suprindo cada vez mais a maior demanda de alimentos e energia em função do aumento da população mundial (ANA, 2017).

Ainda sobre segurança alimentar, a irrigação é o ponto chave que pode aumentar e vem tornando possível o cultivo no semiárido brasileiro. Usada de maneira racional e sustentável, ela otimiza a produção agrícola e junto ao grande desenvolvimento de equipamentos de irrigação chama a atenção de grandes e pequenos produtores rurais, o que faz com que se tenha consideráveis avanços da produção agrícola. Atualmente a irrigação e seu processo possuem componentes e equipamentos modernos, que é possível observar nas mais diversas metodologias para dimensionamento de projetos de irrigação (FRIZZONE et al., 2018). Por outro lado, por ser uma prática que gera custo energético, a irrigação por vezes é alvo de críticas.

Assim, diante dos conflitos do uso da água, foram criadas várias normas regulamentadoras pela ANA (Agência Nacional de Águas), como os comitês de bacias hidrográficas, que estão cada vez mais presentes e têm discutido principalmente o balanço hídrico de irrigação em perímetros rural/urbano. Apesar do ciclo da água ser fechado, a água para irrigação não retorna ao corpo hídrico, logo ela fica indisponível

para outras aplicações na região de onde é extraída por um período de tempo, outro ponto, é a baixa disponibilidade hídrica que tem afetado regiões além do semiárido brasileiro (ANA, 2017).

Por outro lado, em regiões em que há disponibilidade de água, as irrigações são realizadas em excesso, por falta de capacitação técnica, acabam espaçando os intervalos de irrigação de maneira errônea, fazendo com que a cultura seja submetida a condição de déficit hídrico e assim prejudica o desempenho da cultura. A água também é responsável pela solubilização dos nutrientes que serão disponibilizados às plantas (MAROUELLI et al., 2008). O excesso ou a falta de água pela irrigação favorece o ataque de doenças, pragas e distúrbios. Para saber qual a lâmina de água adequada, é necessário estudar os parâmetros como a capacidade de campo, ponto de marcha permanente e umidade de irrigação para cada tipo de solo. De modo geral, a textura do solo é o parâmetro mais comum, que está relacionado à capacidade de armazenamento de água no solo.

Uma boa irrigação reduz significativamente o consumo e uso da água e ao mesmo tempo aumenta a produtividade na maioria das culturas (ROSEGRANT et al., 2002). Para tal efeito, o agricultor deve investir em capacitações que proporcione um melhor nível técnico, gerencial e institucional. Essas capacitações incluem a adoção de sistema de irrigação avançado, utilizando águas superficiais ou subterrâneas aliado a agricultura de precisão, isso inclui as estratégias de monitoramento e manejo e a demanda da água pela cultura e a manutenção dos equipamentos de irrigação. A eficiência da irrigação deve ser monitorada periodicamente, visto que as melhorias no sistema de irrigação envolvem regras sobre direito e uso eficiente da água, relacionando também os custos energéticos com a irrigação, isso inclui as tarifas da concessionária e a cobrança pela quantidade de água utilizada (RODRIGUES; DOMINGUES, 2017).

Além da irrigação, pode-se melhorar o operacional e o uso dos equipamentos com a fertirrigação. A irrigação localizada e o uso de pivô central, de forma geral, permite a aplicação de agroquímicos e fertilizantes pelo seu sistema de irrigação, diminuindo a entrada de máquinas agrícolas no campo. Nesse processo, a irrigação também pode ser utilizada como depurador de efluentes, que quando aplicados no solo, podem ser tratados. No caso da vinhaça da cana de açúcar, além do meio ambiente ser beneficiado pela depuração da água que representa 97 % da vinhaça, a cultura é beneficiada pela composição da vinhaça que contém cálcio, magnésio,

potássio, fósforo, nitrogênio, nutrientes e micronutrientes derivado do processo resultante do mosto de melaço (PRADA et al., 1998).

Analisando os métodos de irrigação, a irrigação por canal tende a retrair enquanto a irrigação em dutos pressurizados tende a aumentar até 2030 tanto na irrigação localizada quanto na irrigação por aspersão, com destaque para o sistema de irrigação localizada e pivô central (IBGE; ANA, 2017), onde podemos concentrar o estudo da fertirrigação.

A fertirrigação é considerada uma das técnicas mais eficientes de aplicação de fertilizantes através da irrigação. Esse trato tem alto valor agregado e sua aplicação diminui o custo com o adubo, diminuindo assim altos investimentos. Na irrigação, a lâmina é definida com base na concentração de potássio após uma análise do solo. Dentre os sistemas de transporte da vinhaça, temos o transporte via adutora, onde a vinhaça é transportada em dutos forçados, durante o transporte são inúmeros fatores que podem servir de obstáculos para o objetivo final, como vazamentos, manutenção e logística. Um dos fatores que pode ser estudado e contribui para o desempenho na fertirrigação é a perda de carga, e por consequência o fator de atrito.

Dentre os fluidos usados na fertirrigação, temos a vinhaça que é um líquido derivado da produção do etanol no processo de destilação do vinho na fermentação do caldo de cana de açúcar, melaço ou a mistura de ambos. Esse composto uma vez aplicado ao campo é reaproveitado pela cultura não sendo assim descartada com ou sem tratamento aos corpos hídricos comprometendo os corpos de águas superficiais e subterrâneos ou até mesmo a salinização do solo (OMETTO et al, 2000).

Assim como o uso de fertilizantes na irrigação, o estudo sobre o escoamento em dutos pressurizados é importante para a engenharia e o cenário atual na irrigação. O conhecimento sobre a dissipação de energia durante o escoamento é necessário para o dimensionamento correto de sistemas de irrigação, porque essas características afetam na distribuição e uniformidade de água no solo e também em como será feito o manejo da irrigação. No dimensionamento, a perda de carga e consequentemente o fator de atrito pode ser determinado por diversas formulações, onde algumas se destacam mais que outras (LIMA et al, 2009)

O uso das equações de atrito nem sempre são as mesmas para as mesmas situações, na Turquia, por exemplo, as entidades governamentais ao dimensionar uma tubulação de rede pluvial ou esgoto em tubulação de concreto usam equações diferentes dependendo da região como: a equação de Manning, Kutter, Prandtl-

Colebrook, Hazen-Williams e Darcy-Weisbach. Assim como a análise em rede pluvial e esgoto é importante para indicar uma equação mais aceitável naquela condição (CETIN; YURDUSEV, 2016), o estudo da equação do atrito no fluido composto por vinhaça e vinhaça com poliamida precisam de ser mais aprofundadas e até indicar uma equação mais próxima do real com o objetivo de reduzir os custos no dimensionamento e ter maior assertividade no equacionamento do atrito.

Determinado o fator de atrito, podemos determinar a perda de carga na tubulação que é um fator importante para a hidráulica, dado que, este balanço afeta diretamente no custo total do projeto, durabilidade e eficiência no funcionamento. No cálculo da perda de carga, a equação de Colebrook White é amplamente utilizada em muitos campos como na Engenharia Civil para a rede de distribuição de água ou na Engenharia Agrícola na irrigação e em todos os campos da Engenharia que trabalham com escoamentos forçados de fluidos. Existem diversas equações na literatura a fim de simplificar o fator de atrito, sendo algumas simples e outras um pouco mais complexas. Para simplificar o cálculo universal do fator de atrito usa-se restrições em seu diâmetro ou em seu fator de rugosidade constante que evite os métodos iterativos que se tem na equação de Colebrook - White, essa por sua vez é uma equação implícita e necessita de métodos iterativos para obter sua solução, que apesar da tecnologia atual permitir o uso de ferramentas de cálculos iterativos, seu uso em uma obra com uma rede de tubulações e a execução de múltiplos cálculos pode torná-la menos atraente. Porém, quando essas expressões matemáticas para determinar f se limitam a essas restrições, a equação pode ter sua exatidão contestada. Dessa forma, o engenheiro responsável pelo projeto pode escolher qual equação se adequa melhor ao proposto e quantas variáveis irá considerar para o projeto (SONNAD; GOUDAR, 2006).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Comparar e analisar diferentes equações para obtenção do fator de atrito usado na equação de Darcy-Weisbach, calculando assim a perda de carga teórica e, comparando com resultados obtidos a partir dos dados experimentais de perda de carga no escoamento com vinhaça com ou sem a adição de poliacrilamida.

1.1.2 Objetivos específicos

a) Calcular e comparar os resultados do fator de atrito obtido pelas equações teóricas no escoamento de vinhaça com e sem adição de polímero redutor de atrito;

b) Comparativo dos dados de perda de carga obtidos experimentalmente com os dados teóricos das equações, com e sem o uso de polímero, indicando qual apresenta melhor ajuste com os dados observados.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O Fator de atrito é um parâmetro adimensional utilizado para calcular a perda de carga em sistemas de tubulação forçada. Ele é um dos parâmetros que influenciam na perda de carga que a bomba deverá “vencer”. Para seu cálculo deve-se conhecer ao menos três parâmetros, que são o Número de Reynolds, o tipo de fluido escoado e o material da tubulação, sendo este último item que irá indicar a rugosidade das paredes do tubo. Na literatura deve-se verificar o tipo de fator em que se está se trabalhando, de Darcy ou Fanning, usualmente utiliza-se o de Darcy. Em regime turbulento existem equações que podem apresentar um valor mais preciso, essas equações servem para tubos lisos, ou tubos lisos. (AZEVEDO NETO, 1998).

Em geral, a precisão e complexidade das equações estão correlacionadas. O esforço necessário em usar uma equação é proporcional à sua complexidade e, no geral estudantes, engenheiros e pesquisadores procuram usar a equação mais simples que fornece precisão "razoável". (MUZZO, 2019).

O maior desafio da determinação da perda de carga é a estimativa do fator de atrito, pois ele é essencial para o cálculo de perda de carga em tubulações e, quando o escoamento é laminar, pode ser expresso pela equação 1, onde f é dependente somente de Reynolds expressa pela equação 2.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (1)$$

Onde:

f - fator de atrito, adimensional;

Re - número de Reynolds, adimensional.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2)$$

Em que:

Re - número de Reynolds, adimensional;

v - velocidade de escoamento do fluido, m s⁻¹;

D - diâmetro interno da tubulação, m;

μ - viscosidade dinâmica do líquido, PI – Poiseuille (equivalente a $\text{N m}^{-2} \text{s}$).

Nesse caso o fator de atrito depende somente das propriedades do fluido, entretanto, em regime turbulento essa estimativa torna-se mais complexa por f tornar-se em função da rugosidade relativa das paredes dos tubos e de Reynolds (SONNAD; GOUDAR, 2006).

2.1 EQUAÇÃO DE BLASIUS

A equação de Blasius (Equação 3), do tipo potencial, explicitando f e possui duas constantes adimensionais. Foi a primeira equação proposta para tubos lisos e quando Reynolds está entre 4000 e 10^5 e é uma equação que depende apenas de Reynolds para estimar o fator de atrito VON BERNUTH, 1990.

$$f = \frac{C}{Re^m} \quad (3)$$

Em que:

f - fator de atrito, adimensional;

C - constante, adimensional;

Re - número de Reynolds, adimensional;

m - constante, adimensional.

Quando Blasius propôs esta equação para estimar f , ele determinou m com valor igual a 0,25, e c seria outra constante com valor igual a 0,316, assumindo a forma da equação 4.

$$f = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \quad (4)$$

Em que:

f - fator de atrito, adimensional;

Re - número de Reynolds, adimensional.

Algumas das vantagens da equação estimada é que ela pode ser corrigida para diferentes viscosidades da água. Apesar de bem simples possui base teórica e é considerada dimensionalmente homogênea, também podendo ser usada em tubos com diâmetros inferiores a 80mm. Porém, quando Reynolds é inferior a 4000, essa equação tende a superestimar o resultado do atrito (VON BERNUTH, 1990) e quando o regime é turbulento em um tubo liso com Re entre 7000 e 40000, a equação de Blasius é um método preciso para determinar o coeficiente de atrito da equação de Darcy-Weisbach. (FRIZZONE et al.,2008).

2.2 EQUAÇÃO DE VON KARMAN- PRANDTL

Quando os dados se apresentam fora do intervalo recomendado na literatura para uso da equação de Blasius costuma-se usar a equação de Von Karmán-Prandtl, expressa pela equação 5.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log(Re \sqrt{f}) - 0,8 \quad (5)$$

Em que:

f - fator de atrito, adimensional;

Re - número de Reynolds, adimensional.

Apesar de mais simples, a estimativa de f é por método iterativo e isso pode aumentar o trabalho computacional em uma rede de tubulações complexas, onde é preciso calcular múltiplos fatores de atrito, o que levou vários autores a desenvolverem estimativas explícitas para essas equações (ROMEIO; ROYO; MONZÓN, 2002).

2.3 EQUAÇÃO DE NIKURADSE

Segundo Porto, 2006, Nikuradse em 1933 realizou experimentos em tubulações circulares e lisos e rugosos em uma ampla faixa de Reynolds. Para controlar a rugosidade uniforme Nikuradse revestiu a parede interna do tubo com areia de granulometria controlada.

O trabalho de Nikuradse é expresso pelas equações 6 e 7, tanto em tubos lisos e rugosos sendo amplamente usado, pois representa bem o comportamento do fluido em um grande intervalo de Número de Reynolds, porém não possui bom ajuste em regime de transição (CHENG, 2008).

$$f = 0,0032 + 0,221(Re)^{-0,237} \quad (6)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,74 - 2\log\left(\frac{2E}{D}\right) \quad (7)$$

Em que:

f - fator de atrito, adimensional;

Re - número de Reynolds, adimensional;

E - rugosidade absoluta do tubo, m;

D - diâmetro interno do tubo, m.

Onde a equação 6 é recomendada para regime turbulento e condutos lisos e a equação 7 no regime de turbulência plena (ALLEN, 1996).

Diversas equações desenvolvidas ao longo do tempo possuem uma certa dificuldade na acurácia em regime de transição. No entanto, para solucionar essa limitação, é possível através de um modelo probabilístico computacional efetuar técnicas de interpolação e assim conseguir um valor que se aproxime do valor real (SIMÕES et al., 2017).

2.4 EQUAÇÃO DE COLEBROOK-WHITE

Da fórmula de Prandtl-Von Karmán em regime turbulento liso ao argumento da função logaritmo da fórmula de Von Karmán no regime turbulento rugoso foi possível expressar a equação de Colebrook-White (Equação 8) para tubos comerciais. Os valores traduziam com acurácia os valores experimentais obtidos.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\left(\frac{2E}{3,71} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}}\right) \quad (8)$$

Em que:

f - fator de atrito, adimensional;

Re - número de Reynolds, adimensional;

E - rugosidade absoluta do tubo, m;

D - diâmetro interno do tubo, m.

A nova equação expressa é considerada “melhor” que a equação de Nikuradse já que esta apresentava melhor os valores quando a rugosidade dos tubos era uniforme apenas e na equação de Colebrook-White os resultados na utilização de tubos comerciais trazem os valores experimentalmente obtidos da rugosidade de cada material, tornando-a assim uma equação universal para o cálculo de f , válida para o intervalo $4000 < Re < 10^8$ e rugosidade equivalente a $0 < \frac{k}{D} < 0,05$ (FRIZZONE et al., 2008).

Apesar de ser considerada uma equação de referência, podendo se correlacionar com as equações explícitas, a equação em si pode conter no geral de 3% a 5% de erro comparada a dados experimentais (ZIGANG, 1985).

A desvantagem dessa equação é que ela necessita de métodos iterativos e as equações não iterativas são comumente mais utilizadas e como vantagem, os valores obtidos possuem grau menor de erro. (CARDOSO et al., 2008)

2.5 EQUAÇÃO DE MOODY

Para atender as necessidades e não utilizar procedimentos que tenham processo numérico sempre que seja necessário calcular o atrito f , com o uso das fórmulas de Hagen-Poiseuille e Colebrook-White, Moody em 1944 desenvolveu um ábaco que poderia com facilidade encontrar o atrito em função do número de Reynolds e a rugosidade relativa. (MOODY, 1944; MOODY, 1947). Estes gráficos são chamados de ábacos ou diagrama de Moody. Apesar dessa conquista, Moody considerou uma equação que tornava f explicitamente ideal e, em 1947, propôs a primeira equação explícita para substituir a equação de Colebrook-White, chamada de equação de Moody (Equação 9).

$$f = 0,0055 \left[1 + \left(20000 \frac{E}{D} + \frac{10^6}{Re} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (9)$$

Em que:

f - fator de atrito, adimensional;

Re- número de Reynolds, adimensional;

E - rugosidade absoluta do tubo, m;

D- diâmetro interno do tubo, m.

A equação, apesar de atender seu propósito de explicitar, gera um desvio de até 15% em relação aos dados experimentais (NELSON; NGUYEN, 1988).

Desde então uma série de aproximações explícitas cada vez mais precisas e complexas foram publicadas objetivando não depender da iteratividade cada vez que fosse necessário obter o fator de atrito.

2.6 EQUAÇÃO DE PRANDTL-COLEBROOK

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,74 - 2 \log \left(\frac{2E}{D} + \frac{18,7}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (10)$$

Em que:

f - fator de atrito, adimensional;

Re- número de Reynolds, adimensional;

E - rugosidade absoluta do tubo, mm;

D- diâmetro interno do tubo, mm.

2.7 EQUAÇÃO DE SWAMEE & JAIN

Desenvolvida pelos pesquisadores Swamee & Jain, 1976, é expressa pela equação 11 e calcula o fator de atrito sem restrições quanto ao regime de escoamento, número de Reynolds e rugosidade relativa (PORTO, 2006).

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{Re} \right)^8 + 9,5 \left[\ln \left(\frac{E}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{Re} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (11)$$

Em que:

f - fator de atrito, adimensional;

Re - número de Reynolds, adimensional;

E - rugosidade absoluta do tubo, mm;

D - diâmetro interno do tubo, mm.

Embora a expressão Swamee & Jain seja universalmente aplicável, os engenheiros e projetistas possuíam uma relutância em usá-la porque havia pouca pesquisa sobre esta equação e pode haver desvios que podem condenar o sistema de irrigação, seja devido ao tamanho excessivo, ou aumento de custo, ou até mesmo o subdimensionamento, fazendo com que o fluxo e a pressão sejam menores do que o esperado (ANDRADE et al., 2000).

2.8 EQUAÇÃO DE DARCY-WEISBACH

A equação universal de perda de carga é a mais difundida dentre todas as equações para o cálculo de perda de carga em dutos pressurizados expressa pela equação 12 (PORTO, 2006).

$$hf = f \frac{LV^2}{D2g} \quad (12)$$

Em que:

hf - perda de carga, m;

f – fator de atrito, adimensional;

L - comprimento da tubulação, m.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O Experimento realizado na Universidade Federal do Paraná – Campus Avançado de Jandaia do Sul emprega métodos computacionais para encontrar o

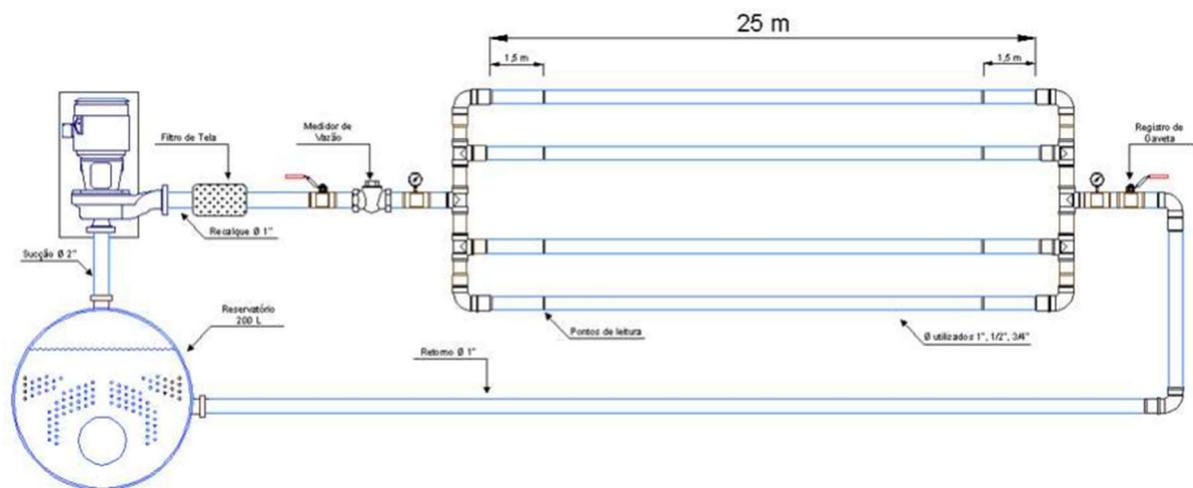
melhor ajuste das equações para obtenção do fator de atrito utilizando os dados Experimentais de Justi,2012.

3.1 METODOLOGIA DO EXPERIMENTO DE JUSTI, 2012.

O Experimento do autor foi conduzido no Laboratório de Ensaio de Equipamentos para Irrigação do Departamento de Engenharia Rural pertencente à Faculdade de Ciências Agrônomicas – UNESP/Botucatu – SP e consistiu em um sistema montado para possibilitar a variação da vazão na tubulação e a troca facilitada dos tubos, possuindo ainda controle de pressão nos tubos por meio de um manômetro diferencial com mercúrio contendo escala para realizar a leitura em milímetros.

No Experimento o autor variou o diâmetro em 3 níveis e a vazão em 4 níveis de vazão diferentes para cada diâmetro ensaiado. Os diâmetros utilizados foram 1 polegada, 3/4 de polegada e 1/2 polegada e vazões com abrangência desde regime laminar até o regime turbulento, com valores de 0,352, 0,225, 0,125 e 0,050 $L \cdot s^{-1}$. Os ensaios foram realizados em um circuito onde a vinhaça e vinhaça + poliacrilamida escoou com reciclagem dos fluidos, de acordo com a figura 1.

FIGURA 1- LAYOUT DO CIRCUITO MONTADO PARA OS ENSAIOS

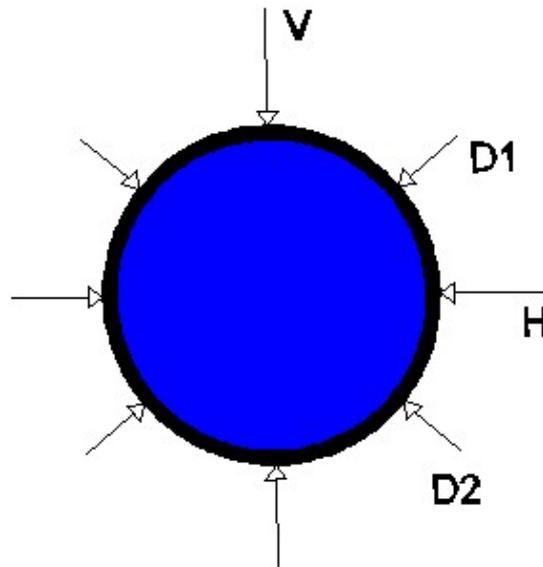


FONTE: Justi,2012

Os diâmetros utilizados nos cálculos foram obtidos com a subtração da espessura da parede dos tubos analisados e o autor mensurou ainda o diâmetro

externo em quatro direções, conforme a figura 2, visto que os tubos não possuíam formato perfeitamente circular.

FIGURA 2 - LOCAL DE LEITURAS DOS DIÂMETROS



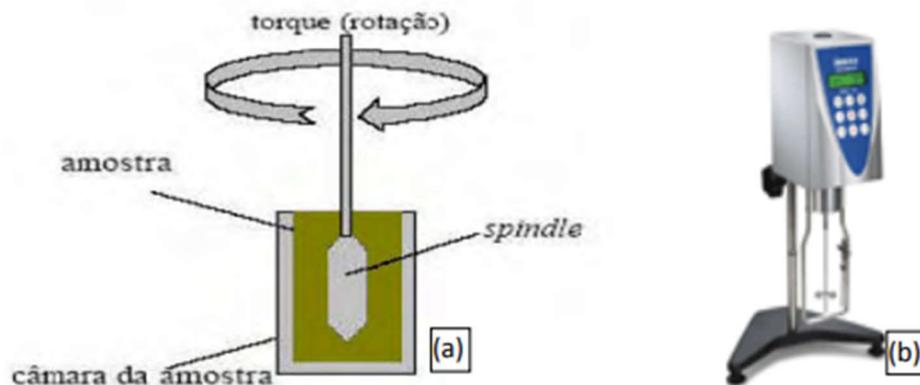
FONTE: Justi, 2012.

O autor obteve o polímero para redução de atrito (poliacrilamida) com a empresa SNF do Brasil Ltda, sob nome comercial de FLONEX 9051 SI. O produto utilizado foi na concentração de 10 ppm. O polímero se caracteriza como um pó claro de cor branca levemente rosado, sua densidade aparente e de $0,80 \text{ g.cm}^{-3}$, sua viscosidade de 500 cP com concentração de 5 g.L^{-1} , também viscosidade de 200 cP na concentração de $2,5 \text{ g.L}^{-1}$ e 80 cP na concentração de $1,0 \text{ g.L}^{-1}$ com pureza de 90%.

A vinhaça foi obtida na Usina Açucareira São Manoel, no município de São Manoel-SP e pode variar sua composição e características dependendo da destilaria onde é obtida, não sendo viável usar um valor único de literatura nesse experimento. Assim, a vinhaça utilizada no experimento passou pela análise no Laboratório de Fertilizantes e Corretivos do Departamento de Recursos Naturais/UNESP-Botucatu. A massa obtida foi de $1,00 \text{ g.cm}^{-3}$. O pH da vinhaça foi de 5,27, seu teor de carbono de $4,45 \text{ g.L}^{-1}$ e a condutividade elétrica de $8,21 \text{ mS.cm}^{-1}$. Para viscosidade, foi

utilizado um viscosímetro rotacional da marca Brookfield do laboratório de análises do Centro de Raízes e Amidos Tropicais-CERAT da faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu. A amostra lida em centi Poises (cP) a 15°C resultou no valor de 2,24 cP, valor esse considerado nos cálculos de perda de carga na equação de Darcy-Weisbach.

FIGURA 3 - (a) ESQUEMA DE OPERAÇÃO DO VISCOSÍMETRO. (b) VISCOSÍMETRO DE BROOKFIELD



FONTE: Brookfield Engineering / AMETEK

3.2 METODOLOGIA DA ANÁLISE COMPARATIVA DOS DADOS

Com os dados experimentais de Justi,2012, que em suas simulações obteve uma gama de informações relativas à perda de carga, se pode trabalhar vários aspectos que envolvem tal parâmetro e consequentemente valores de fator de atrito, essa última é a parte interessada nesse experimento.

Foram desenvolvidos algoritmos (quadros 1 a 9) para o cálculo das equações de atrito e perda de carga e, as variáveis de entrada utilizadas foram a vazão nominal, vazão por tubo, diâmetro nominal, diâmetro médio, substância utilizada no experimento, perda de carga - ΔH (mHg), perda de carga observada (m), perda de carga calculada, atrito observado, atrito calculado, Número de Reynolds, viscosidade cinemática calculada e viscosidade cinemática obtida em laboratório. Esses valores tabelados foram obtidos para vazão de 1,41; 0,9; 0,5 e 0,2 $L.s^{-1}$

Todos os cálculos utilizando as equações determinadas foram realizadas no software R, versão 4.0.1, utilizando o RStudio, versão 1.3.959, ambos para a plataforma Windows 10.

O cálculo do Número de Reynolds foi feito com o uso do algoritmo apresentado no quadro 1.

QUADRO 1 - ALGORITMO PARA CÁLCULO DO NÚMERO DE REYNOLD (Equação 2).

```
#constantes e valores a inserir
Ro <- [valor] # massa específica do líquido vinhaça kg m-3
expe <- 0 # espessura da parede
De <- 0.02673 # m Diâmetro nominal
Q <- [valor] #m³/s
Mi <- 0.000954 # viscosidade dinâmica do líquido 0,0954 cp ou 9,54×10-4
P-s
#Cálculos
D <- De-2*expe # diâmetro interno da tubulação
A <- pi*((D/2)^2) # cálculo da área
v <- Q/A # velocidade de escoamento do fluido
Re <- Ro*v*D/Mi # Número de Reynolds
print(Re)
```

Os quadros de 2 a 9 apresentam os algoritmos desenvolvidos para a obtenção do fator de atrito para as equações de Blasius; Von Karmán-Prandtl; Nikuradse; Colebrook- White; Moody; Swamee&Jain, respectivamente.

QUADRO 2 - ALGORITMO PARA CÁLCULO DA EQUAÇÃO DE BLASIUS (Equação 4).

```
#Variáveis
Re<- [valor]
#Cálculo
f<- 0.316*(Re^-0.25)
```

```
print (f) # retorna o valor do atrito f
```

QUADRO 3 - ALGORITMO PARA CÁLCULO DA EQUAÇÃO DE VON KARMAN-PLANDTL (Equação 5).

```
x=0 # parâmetro inicial para iteratividade
D <- [valor] # Diâmetro
Re <- [valor] #Reynolds
f <- 64/Re #atrito em condição inicial, chute inicial
while((x<50)) { # parâmetro de interação
print(f) # irá plotar o valor de atrito em todas as iterações
f <- f
f <- (1/(2*log(Re*sqrt(Fa))-0.8))^2 # equação.
x=x+1 # x adiciona ele mesmo, irá parar quando x atingir valor de iteração}
print (f) #plota o valor final do atrito
```

QUADRO 4 - ALGORITMO PARA CÁLCULO DA EQUAÇÃO DE NIKURADSE (TUBOS LISOS) (Equação 6).

```
#Variáveis
Re<- [valor] # valor de Reynolds calculado
#Cálculo
f <- 0.0032+(0.221*(Re^-0.237))
print (f) # retorna o valor do atrito f
```

(EQUA

QUADRO 5 - ALGORITMO PARA CÁLCULO DA EQUAÇÃO DE NIKURADSE (TUBOS RUGOSOS) (Equação 7).

```
#Variáveis
e <- [valor] # rugosidade relativa
D <- [valor] # diâmetro
#Cálculo
f <- (1/(1.74-(2*log10(2*e/D))))^2
print (f) # retorna o valor do atrito f
```

QUADRO 6 - ALGORITMO PARA CÁLCULO DA EQUAÇÃO DE COLEBROOK-WHITE ((Equação 8).

```

x=0 # parâmetro inicial para iteratividade
e <- [valor] # rugosidade relativa
D <- [valor] # diâmetro
Re <- [valor] # número Reynolds
f <- 64/Re #atrito em condição inicial chute inicial
while((x<50)) {# parâmetro de iteração
  print(f) # irá plotar o valor de atrito em todas as iterações
  f <- f
  f<- (1/(-2*log10(((2*e)/(3.71*D))+2.51/(Re*sqrt(Fa))))))^2# executa cálculo
  x=x+1 # x adiciona ele mesmo, irá parar quando x atingir valor de iteração}
print(f) #plota o valor final do atrito

```

QUADRO 7 - ALGORITMO PARA CÁLCULO DA EQUAÇÃO DE MOODY ((Equação 9)

```

x=0 # parâmetro inicial para iteratividade
e <- [valor] # relative roughness
D <- [valor] # diâmetro
Re <- [valor] # número Reynolds
f <- 0.0055*(1+(20000*(e/D)+((10^6)/Re))^(1/3)) # executa cálculo
print(f) #plota o valor final do atrito

```

QUADRO 8 - ALGORITMO PARA CÁLCULO DA EQUAÇÃO DE PLANDTL-COLEBROOK ((Equação 10)

```

x=0 # parâmetro inicial para iteratividade
e <- 0.00001 # rugosidade relativa
D <- 0.02673 # diâmetro
Re <- 7493 # número Reynolds
f <- 64/Re #atrito em condição inicial chute inicial
while((x<50)) {# parâmetro de iteração
  print(f) # irá plotar o valor de atrito em todas as iterações
  f <- f

```

```
f<- (1/(1.74-2*log10((2*e/D)+(18.7/(Re*sqrt(Fa))))))^2 # executa cálculo

x=x+1 # x adiciona ele mesmo, irá parar quando x atingir valor de iteração
}
print(f) #plota o valor final do atrito
```

QUADRO 9 - ALGORITMO PARA CÁLCULO DA EQUAÇÃO DE SWAMEE & JAIN ((Equação 11)

```
x=0 # parâmetro inicial para iteratividade
e <- 0.0001 # rugosidade relativa
D <- [valor] # diâmetro
Re <- [valor] # número Reynolds

Fa <- (0.25/(log10((e/D/3.7)+(5.74/(Re^0.9))))^2)
print(Fa) #plota o valor final do atrito
```

Os valores de entradas foram inseridos no R, obtendo os valores de atrito por equação para cada diâmetro e vazão com e sem a adição de polímero permitindo a elaboração e comparação de gráficos e tabelas.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Utilizando a metodologia definida e apresentada, obteve-se as tabelas e com onde é possível através dos gráficos comparar as proximidades das curvas de perda de carga conforme varia-se a vazão.

TABELA 1 - VAZÃO, DADOS DE PERDA DE CARGA OBSERVADOS E CALCULADOS COM ATRITO OBTIDO PELAS DIFERENTES EQUAÇÕES ESCOANDO VINHAÇA COM TUBO DE 1" DE DIÂMETRO.

Vazão*	Observado	Blasius	V. Prandlt	Nikuradse 1	Colebrook	Nikuradse 2	Moody	P.Colebrook	Swamee & Jain
1,41	0,75	0,56	0,11	0,49	0,57	0,26	0,63	0,56	0,64
0,90	0,34	0,29	0,06	0,26	0,30	0,12	0,32	0,30	0,33
0,50	0,15	0,14	0,03	0,12	0,15	0,05	0,16	0,08	0,16
0,20	0,03	0,03	0,01	0,03	0,04	0,01	0,04	0,04	0,04

Obs: As unidades da tabela estão em metros (m) exceto para vazão* que está em litros por segundo (L.s⁻¹).

GRÁFICO 1 - VAZÃO (L.s⁻¹) X PERDA DE CARGA OBSERVADA E CALCULADA COM ATRITO OBTIDO POR DIFERENTES EQUAÇÕES PARA VINHAÇA COM TUBO DE 1" DE DIÂMETRO.

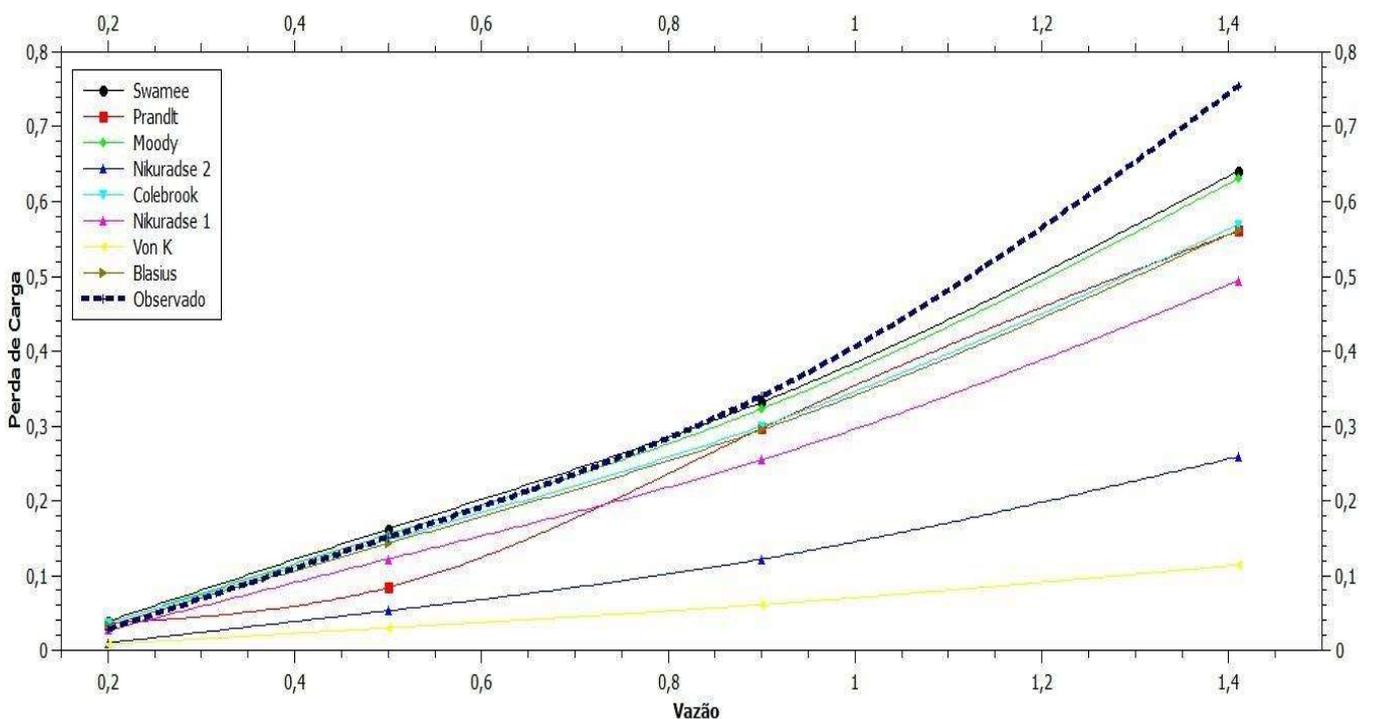


TABELA 2 - RESÍDUOS PARA VINHAÇA COM DIÂMETRO DE 1 POLEGADA

Vazão*	Observado	Blasius	V. Prandtl	Nikurads e 1	Colebrook	Nikurads e 2	Moody	P.Colebrook	Swamee & Jain
1,41	0,750	0,188	0,636	0,494	0,181	0,491	0,119	0,188	0,109
0,90	0,332	0,037	0,271	0,255	0,032	0,209	0,008	0,035	0,000
0,50	0,151	0,008	0,121	0,122	0,003	0,098	-0,004	0,067	-0,010
0,20	0,025	-0,008	0,018	0,027	-0,011	0,015	-0,011	-0,011	-0,014
Soma dos resíduos		0,240	1,046	0,899	0,227	0,814	0,142	0,301	0,133

Obs: As unidades da tabela estão em metros (m) exceto para vazão* que está em litros por segundo ($L.s^{-1}$).

Realizando uma análise das curvas obtidas no gráfico 1, observa-se que as equações de Swamee&Jain e Moody melhor descreveram os resultados observados. Analisando a Tabela 2 em função dos resíduos, confirmou-se essa verificação. A equação de Von Karmán e Nikuradse 2 não teve aproximações comparativamente boas em relação às outras equações para descrever o fenômeno de perda de carga para essa situação.

Com a adição do polímero ocorrem alterações nos valores de perda de carga que pode ser observada no gráfico 2. Os valores obtidos que melhor se ajustam ao experimento nessas condições é a equação de Blasius e Colebrook e a que pior descreve é novamente a equação de Nikuradse 2 e Von Karmán. Esse melhor ajuste é observado na soma dos resíduos, sendo, portanto, a equação de melhor indicativo para esse diâmetro e fluido.

TABELA 3 - VAZÃO, DADOS DE PERDA DE CARGA OBSERVADOS E CALCULADOS COM ATRITO OBTIDO PELAS DIFERENTES EQUAÇÕES ESCOANDO VINHAÇA+POLÍMERO COM TUBO DE 1" DE DIÂMETRO.

Vazão*	Observado	Blasius	V. Prandtl	Nikuradse 1	Colebrook	Nikuradse 2	Moody	P.Colebrook	Swamee & Jain
1,41	0,57	0,57	0,12	0,50	0,58	0,26	0,64	0,57	0,65
0,90	0,27	0,29	0,06	0,25	0,29	0,13	0,32	0,29	0,33
0,50	0,12	0,13	0,03	0,11	0,13	0,05	0,14	0,07	0,14
0,20	0,02	0,04	0,01	0,03	0,04	0,01	0,04	0,04	0,04

Obs: As unidades da tabela estão em metros (m) exceto para vazão* que está em litros por segundo (L.s⁻¹).

GRÁFICO 2 – VAZÃO (L.s⁻¹) X PERDA DE CARGA OBSERVADA E CALCULADA COM ATRITO OBTIDO POR DIFERENTES EQUAÇÕES PARA VINHAÇA+POLÍMERO COM TUBO DE 1" DE DIÂMETRO.

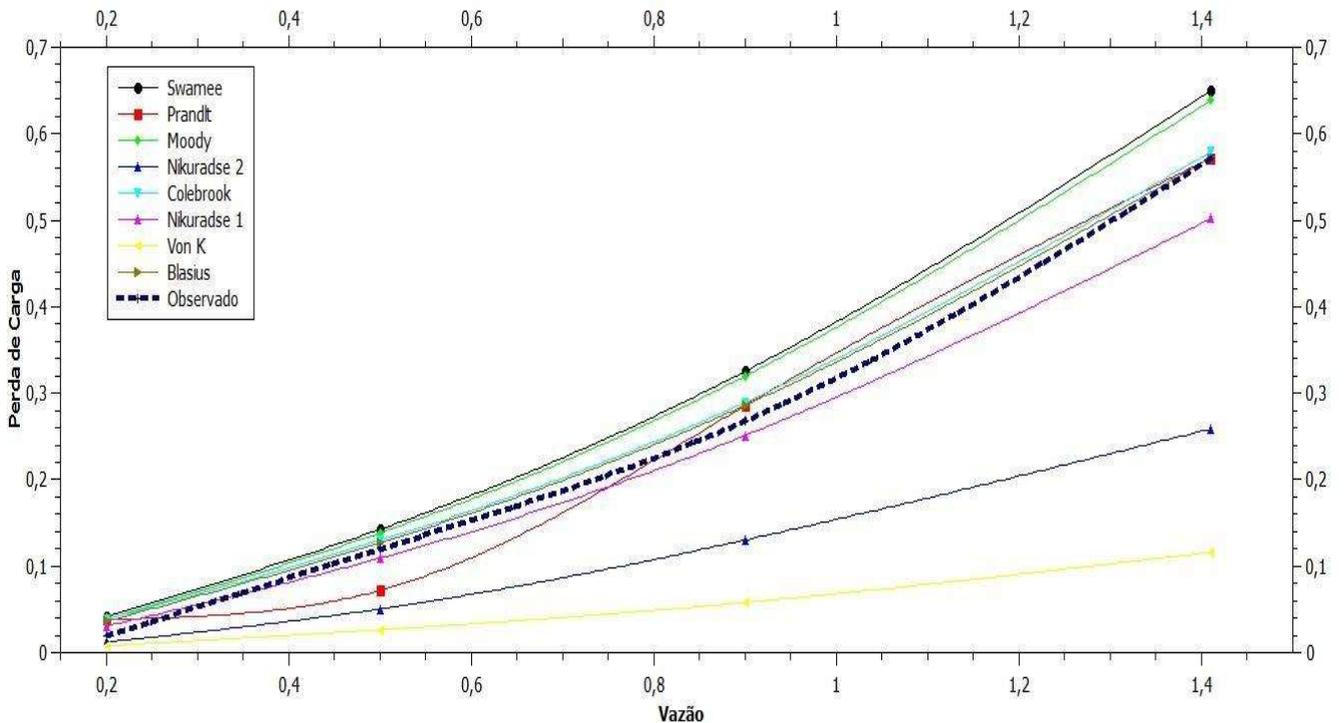


TABELA 4 - RESÍDUOS PARA VINHAÇA COM ADIÇÃO DE POLIACRILAMIDA COM DIÂMETRO DE 1 POLEGADA

Vazão*	Observado	Blasius	V. Prandlt	Nikurads e 1	Colebrook k	Nikurads e 2	Moody	P.Colebrook	Swamee & Jain
1,41	0,571	-0,001	0,455	0,069	-0,008	0,312	-0,068	-0,001	-0,079
0,90	0,268	-0,018	0,210	0,017	-0,022	0,137	-0,052	-0,018	-0,058
0,50	0,120	-0,007	0,093	0,010	-0,010	0,069	-0,019	0,048	-0,023
0,20	0,019	-0,017	0,011	-0,012	-0,020	0,007	-0,020	-0,019	-0,023
Soma dos Resíduos		0,044	0,769	0,108	0,060	0,526	0,159	0,086	0,183

Obs: As unidades da tabela estão em metros (m) exceto para vazão* que está em litros por segundo (L.s⁻¹).

A Tabela 5 apresenta os dados comparativos com o diâmetro analisado foi ¾", sendo expressos também no gráfico 3.

TABELA 5 - VAZÃO, DADOS DE PERDA DE CARGA OBSERVADOS E CALCULADOS COM ATRITO OBTIDO PELAS DIFERENTES EQUAÇÕES ESCOANDO VINHAÇA COM TUBO DE ¾" DE DIÂMETRO.

Vazão*	Observado	Blasius	V. Prandlt	Nikurads e 1	Colebrook k	Nikurads e 2	Moody	P.Colebrook	Swamee & Jain
1,41	1,53	1,64	0,33	1,46	1,68	0,84	1,93	1,65	1,96
0,90	1,09	1,15	0,23	1,01	1,17	0,55	1,32	1,14	1,35
0,50	0,46	0,68	0,14	0,59	0,70	0,29	0,76	0,59	0,78
0,20	0,02	0,19	0,04	0,16	0,21	0,07	0,21	0,20	0,23

Obs: As unidades da tabela estão em metros (m) exceto para vazão* que está em litros por segundo (L.s⁻¹).

Nessa condição a equação de Swamee & Jain e Moody superestima os resultados em toda extensão da curva, enquanto a equação de Von Karmán e

Nikuradse 2 subestima, enquanto a equação de Nikuradse 1 mais se aproxima do resultado observado, situação confirmada também numericamente na soma dos resíduos da tabela 6.

GRÁFICO 3 - VAZÃO (L.s⁻¹) X PERDA DE CARGA OBSERVADA E CALCULADA COM ATRITO OBTIDO POR DIFERENTES EQUAÇÕES PARA VINHAÇA COM TUBO DE 3/4" DE DIÂMETRO.

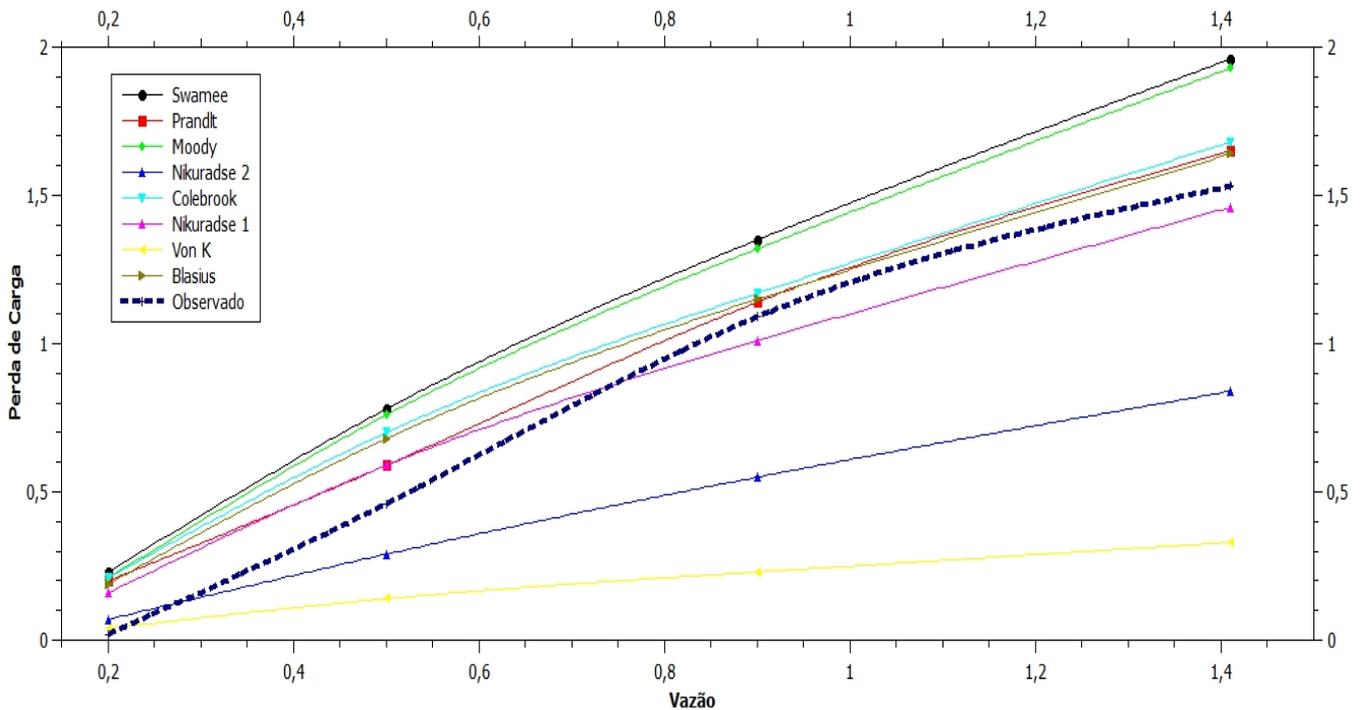


TABELA 6 - RESÍDUOS PARA VINHAÇA COM DIÂMETRO DE 3/4 DE POLEGADAS.

Vazão*	Observa do	Blasius	V. Prandtl	Nikurads e 1	Colebroo k	Nikurads e 2	Moody	P.Colebr ook	Swamee & Jain
1,41	1,528	-0,117	1,197	0,068	-0,151	0,685	-0,403	-0,119	-0,436
0,90	1,093	-0,060	0,859	0,083	-0,082	0,548	-0,223	-0,050	-0,253
0,50	0,457	-0,224	0,315	-0,130	-0,242	0,170	-0,300	-0,133	-0,325
0,20	0,021	-0,172	-0,021	-0,141	-0,184	-0,046	-0,190	-0,183	-0,204
Soma dos Resíduos		0,573	2,393	0,422	0,659	1,448	1,116	0,485	1,219

Obs: As unidades da tabela estão em metros (m) exceto para vazão* que está em litros por segundo (L.s⁻¹).

A Tabela 7 permite a confecção do gráfico 4, nessa condição é possível observar uma situação diferente das anteriores, onde a equação de Nikuradse 2 mais se aproxima do resultado observado. Assim é possível visualizar que a equação de Von-Karmán subestima o comportamento da perda de carga enquanto as outras equações superestimam a perda de carga.

TABELA 7 - VAZÃO, DADOS DE PERDA DE CARGA OBSERVADOS E CALCULADOS COM ATRITO OBTIDO PELAS DIFERENTES EQUAÇÕES ESCOANDO VINHAÇA+POLÍMERO COM TUBO DE 3/4" DE DIÂMETRO.

Vazão*	Observado	Blasius	V.Prandlt	Nikuradse 1	Colebrook	Nikuradse 2	Moody	P.Colebrook	Swamee & Jain
1,41	1,23	1,68	0,34	1,49	1,71	0,84	1,96	1,68	1,99
0,90	0,57	0,99	0,20	0,88	1,01	0,51	1,16	0,99	1,18
0,50	0,24	0,65	0,13	0,57	0,67	0,30	0,74	0,91	0,76
0,20	0,05	0,04	0,01	0,04	0,05	0,02	0,05	0,05	0,05

Obs: As unidades da tabela estão em metros (m) exceto para vazão* que está em litros por segundo (L.s⁻¹).

GRÁFICO 4- VAZÃO (L.s⁻¹) X PERDA DE CARGA OBSERVADA E CALCULADA COM ATRITO OBTIDO POR DIFERENTES EQUAÇÕES PARA VINHAÇA+POLÍMERO COM TUBO DE 3/4" DE DIÂMETRO.

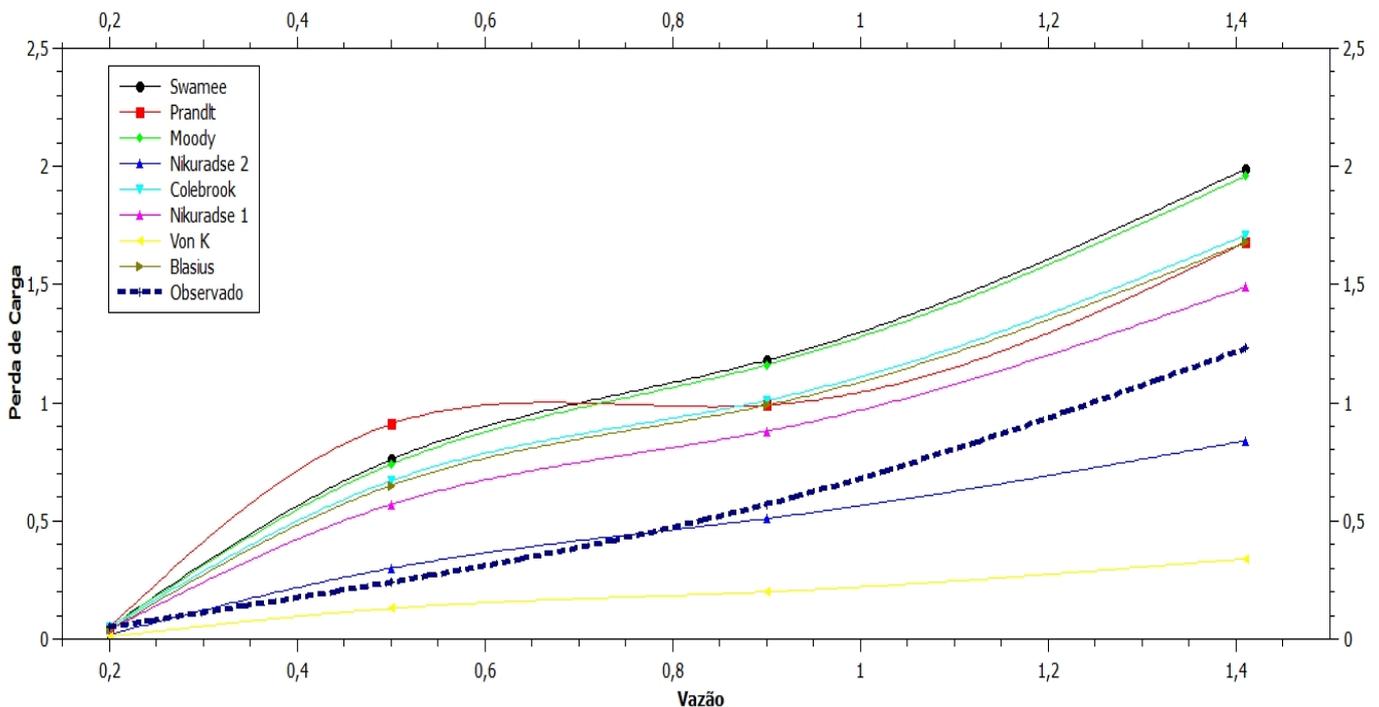


TABELA 8 - RESÍDUOS PARA VINHAÇA COM ADIÇÃO DE POLIACRILAMIDA COM DIÂMETRO DE 3/4 DE POLEGADAS

Vazão*	Observa do	Blasius	V. Prandlt	Nikurads e 1	Colebroo k	Nikurads e 2	Moody	P.Colebr ook	Swamee & Jain
1,41	1,235	-0,444	0,897	-0,250	-0,477	0,391	-1,956	-0,446	-0,757
0,90	0,570	-0,421	0,371	-0,309	-0,442	0,065	-1,161	-0,423	-0,612
0,50	0,236	-0,417	0,103	-0,334	-0,430	-0,065	-0,740	-0,669	-0,523
0,20	0,054	0,009	0,044	0,016	0,006	0,037	-0,049	0,007	0,002
Soma dos Resíduos		1,291	1,414	0,909	1,356	0,557	3,907	1,545	1,893

Obs: As unidades da tabela estão em metros (m) exceto para vazão* que está em litros por segundo ($L.s^{-1}$).

Na mesma condição da tabela 7 e gráfico 4, porém com a adição de polímero resulta na tabela 9 e gráfico 5, onde obtém-se a equação que melhor descreve o comportamento da perda de carga observada é a equação de Nikuradse 2 e a equação de Nikuradse 1 comprovado pelo menor valor das somas dos resíduos na tabela 10.

TABELA 9 - VAZÃO, DADOS DE PERDA DE CARGA OBSERVADOS E CALCULADOS COM ATRITO OBTIDO PELAS DIFERENTES EQUAÇÕES ESCOANDO VINHAÇA COM TUBO DE 1/2" DE DIÂMETRO.

Vazão*	Observa do	Blasius	V. Prandlt	Nikurad se 1	Colebroo ok	Nikurad se 2	Moody	P.Coleb rook	Swamee & Jain
1,41	6,02	6,90	1,38	6,20	7,21	4,08	8,80	6,98	8,97
0,90	2,49	3,91	0,79	3,46	4,04	2,10	4,75	3,94	4,87
0,50	1,17	1,96	0,40	1,71	2,03	0,93	2,28	2,03	2,36
0,20	0,17	0,05	0,01	0,04	0,05	0,02	0,06	0,05	0,06

Obs: As unidades da tabela estão em metros (m) exceto para vazão* que está em litros por segundo ($L.s^{-1}$).

GRÁFICO 5 – VAZÃO (L.s⁻¹) X PERDA DE CARGA OBSERVADA E CALCULADA COM ATRITO OBTIDO POR DIFERENTES EQUAÇÕES PARA VINHAÇA COM TUBO DE 1/2" DE DIÂMETRO.

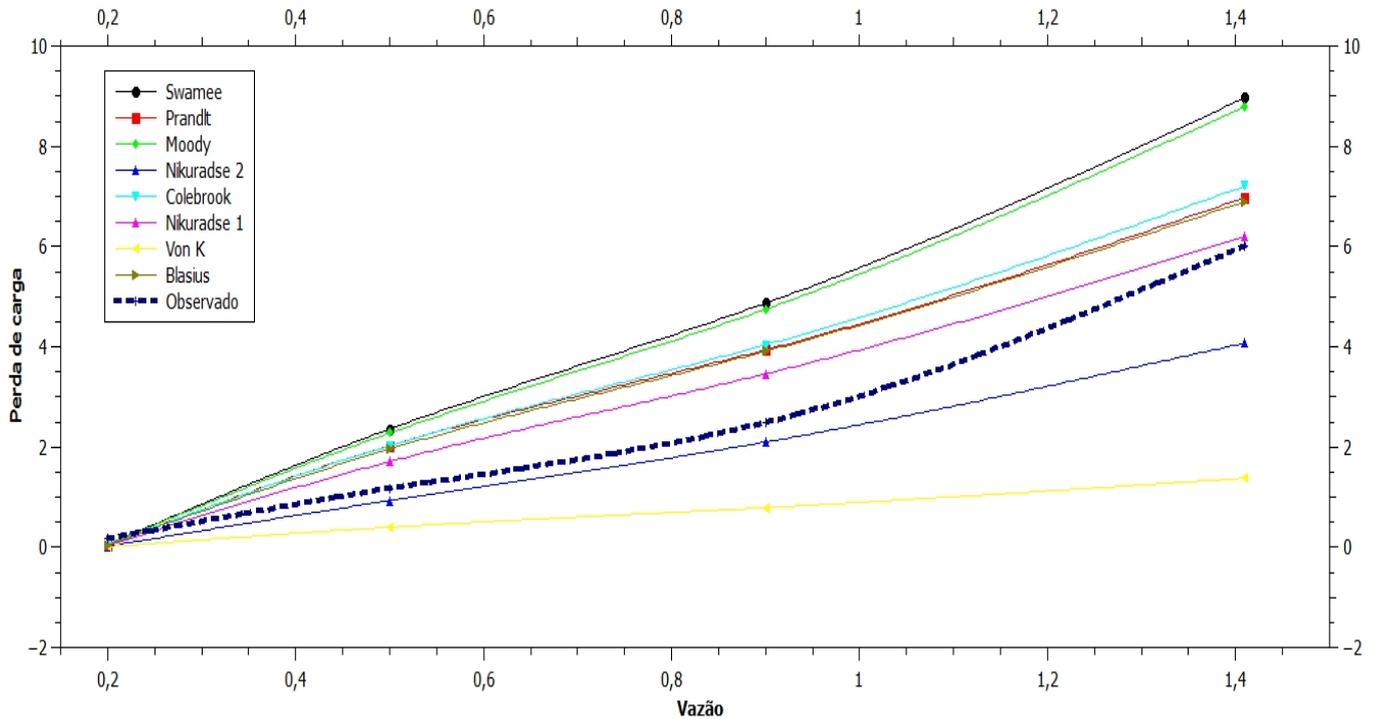


TABELA 10 - RESÍDUOS PARA VINHAÇA COM DIÂMETRO DE 1/2 POLEGADA

Vazão*	Observa do	Blasius	V. Prandlt	Nikurads e 1	Colebroo k	Nikurads e 2	Moody	P.Colebr ook	Swamee & Jain
1,41	6,019	-0,880	4,642	-0,178	-1,190	1,936	-2,779	-0,962	-2,954
0,90	2,492	-1,415	1,705	-0,964	-1,547	0,390	-2,254	-1,448	-2,379
0,50	1,172	-0,792	0,769	-0,533	-0,854	0,237	-1,106	-0,858	-1,189
0,20	0,170	0,121	0,159	0,129	0,117	0,152	0,115	0,117	0,110
Soma dos Resíduos		3,208	7,275	1,804	3,707	2,715	6,254	3,385	6,633

Obs: As unidades da tabela estão em metros (m) exceto para vazão* que está em litros por segundo (L.s⁻¹).

Quando ocorre a adição de polímero em tubos de 1/2 polegada, o comportamento é semelhante à situação do gráfico 5 com a diferença que no gráfico

6 observa-se que a equação de Nikuradse 2 descreve muito bem o comportamento da perda de carga observada no experimento.

Pelo gráfico não é possível afirmar qual a melhor equação que descreve o experimento em todas as situações da vinhaça ou a vinhaça com poliamida nos diâmetros de 1" ½" e ¾" mas é possível visualizar numericamente na tabela 12 as melhores equações que podem ser usadas para descrever a perda de carga na tubulação desse fluido.

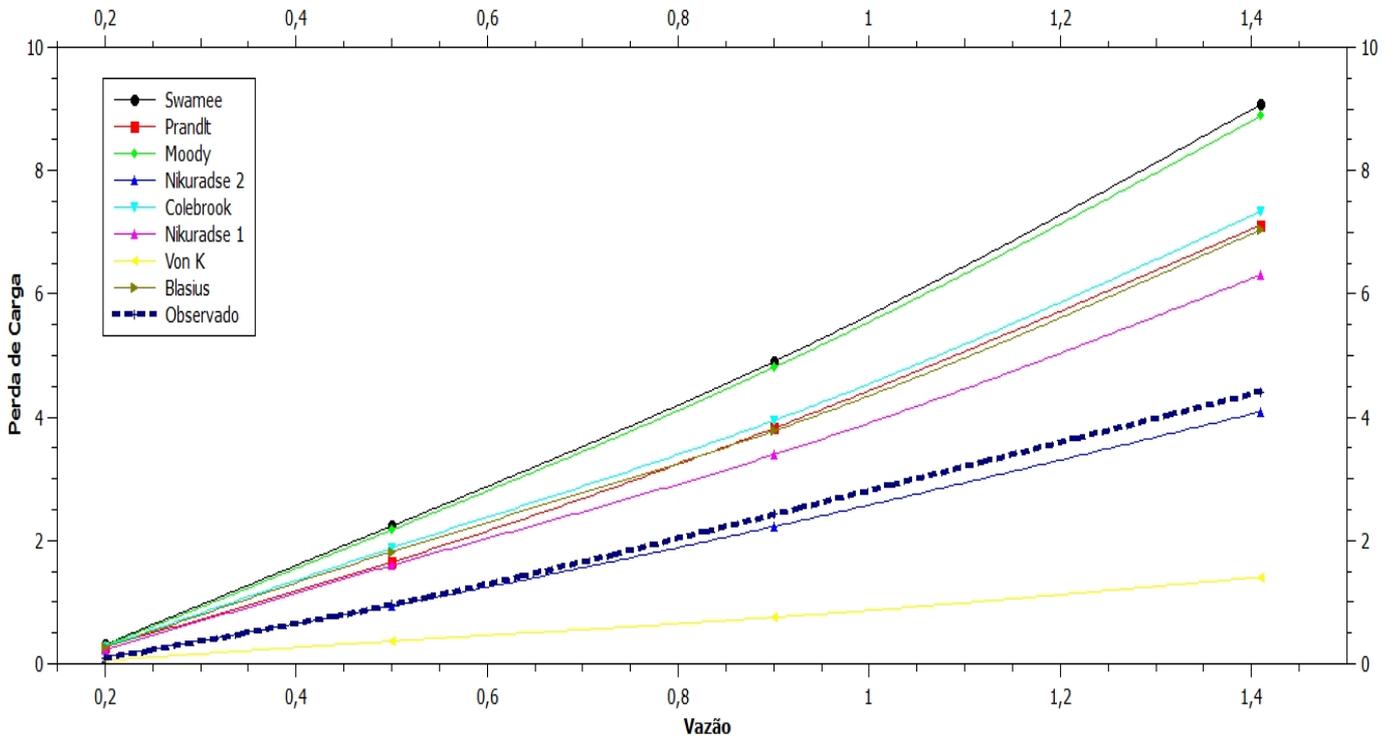
Na última condição apresentada, a equação de Blasius ficou fora da faixa indicada de Reynolds superestimando o resultado conforme descrito em literatura (VON BERNUTH, 1990). Pode-se notar na tabela 11 que sua soma de resíduo resultou em valores maiores nessa situação, dentro da faixa recomendada a equação descreve bem o observado e se destaca por ser uma equação simples.

TABELA 11 - VAZÃO, DADOS DE PERDA DE CARGA OBSERVADOS E CALCULADOS COM ATRITO OBTIDO PELAS DIFERENTES EQUAÇÕES ESCOANDO VINHAÇA+POLÍMERO COM TUBO DE ½" DE DIÂMETRO.

Vazão*	Observado	Blasius	V. Prandtl	Nikuradse 1	Colebrook	Nikuradse 2	Moody	P.Colebrook	Swamee & Jain
1,41	4,41	7,05	1,41	6,31	7,34	4,09	8,89	7,12	9,08
0,90	2,42	3,78	0,75	3,39	3,95	2,23	4,81	3,82	4,91
0,50	0,95	1,82	0,37	1,60	1,88	0,94	2,17	1,65	2,24
0,20	0,09	0,27	0,06	0,22	0,28	0,10	0,30	0,28	0,32

Obs: As unidades da tabela estão em metros (m) exceto para vazão* que está em litros por segundo (L.s⁻¹).

GRÁFICO 6- VAZÃO (L.s⁻¹) X PERDA DE CARGA OBSERVADA E CALCULADA COM ATRITO OBTIDO POR DIFERENTES EQUAÇÕES PARA VINHAÇA+POLÍMERO COM TUBO DE 1/2" DE



DIÂMETRO.

TABELA 12 - RESÍDUOS PARA VINHAÇA COM ADIÇÃO DE POLIACRILAMIDA COM DIÂMETRO DE 1/2 POLEGADA

Vazão	Observa do	Blasius	V. Prandtl	Nikurads e 1	Colebroo k	Nikurads e 2	Moody	P.Colebr ook	Swamee & Jain
1,41	4,413	-2,633	3,005	-1,896	-2,929	0,322	-4,478	-2,708	-4,666
0,90	2,422	-1,357	1,668	-0,970	-1,524	0,195	-2,386	-1,401	-2,483
0,50	0,954	-0,865	0,586	-0,645	-0,922	0,012	-1,220	-0,699	-1,283
0,20	0,088	-0,177	0,031	-0,135	-0,193	-0,014	-0,207	-0,190	-0,227
Soma dos resíduos		5,031	5,290	3,646	5,568	0,542	8,290	4,998	8,659

Obs: As unidades da tabela estão em metros (m) exceto para vazão* que está em litros por segundo (L.s⁻¹).

Nota-se que, exceto na tabela 1, que a maioria das equações tende a superestimar a perda de carga conforme o aumento de vazão, tal efeito também observado por Cavalcanti et al., 2009.

Em uma análise mais isolada, para 1", a equação de Blasius, Colebrook e Swamee & Jain melhor se ajusta ao observado. Para $\frac{3}{4}$ " a primeira equação de Nikuradse, equação de regime turbulento-liso, melhor se ajustou. Já para $\frac{1}{2}$ " as equações de Nikuradse se ajustaram melhor ao observado, as outras equações não apresentaram bons ajustes.

Considerando os diâmetros de 1", $\frac{3}{4}$ " e $\frac{1}{2}$ ", para resíduos de vinhaça com e sem poliacrilamida, os resultados da perda de carga obtido pela equação de Blasius variou em média 42,5% em relação ao observado, a equação de Von Karmán Prandtl teve uma variação média de 75,3% em relação ao observado, Nikuradse para tubos lisos 31,8 % em relação ao observado, Colebrook 45,8% em relação ao observado, Nikuradse para tubos rugosos variou em média 41,0% em relação ao observado, Moody 62,0% em relação ao observado, Prandtl Colebrook 42,2% em relação ao observado e Swamee & Jain variou em média 63,1 % nos valores da perda de carga em relação ao observado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A equação de Nikuradse de regime turbulento para tubos lisos, além de apresentar a menor variação média da perda de carga em relação ao observado, apresentou 0,899; 0,108; 0,422; 0,909; 1,804; 3,646 de soma de resíduos, e comparativamente com os resíduos das demais equações de estudo, foi a que obteve a menor soma total de resíduos com valor de 7,788 sendo, portanto, para as condições indicadas do experimento e considerando as restrições citadas na bibliografia da área, a equação apresenta melhor aproximação em relação ao observado experimentalmente.

Para o fluido de vinhaça com poliacrilamida a equação que obteve melhor ajuste, ou seja, somando todos os resíduos, foi a equação de Nikuradse com regime turbulento para tubos rugosos com valor de resíduo total de 1,625 sendo indicada para essa condição. Por último a equação de Blasius, com valor de 10,388 nas somas de

todos os resíduos, também é indicada quando se pretende utilizar uma equação simplificada por ter a melhor soma de resíduos entre as equações explícitas.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se a utilização de mais pontos amostrais, incrementando as linhas no gráfico e a comparação do observado com as equações. Sugere-se também a utilização de outros fluidos diferente da vinhaça e vinhaça com poliacrilamida, bem como outros produtos aplicados via fertirrigação de forma geral, como ureia, boro, entre outros.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, Richard G. RELATING THE HAZEN-WILLIAMS AND DARCY-WEISBACH FRICTION Loss EQUATIONS FOR PRESSURIZED IRRIGATION. **Applied Engineering in Agriculture**, [S. l.], ano 6, v. 12, p. 685-693, 1 abr. 1996.
- ANA. **Uso da Água na Agricultura Irrigada**: Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada. 1. ed. Brasília: ANA, 2017. 86 p.
- ANDRADE, Leandro et al. Análise da equação de Swamee-Jain para cálculo do fator de atrito de Swamee-Jain para cálculo do fator de atrit. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 3, p. 554-557, 21 dez. 2000
- AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNANDEZ, M. F.; ARAÚJO, R.; ITO, A. E. **Manual de Hidráulica**. 8.ed. São Paulo: Ed. Blücher, 1998. 670p.
- BARBOSA, JOSÉ WILIAN. **Sistema de Irrigação Automatizado utilizando a plataforma Arduino. Orientador: Osmar Aparecido Machado**. 2013. 57 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Ciência da Computação.) - Fundação Educacional do Município de Assis, Assis, 2013.
- BERNUTH, R.D. von. **Simple and accurate friction loss equation for plastic pipe**. J. Irrig. Drain. E. - ASCE, New York, v. 116, n. 2, p. 294-298, 1990.
- CARDOSO, Gabriel Greco Guimarães; FRIZZONE, José Antônio; REZENDE, Roberto. **Fator de atrito em tubos de polietileno de pequenos diâmetros**. Maringá, v. 30, n. 3, p. 299-305, 2008.
- CAVALCANTE, Kellison Lima. A Política Nacional de Irrigação (Lei nº 12.787/2013) e o desenvolvimento sustentável na agricultura brasileira. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, Curitiba, ano 2020, v. 3, n. 2, p. 460-469, 30 mar. 2020.
- CETIN, Tulin; YURDUSEV, Mehmet Ali. The Comparison of Velocity Formulas Used in Stormwater and Sewage Design. **CBU Journal of Science**, [S. l.], v. 12, p. 17-25, 10 abr. 2016.
- CHENG, Nian-Sheng. Formulas for Friction Factor in Transitional Regimes. **Journal of Hydraulic Engineering**, [S. l.], v. 134, n. 9, p. 1357-1362, 2008.
- FRIZZONE, José Antônio *et al.* **Irrigação por aspersão: sistema pivô central**. Maringá: Eduem, 2018. 355 p. ISBN 9788576287377.
- FRIZZONE, José Antônio *et al.* **Microirrigação: gotejamento e microaspersão**. Maringá: Eduem, 2012. 356 p.
- JACOBI, Pedro; GRANDISOLI, Edson. **Água e Sustentabilidade desafios, perspectivas e soluções**. 1. ed. São Paulo: IEE-USP e Reconecta, 2017. 110 p. ISBN 9788586923449.

JUSTI, André Luiz. **Efeito do uso de polímero redutor de atrito no escoamento forçado de água e de vinhaça**. Orientador: João Luis Zocoler. 2012. 77 f. Tese (Doutorado em Agronomia (Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP, Botucatu, 2012.

LIMA, Aureo C. de *et al.* Avaliação e análise da eficiência energética na irrigação em sistemas pivô central. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, ano 4, v. 13, p. 499–505, 12 nov. 2007.

MARQUELLI, Waldir Aparecido *et al.* **Irrigação por aspersão em hortaliças: qualidade da água, aspectos do sistema e método prático de manejo**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica: Embrapa Hortaliças, 2008. 150 p.

MOODY, L.F. **An approximate formula for pipe friction factors**, Transactions of the ASME, v. 69, p. 1005-1006, 1947

MOODY, L.F. **Friction factors for pipe flow**, Transactions of the ASME, v. 66, n. 8, p. 671-684, 1944

MUZZO, Luiz Eduardo. **Análise comparativa de correlações para o fator de atrito em condutas**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, [S. l.], 2019.

NELSON, C. C. NGUYEN, D. T. Analysis of Eccentric Annular Incompressible Seals: Part 1—A New Solution Using Fast Fourier Transforms for Determining Hydrodynamic Force. **Journal of Tribology**, [S. l.], v. 110, p. 354-359, 1 abr. 1988.

OMETTO, Aldo Roberto. XIV SBRH - Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Aracaju. **A sustentabilidade do setor sucroalcooleiro: um objetivo a ser alcançado** [...]. Piracicaba: [s. n.], 2001.

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

PRADA, Sílvio Miranda *et al.* Metodologia analítica para a determinação de sulfato em vinhoto. **Química Nova Órgão de divulgação da Sociedade Brasileira de Química**, São Paulo, ano 1998, v. 21, 10 out. 1997. 249-252, p. 247-379.

RODRIGUES, Lineu Neiva; DOMINGUES, Antônio Félix. **Agricultura Irrigada desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável**. 1. ed. Brasília: INOVAGRI, 2017. 327 p. ISBN 9788567668109.

ROMEO, Eva; ROYO, Carlos; MONZÓN, Antônio. Improved explicit equations for estimation of the friction factor in rough and smooth pipes. **Chemical Engineering Journal**, Zaragoza, v. 86, p. 369–374, 2002.

ROSEGRANT, Mark W.; CAI, Ximing. Global Water Demand and Supply Projections. **International Water Resources Association Water International**, Washington, v. 27, n. 2, 2021. 159–169, p. 1-7.

SALASSIER, Bernardo; MANTOVANI, Everardo; SILVA, Demetrius; SOARES, Antônio. **Manual de Irrigação**. 9. ed. atual. e aum. Viçosa: UFV, 2019. 545 p. ISBN 9788572696104.

SELBORNE, Lord. **A ética do uso da água doce: um levantamento**. Brasília: UNESCO, 2001. 80 p. ISBN 8587853368.

SIMÕES, André Luiz Andrade *et al.* **Métodos computacionais em hidráulica**. Salvador: Edufba, 2017. 236 p. ISBN 9788523216023

SONNAD, Jagadeesh R.; GOUDAR, Chetan T. Turbulent Flow Friction Factor Calculation Using a Mathematically Exact Alternative to the Colebrook–White Equation. **Journal of Hydraulic Engineering**, [S. l.], ano 8, v. 132, p. 863-867, 2006.