



<http://ensaios.usf.edu.br> - ISSN 2595-1300

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

ESTUDO E VERIFICAÇÃO DO FATOR DE ATRITO EM TUBULAÇÕES E PERDA DE CARGA EM SINGULARIDADES.

Study and Verification of the Friction Factor in Pipes and Head Loss in Singularities.

DASCANIO, Antonio¹; FARIA, Caio²; MORITA, Eugenio³;

¹Graduando do Curso de Engenharia Mecânica - Universidade São Francisco; ²Graduando do Curso de Engenharia Mecânica - Universidade São Francisco; ³Professor do Curso de Engenharia Mecânica - Universidade São Francisco

antonio.dascanio@mail.usf.edu.br

caio.faria@mail.usf.edu.br

eugenio.morita@usf.edu.br

RESUMO. Este estudo tem como objetivo principal compreender o impacto do coeficiente de atrito no processo de escoamento de fluidos em tubulações industriais, bem como analisar as perdas de carga em pontos singulares ao longo dessas tubulações. Foram realizados testes práticos em bancadas didáticas, que utilizam tubulações fabricadas em PVC (Policloreto de Vinila) com diferentes diâmetros e rugosidades. Durante a pesquisa experimental, os procedimentos foram repetidos várias vezes para obter resultados conclusivos. Inicialmente, 90 testes foram realizados na bancada da USF – Campinas Swift, buscando 30 resultados confiáveis através de três medições para cada vazão. No entanto, os resultados diferiram dos valores teóricos, levando a consultas com a fabricante da bancada (Labtrix) e à repetição de 90 testes na mesma bancada. Apesar de melhorias, as divergências persistiram. Diante disso, foi decidido realizar novos testes na bancada da USF - Itatiba, repetindo o processo com mais 90 testes para obter 30 resultados. Essa etapa resultou em valores coerentes com as expectativas, permitindo uma análise mais robusta e confiável. A partir dos dados coletados, foram realizados cálculos das perdas de carga e dos fatores de atrito, utilizando o *software Engineering Equation Solver*. O percentual de erro relativo foi calculado para avaliar a precisão dos resultados. O estudo concluiu que o atrito influencia no escoamento de um fluido líquido, mesmo em pequena escala, causando diferenças de pressão ao longo da tubulação. Isso pode resultar em prejuízos relevantes em tubulações extensas ou com muitas singularidades.

Palavras-chave: Tubulação; perda de carga; fator de atrito; resultados

ABSTRACT. This study aims to understand the impact of the friction coefficient on the fluid flow process in industrial pipelines and analyze the Head Loss at singular points along these pipelines. Practical tests were conducted on didactic benches using PVC (Polyvinyl Chloride) pipes with different diameters and roughness. During the experimental research, procedures were repeated multiple times to obtain conclusive results. Initially, 90 tests were conducted on the USF – Campinas Swift bench, aiming to obtain 30 reliable results through three measurements for each flow rate. However, the results differed from theoretical values, leading to consultations with the bench manufacturer (Labtrix) and the repetition of 90 tests on the same bench. Although some results were achieved, discrepancies persisted. Consequently, it was decided to conduct new tests on the USF - Itatiba bench, repeating the process with an additional 90 tests to obtain 30 results. This step resulted consistent values according with expectations, allowing more robust and reliable analysis. Using the collected data, calculations of pressure losses and friction factors were performed using the Engineering Equation Solver software. The



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

relative error percentage was calculated to assess result accuracy. The study concluded that friction influences the flow of a liquid fluid, even on a small scale, causing pressure differences along the pipeline. This can result in significant losses in extensive pipelines or those with numerous singularities.

Keywords: Pipes; Head Loss; Friction Factor; Results.

INTRODUÇÃO

Ao longo de toda história da civilização, sempre houve uma necessidade de desenvolver sistemas de transporte de líquidos em longas distâncias, e tem sido uma preocupação constante. Os romanos, por exemplo, utilizavam aquedutos muito bem estruturados para levar água até suas cidades, permitindo que ela fluísse de um ponto a outro por meio de dutos. Esse método de transporte desempenha um papel crucial no deslocamento de uma variedade de fluidos, seja entre reservatórios de armazenamento e unidades de processamento em instalações industriais, como fábricas de alimentos e indústrias de bebidas, ou ao longo de grandes distâncias, em sistemas como minerodutos, oleodutos e gasodutos.

Um sistema de tubulação é composto por vários elementos, incluindo trechos retos, curvas, válvulas e outros componentes que introduzem resistência ao fluxo do líquido. Em termos gerais, as perdas de carga são classificadas em dois tipos: perda de carga distribuída, que ocorre ao longo dos trechos retos dos dutos longos, e perda de carga localizada, que acontece nas regiões onde ocorrem mudanças de direção e variações de seção, como válvulas, curvas e reduções, ou qualquer componente que cause interrupções no sistema.

Com o aumento da urbanização e a crescente demanda por água potável, a construção de sistemas de abastecimento de água tornou-se uma necessidade iminente. Esses sistemas envolvem várias etapas, desde a captação e tratamento da água até a sua distribuição e ligações prediais. No entanto, o processo de concepção desses sistemas costuma ser caro e complexo, com um dos fatores mais significativos sendo a análise das perdas de carga, que afeta diretamente a escolha dos materiais e o dimensionamento das tubulações do sistema.

No contexto da ampliação de uma estação de tratamento de água, torna-se obrigatório dimensionar novas bombas para atender o aumento na produção e ajustar-se às perdas de carga associadas às novas vazões de transferência. Nesse cenário, a utilização de uma bancada de testes desempenha um papel crucial, para efetuar simulações, garantindo maior estabilidade no desenvolvimento do projeto e otimização do tempo de operação, além de reduzir potenciais falhas e custos, especialmente em instalações de grande porte.

Portanto, o objetivo deste estudo é validar e comparar os cálculos de perda de carga em tubulações. Para atingir esse propósito, serão realizados ensaios em uma bancada de testes e cálculos através do software EES (*Engineering Equation Solver*) que simularam cinco diferentes tipos de vazões volumétricas para cada tubulação reta e diferentes singularidades, levando em consideração o fator de atrito e as perdas de carga associadas a acessórios comercialmente disponíveis.

METODOLOGIA

Neste trabalho os testes para determinação do fator de atrito e da perda de carga foram executados utilizando bancadas didáticas de mecânica dos fluidos, disponíveis nos laboratórios

da Universidade São Francisco (USF) campus de Campinas e Itatiba-SP, modelos XL07 e XL26, respectivamente, fabricadas pela empresa Labtrix Bancadas Didáticas e Industriais.

Para cada velocidade da água foram executados 3 testes e referenciado o valor da média entre eles. Nestes testes o valor da velocidade da água foi mantido e o valor da vazão volumétrica sofreu alteração devido ao intervalo de tempo aplicado em cada captação de dados. Esse procedimento foi repetido cinco vezes para cada condição do experimento, totalizando uma quantidade de 90 testes com 30 resultados registrados.

Figura 1 – Bancada XL26, USF Itatiba, São Paulo



Fonte: Próprio autor.

Figura 2 – Bancada XL07, USF Campinas, São Paulo



Fonte: Próprio autor.

As tubulações das bancadas são fabricadas com tubos de PVC (Policloreto de Vinila) padrão comercial. Esse tipo de tubo é durável e adequado para aplicações hidráulicas, onde é necessária a condução de fluidos. Comumente utilizado em sistemas de abastecimento de água, irrigação, drenagem e outras aplicações hidráulicas.

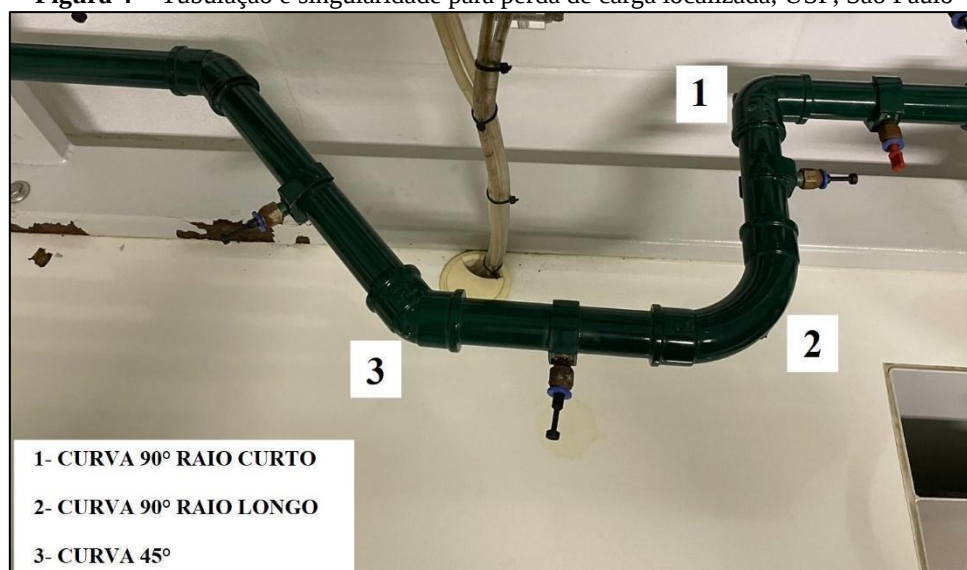
Para os testes de perda de carga distribuída, as bancadas oferecem duas variações de diâmetros (1/2" e 3/4") com dois tipos de rugosidade interna (liso e rugoso). Nos testes de perda de carga localizada, as bancadas proporcionam três tipos de singularidades (curva de 45°, curva de 90° raio longo e curva de 90° raio curto) com diâmetro de 3/4" e com rugosidade interna lisa. As Figuras 3 e 4 apresentam as variações disponíveis para serem utilizadas nos experimentos.

Figura 3 – Tubulação para perda de carga distribuída, USF, São Paulo



Fonte: Próprio autor.

Figura 4 – Tubulação e singularidade para perda de carga localizada, USF, São Paulo



Fonte: Próprio autor.

Para aferir a perda de carga distribuída na seção da tubulação, foram conectadas mangueiras entre as tomadas de pressão da tubulação e as entradas de baixa e alta pressão do medidor de pressão diferencial, o qual possui uma resolução de 0,1 m.c.a (conforme representado na Figura 5 e 6).

Figura 5 – Medidor de pressão diferencial MDD30V2, USF Campinas, São Paulo



Fonte: Próprio autor.

Figura 6 – Medidor de pressão diferencial MDD30V3, USF Itatiba, São Paulo



Fonte: Próprio autor.

Para os testes de perda de carga localizada, as mangueiras foram conectadas nas tomadas de pressão de cada singularidade e as entradas de baixa e alta pressão do piezômetro de coluna de 1500 mm, composto por três tubos e com resolução de 0,01 m.c.a (conforme ilustrado na Figura 7).

Figura 7 – Piezômetro de três linhas XL10.1, USF Itatiba, São Paulo



Fonte: Próprio autor.

Os dados coletados foram registrados de acordo com a tabela 1 e posteriormente utilizados nas equações pertinentes ao experimento.

Tabela 1 – Parâmetros para ensaio de perda de carga.

Teste N°	Altura da água no reservatório [mm]	Tempo da coleta [s]	P _{Sucção} [mmca]	P _{Recalque} [mmca]	h _f =P _{Sucção} -P _{Recalque} [mmca]
X					

Fonte: Próprio autor.

A seguir são apresentados os principais equacionamentos aplicados no desenvolvimento dos cálculos para perda de carga e fator de atrito.

Vazão

Foi adotado a técnica volumétrica como padrão de medida, a qual envolve a cronometragem do tempo de enchimento de um reservatório graduado. A vazão é então calculada de acordo com a aplicação da equação (1).



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

$$Q = \frac{V_{coletado}}{t} \quad (1)$$

Dados:

Q = Vazão volumétrica [m^3/s]

$V_{coletado}$ = Volume coletado [m^3]

t = Tempo de enchimento [s]

Número de Reynolds

Refere-se a um número adimensional que resulta da relação entre as forças de inércia e as forças viscosas, descrevendo o comportamento do escoamento de um fluido. No contexto de fluxo em um duto específico, esse parâmetro é determinado usando a equação (2).

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

Dados:

Re = Número de Reynolds.

ρ = Densidade da água na temperatura de 22°C [$997,8 \text{ kg/m}^3$].

Vel = Velocidade do fluido [m/s].

D = Diâmetro interno da tubulação [m].

μ = Viscosidade dinâmica da água na temperatura de 22°C [$0,0009549 \text{ Pa.s}$].

Rugosidade Relativa

É definida como a relação entre a rugosidade absoluta e o diâmetro do tubo. A rugosidade absoluta refere-se às imperfeições encontradas no material do tubo, as quais impactam o perfil de velocidade do fluido.

$$\varepsilon = \frac{e}{D} \quad (3)$$

Dados:

ε = Rugosidade relativa [-].

e = Rugosidade absoluta [$0,000015 \text{ m}$].

D = Diâmetro da tubulação [m].

Conforme destacado por Vasconcelos, Costa e Araújo (2015) e Martins e Oliveira (2016), a rugosidade absoluta refere-se às imperfeições nas superfícies internas das tubulações, as quais podem apresentar diferentes perfis, tais como liso, áspero e rugoso. Esse parâmetro é determinado como uma média global a partir de uma amostra das irregularidades presentes no material do tubo, exercendo influência sobre o perfil de velocidade do fluido.

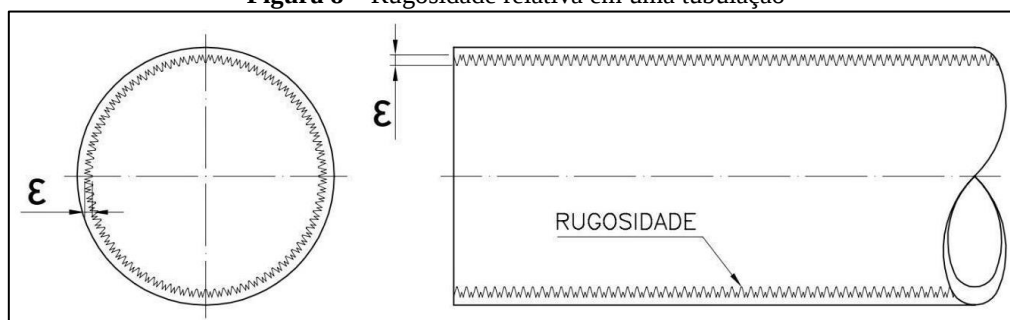
"A rugosidade absoluta é uma medida da altura das irregularidades da superfície, e é obtida pela diferença entre o valor máximo e o valor mínimo da superfície." (Vasconcelos, Costa e Araújo, 2015, p.15)



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

"A rugosidade absoluta é uma medida importante da qualidade da superfície, pois pode influenciar o desempenho de um componente."
(Martins e Oliveira, 2016, p.25)

Figura 8 – Rugosidade relativa em uma tubulação

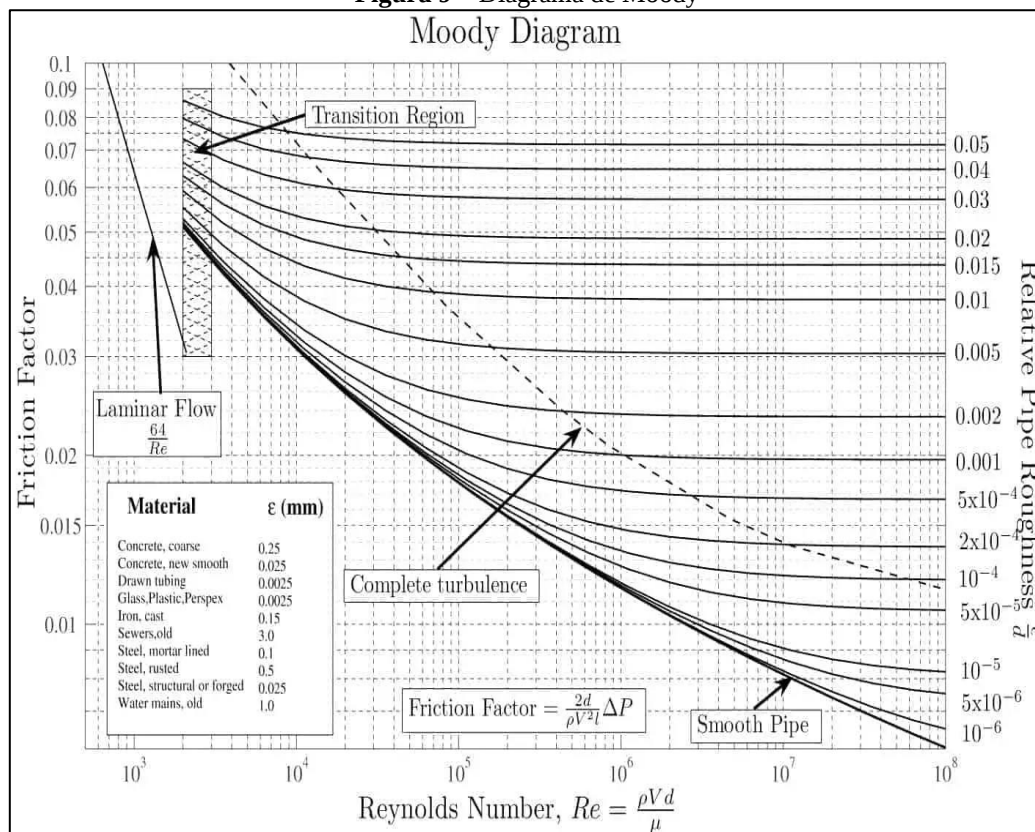


Fonte: Próprio autor.

Fator de atrito

O coeficiente de atrito diz respeito às interações entre as superfícies que influenciam o fluxo. Sua determinação está associada ao número de Reynolds e à rugosidade relativa, podendo ser calculada através de equações práticas ou com a ajuda do Diagrama de Moody, ilustrado na Figura (9).

Figura 9 – Diagrama de Moody



Fonte: Thermal-Engineering



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Perda de carga distribuída

Ocorre ao longo do comprimento da tubulação, devido ao atrito entre o fluido e as paredes do tubo. Para calcular a perda de carga devido ao atrito em um fluxo uniforme e contínuo, recorreremos a fórmulas práticas, sendo a de Darcy-Weisbach uma das mais notáveis. Essa fórmula universal ganhou destaque devido à sua ampla aceitação prática na determinação dessas perdas de carga.

Equação de Darcy-Weisbach é uma ferramenta fundamental na análise de perda de carga por atrito em sistemas fluidos. Ela é expressa utilizando a equação (4).

$$\Delta p = f * \frac{L}{D} * \frac{Vel^2}{2 * g} \quad (4)$$

Dados:

ΔP = Perda de carga [m.c.a]

f = Coeficiente de atrito [-]

L = Comprimento do trecho considerado (entre as tomadas) [m]

D = Diâmetro do tubo [m];

Vel = Velocidade média [m/s].

g = Aceleração da gravidade [9,81 m/s²].

Perda de carga localizada

Ocorre em pontos específicos da tubulação, devido à presença das chamadas singularidades, que são os acessórios como curvas, válvulas, instrumentos ou mudanças súbitas de área. Segundo Costa (2015), o fluxo em um tubo pode requerer o deslocamento do fluido por meio de diversos acessórios, curvas ou alterações repentinas de área, resultando na geração de perdas de carga ao longo do curso do fluido.

"O escoamento em uma tubulação pode exigir a passagem do fluido através de uma variedade de acessórios, curvas ou mudanças súbitas de área, as quais promovem a perda de carga ao longo do escoamento."

(Vasconcelos, Costa e Araújo, 2015, p.20)

Por isso, a Equação (5) apresenta uma calcular a perda de carga para um determinado acessório.

$$\Delta p = Ks * \frac{Vel^2}{2 * g} \quad (5)$$

Dados:

ΔP = Perda de carga [m.c.a]

Ks = Coeficiente de atrito [-]

Vel = Velocidade média [m/s].

g = Aceleração da gravidade [9,81 m/s²].



Percentual de erro relativo

O erro percentual, de maneira formal, representa a magnitude da diferença entre um valor e uma aproximação, dividida pela magnitude desse valor. Esse método possibilita a avaliação da proximidade entre os valores aproximado e exato, expressa como uma porcentagem na equação (6).

"O percentual de erro relativo é um parâmetro extremamente útil para avaliar a precisão comparativa de modelos."
(Canedo, 2009, p.123)

$$ER = \left[\frac{(\text{Valor calculado} - \text{Valor experimental})}{\text{Valor calculado}} \right] * 100 \quad (6)$$

Aplicativos para realização dos cálculos

Após a coleta de dados para análises, empregamos o programa EES (*Engineering Equation Solver*) para conduzir os cálculos de perda de carga e fator de atrito, utilizando as propriedades termodinâmicas calculadas pelo software. Isso possibilitou uma comparação e validação dos testes realizados. O *Software* EES, desenvolvido por Sanford A. Klein e Frank L. Alvarado, é uma ferramenta que incorpora rotinas de cálculos para uma ampla variedade de propriedades de fluidos, incluindo as específicas da água. Além disso, para a elaboração de gráficos e tabelas, recorremos ao uso do Excel, complementando a abordagem analítica do EES.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No decorrer da pesquisa experimental, os procedimentos foram repetidos diversas vezes visando alcançar um resultado conclusivo. Inicialmente, foram realizados 90 testes na bancada da USF – Campinas Swift, com o intuito de obter 30 resultados (realizando três medições para cada vazão a fim de calcular a média). Contudo, os resultados obtidos divergiam dos valores teóricos.

Frente às diferenças dos testes, a empresa Labtrix, fabricante das bancadas foi consultada e sugeriu que fossem realizados novos testes, optando por realizar novamente 90 testes na bancada da USF - Campinas Swift, buscando obter 30 resultados confiáveis. Foram observadas melhorias, mas persistiram os desafios em alcançar valores satisfatórios ou próximos das expectativas teóricas.

Diante disso, foi decidido que seriam realizados os testes na bancada da USF - Itatiba, repetindo o processo, realizando novamente 90 testes para extrair 30 resultados. Esta etapa resultou em valores mais coerentes com as expectativas, permitindo uma análise mais robusta e confiável.

Os dados obtidos foram posteriormente empregados no *software* EES para comparação com os valores teóricos. Nas próximas seções, serão apresentadas tabelas e gráficos detalhando os resultados de cada experimento, evidenciando a persistência na busca por resultados precisos e a evolução do processo experimental.



Perda de carga distribuída e fator de atrito

A equação geral de Darcy-Weisbach, equação (4), foi utilizada para obtenção de valores teóricos, os quais foram comparados com os experimentais coletados no laboratório (Tabela 2, 3 e 4). A análise estática dos resultados obtidos para perda de carga, aplicando novamente a equação de Darcy-Weisbach, permitiu realizar os cálculos para obtenção dos valores do fator de atrito e perda de carga, posteriormente o percentual de erro relativo experimental foi calculado utilizando a equação (6).

Tabela 2 – Fator de atrito, perda de carga e erro relativo da tubulação Ø 1/2” liso.

Fator de atrito, Perda de carga e Erro relativo - Distribuídas									
Tubulação Ø 1/2” Liso									
Testes	Altura [m]	TEMPO [s]	RE [-]	ΔP Experimental [mca]	ΔP Calculado [mca]	Erro relativo Δp [%]	F Experimental [-]	F Calculado [-]	Erro relativo F [%]
1	96	7,09	65181	1,2	1,221	1,75%	0,02261	0,02301	1,77%
2	104	7,06	70913	1,4	1,431	2,21%	0,02228	0,02277	2,20%
3	124	7,1	84074	1,9	1,971	3,74%	0,02151	0,02233	3,81%
4	148	7,3	97597	2,6	2,616	0,62%	0,02185	0,02198	0,59%
5	155	7,03	106139	3,1	3,068	1,03%	0,02202	0,0218	1,00%

Fonte: Próprio autor.

Tabela 3 – Fator de atrito, perda de carga e erro relativo da tubulação Ø 3/4” liso.

Fator de atrito, Perda de carga e Erro relativo - Distribuídas									
Tubulação Ø 3/4” Liso									
Testes	Altura [m]	TEMPO [s]	RE [-]	ΔP Experimental [mca]	ΔP Calculado [mca]	Erro relativo Δp [%]	F Experimental [-]	F Calculado [-]	Erro relativo F [%]
1	88	7	47851	0,3	0,314	4,67%	0,02221	0,02329	4,86%
2	110	7,11	58889	0,5	0,4865	2,70%	0,02334	0,02272	2,66%
3	126	7	68514	0,6	0,629	4,83%	0,02069	0,02151	3,96%
4	148	7,19	78350	0,8	0,8287	3,59%	0,0211	0,02186	3,60%
5	162	7,16	86121	1	0,9897	1,03%	0,01999	0,02087	4,40%

Fonte: Próprio autor.

Tabela 4 – Fator de atrito, perda de carga e erro relativo da tubulação Ø 3/4” rugoso.

Fator de atrito, Perda de carga e Erro relativo - Distribuídas									
Tubulação Ø 3/4” Rugoso									
Testes	Altura [m]	TEMPO [s]	RE [-]	ΔP Experimental [mca]	ΔP Calculado [mca]	Erro relativo Δp [%]	F Experimental [-]	F Calculado [-]	Erro relativo F [%]
1	94	7,27	48988	0,4	0,3811	4,73%	0,02737	0,02614	4,49%
2	112	7,27	58368	0,5	0,4792	4,16%	0,0241	0,02292	4,90%
3	131	7,34	67619	0,6	0,6203	3,38%	0,02154	0,02227	3,39%
4	150	7,38	77007	0,9	0,8808	2,13%	0,02492	0,02419	2,93%
5	164	7,21	86179	1	0,9767	2,33%	0,02211	0,02159	2,35%

Fonte: Próprio autor.

Segundo White (2010) foi definida uma margem de erro de 5% como parâmetro aceitável dos testes realizados, pois a margem de erro relativo aceitável depende da aplicação específica do cálculo.



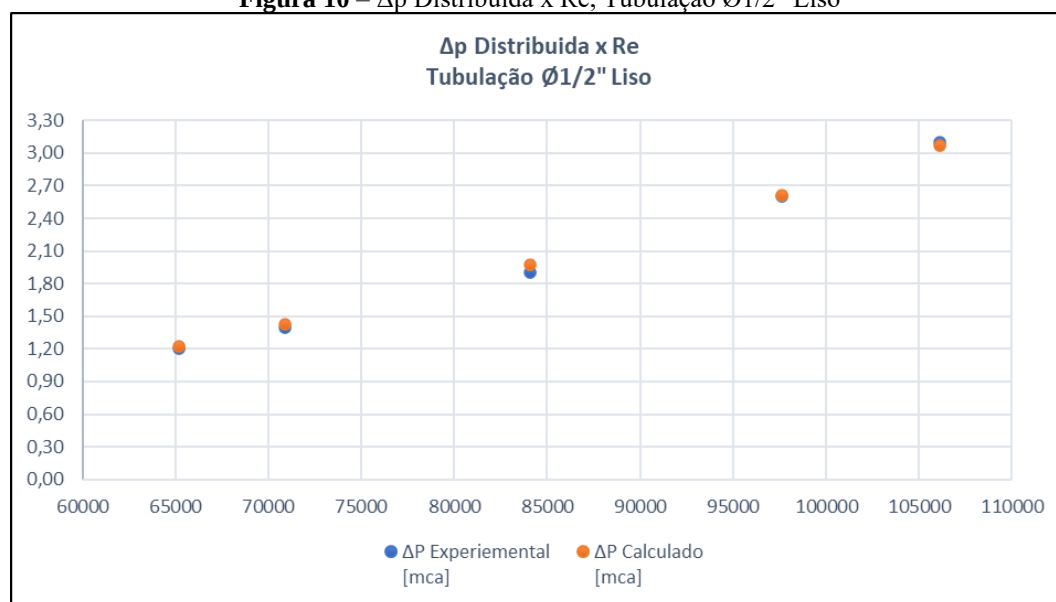
TRABALHO DE GRADUAÇÃO

"A margem de erro aceitável para o fator de atrito depende da aplicação específica. Para a maioria das aplicações, um erro relativo de até 5% é considerado aceitável. No entanto, para aplicações críticas, como o dimensionamento de sistemas hidráulicos, um erro relativo menor pode ser necessário."
(White, Frank, 2010, p.369)

Pode-se concluir que todos os cálculos para perda de carga distribuída e fator de atrito obtiveram um baixo percentual de erro relativo, considerado como aceitável para a estimativa do fator de atrito e perda de carga quando comparados os valores teóricos e práticos.

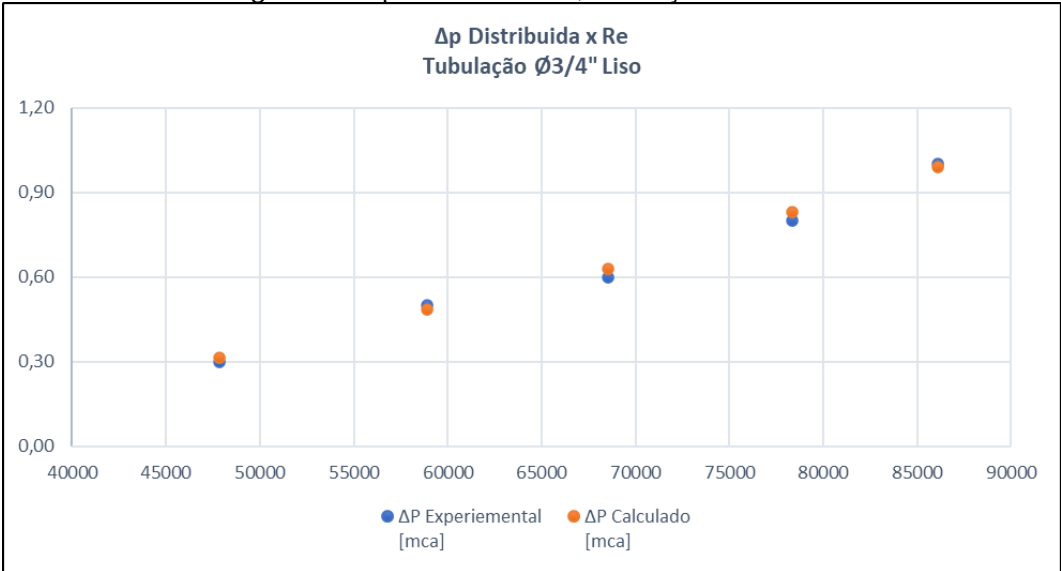
Através da curva experimental entre a perda de carga distribuída x número de Reynolds (Figuras 10, 11 e 12), verifica-se que a perda de carga calculada pelas correlações apresenta uma semelhança com os valores práticos. Todos os testes realizados e calculados apresentam um valor de Re acima de 4.104 [-], significando que todos os testes realizados foram com regime de escoamento turbulento. À medida que a velocidade do fluxo aumenta (Re), a perda de carga também aumenta.

Figura 10 – Δp Distribuída x Re , Tubulação Ø1/2" Liso



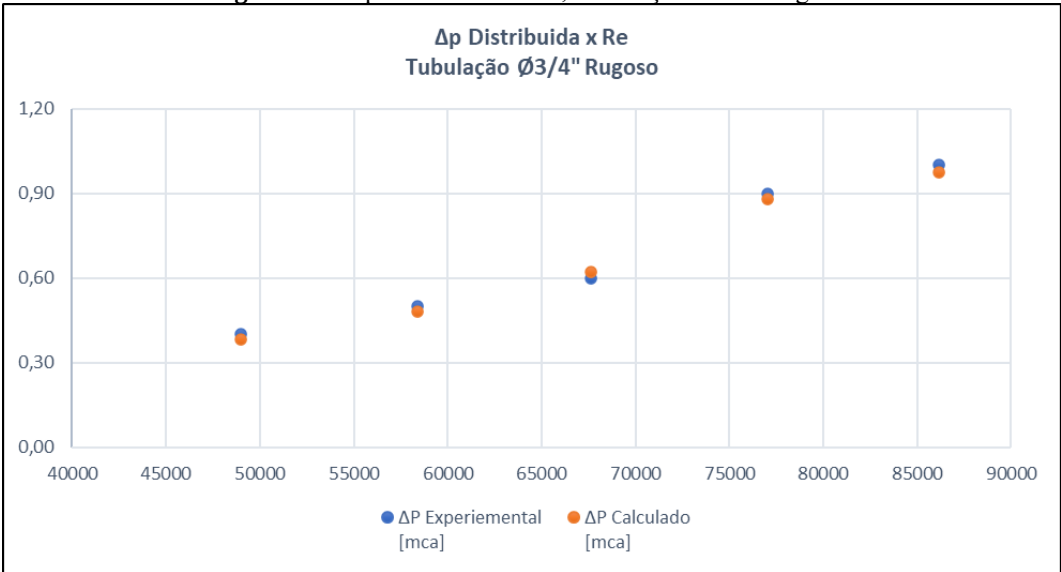
Fonte: Próprio autor.

Figura 11 – Δp Distribuída x Re, Tubulação Ø3/4" Liso.



Fonte: Próprio autor.

Figura 12 – Δp Distribuída x Re, Tubulação Ø3/4" Rugoso.



Fonte: Próprio autor.

Perda de carga localizada e fator de atrito:

A equação (5), que representa as singularidades, foi empregada para calcular os valores teóricos. Esses valores foram comparados com dados experimentais coletados no laboratório, conforme apresentado nas Tabelas 5, 6 e 7. A análise dos resultados relativos ao coeficiente de perda de carga localizada (KS) foi realizada através da equação de Darcy-Weisbach. Isso permitiu o cálculo dos valores do fator de atrito e da perda de carga. Em sequência, o percentual de erro relativo experimental foi calculado com base na equação (6).



Tabela 5 – Fator de atrito, perda de carga e erro relativo da curva 45°.

Fator de atrito, Perda de carga e Erro relativo - Localizada									
Curva 45°									
Testes	Altura [m]	TEMPO [s]	RE [-]	ΔP Experimental [mca]	ΔP Calculado [mca]	Erro relativo Δp [%]	KS Experimental [-]	KS Calculado [-]	Erro relativo KS [%]
1	90	7,22	47488	0,078	0,07957	2,01%	0,3431	0,35	2,01%
2	108	7,15	57594	0,119	0,1168	1,85%	0,3565	0,35	1,82%
3	127	6,99	69157	0,173	0,169	2,31%	0,3582	0,35	2,29%
4	145	7,14	77300	0,217	0,2112	2,67%	0,3596	0,35	2,67%
5	164	7,19	86821	0,275	0,2664	3,13%	0,3613	0,35	3,13%

Fonte: Próprio autor.

Tabela 6 – Fator de atrito, perda de carga e erro relativo da curva 90° raio longo.

Fator de atrito, Perda de carga e Erro relativo - Localizada									
Curva 90° raio longo									
Testes	Altura [m]	TEMPO [s]	RE [-]	ΔP Experimental [mca]	ΔP Calculado [mca]	Erro relativo Δp [%]	KS Experimental [-]	KS Calculado [-]	Erro relativo KS [%]
1	97	7,69	48012	0,11	0,1048	4,73%	0,4725	0,45	4,76%
2	105	6,88	58091	0,15	0,1533	2,20%	0,4402	0,45	2,23%
3	128	7,04	69206	0,22	0,2176	1,09%	0,4549	0,45	1,08%
4	146	7,2	77184	0,27	0,2707	0,26%	0,4488	0,45	0,27%
5	155	6,9	85505	0,34	0,3322	2,29%	0,4605	0,45	2,28%

Fonte: Próprio autor.

Tabela 7 – Fator de atrito, perda de carga e erro relativo da curva 90° raio curto.

Fator de atrito, Perda de carga e Erro relativo - Localizada									
Curva 90° raio curto									
Testes	Altura [m]	TEMPO [s]	RE [-]	ΔP Experimental [mca]	ΔP Calculado [mca]	Erro relativo Δp [%]	KS Experimental [-]	KS Calculado [-]	Erro relativo KS [%]
1	60	7,17	31852	0,128	0,1332	4,06%	1,249	1,3	4,08%
2	78	7,1	41816	0,222	0,2295	3,38%	1,257	1,3	3,42%
3	90	7,71	44432	0,261	0,2592	0,69%	1,309	1,3	0,69%
4	97	7,1	52002	0,362	0,355	1,93%	1,326	1,3	1,96%
5	105	7,25	55126	0,412	0,3989	3,18%	1,343	1,3	3,20%

Fonte: Próprio autor.

Os valores teóricos para o coeficiente KS foram extraídos de acordo com a tabela (8).

Tabela 8 – Tabela coeficiente KS teórico.

Tipo de união ou válvula	k_f
Joelho de 45°, padrão	0,35
Joelho de 45°, raio longo	0,20
Joelho de 90°, padrão	0,75
Raio longo	0,45
Canto Vivo	1,30

Fonte: Unicamp, Prof. Dr. Enrique Ortega.

Utilizado o mesmo conceito de White (2010) foi definido a margem de erro de 5% como parâmetro aceitável dos testes realizados.

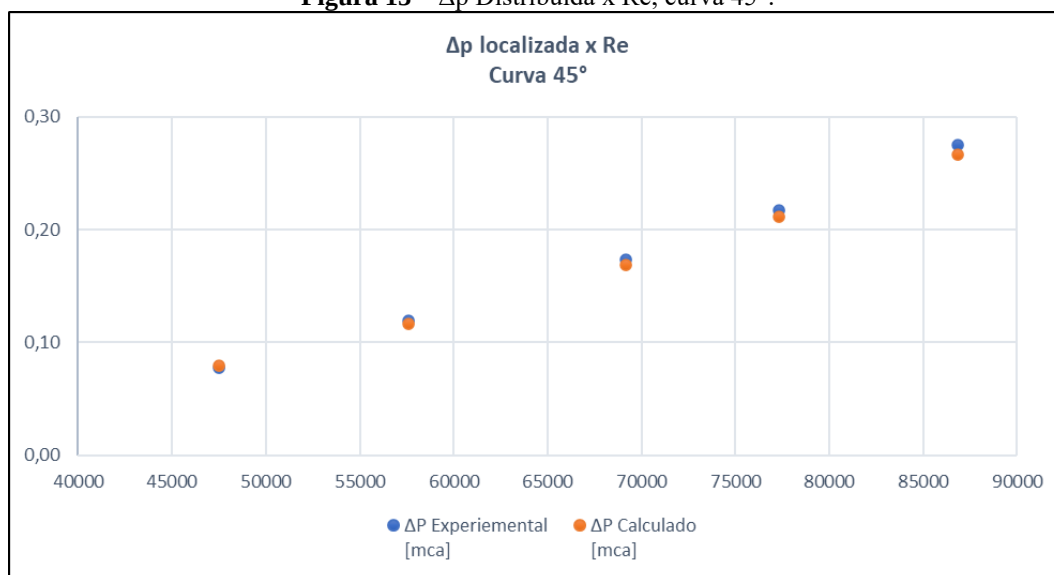


TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Pode-se concluir que todos os cálculos para perda de carga localizada e fator de atrito obtiveram um baixo percentual de erro relativo, considerado aceitável a estimativa do fator de atrito e perda de carga quando comparado os valores teóricos e práticos.

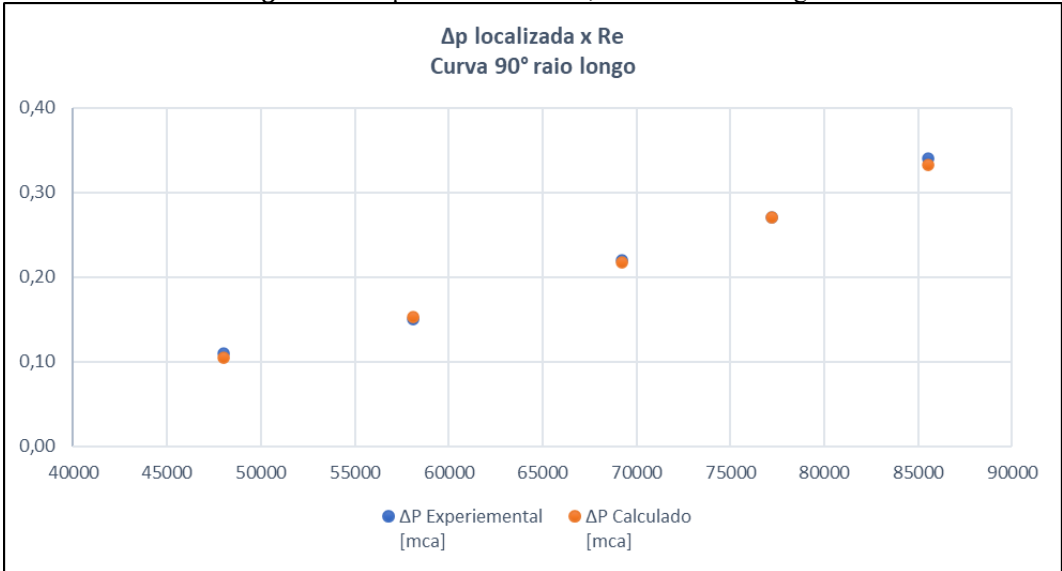
Através da curva experimental entre a perda de carga localizada x número de Reynolds (Figura 13, 14 e 15), verifica-se que a perda de carga calculada pelas correlações apresenta uma semelhança com os valores práticos. Todos os testes realizados e calculados apresentam um valor de Re acima de 4.104 [-], significando que todos os testes realizados foram com regime de escoamento turbulento, exceto o teste 1 da curva 90° raio curto, que resultou no número de Reynolds de 31852 [-], situado em uma região de transição entre fluxo laminar e turbulento. A explicação para o teste 1 estar nesta transição é que a velocidade do fluido é relativamente baixa, e curvas mais fechadas favorecem um fluxo mais organizado, resultando em números de Reynolds mais baixos. À medida que os testes foram realizados a velocidade do fluxo aumenta (Re), a perda de carga também aumenta.

Figura 13 – Δp Distribuída x Re, curva 45°.



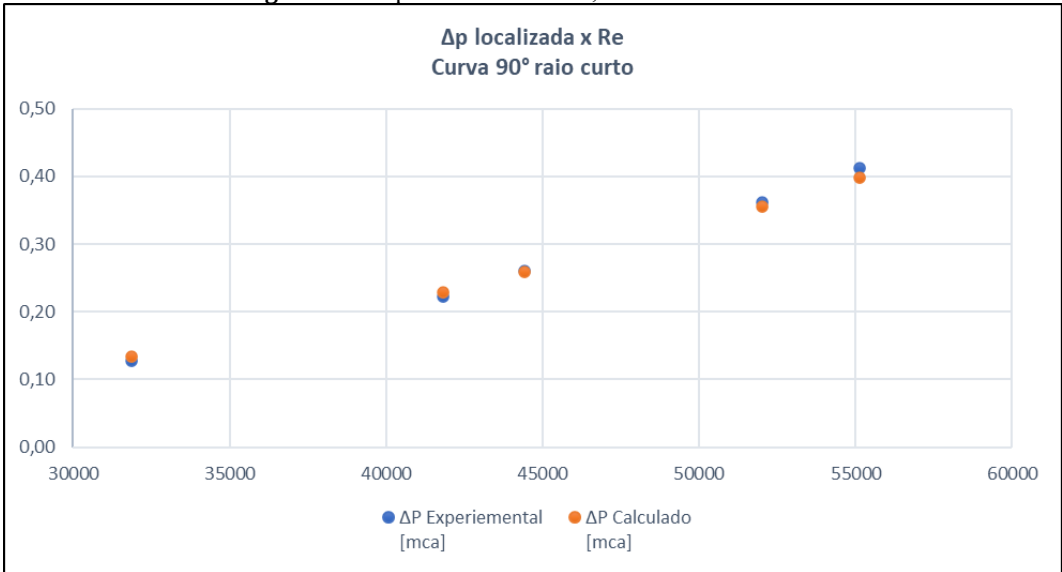
Fonte: Próprio autor.

Figura 14 – Δp Distribuída x Re, curva 90° raio longo.



Fonte: Próprio autor.

Figura 15 – Δp Distribuída x Re, curva 90° raio curto.



Fonte: Próprio autor.

CONCLUSÃO

Durante a realização de aproximadamente 180 testes, na bancada da USF Campinas, foram apresentados problemas operacionais na bancada como vazamentos, conexões quebradas e avarias no medidor de pressão por falta de manutenção preventiva e calibração dos instrumentos, resultando em valores insatisfatórios e incoerentes dos resultados para perda de carga e fator de atrito práticos. A solução encontrada foi de transferir os experimentos para a bancada da USF Itatiba. Nesse segundo cenário foram realizados outros 90 testes, para extrair 30 resultados satisfatórios, permitindo a extração de dados para enfim calcular a perda de carga e o fator de atrito, tanto teórico quanto experimental.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Apesar dos contratempos iniciais, os valores obtidos na pesquisa apresentaram um erro relativo de aproximadamente 4,8%, estando dentro da margem aceitável de até 5%, conforme estabelecido por White (2010). Vale ressaltar que a precisão dos resultados foi afetada pela escala do medidor de pressão diferencial, que possui uma escala de 0,1 m.c.a, limitando a exatidão das medições. Bem como para os testes nas singularidades, onde utilizou-se um piezômetro de três linhas com escala máxima de 1500 m.c.a, fator este que limitou a realização da tomada de perda de carga nas singularidades e também um pequeno vazamento na tomada de entrada do piezômetro.

Ao analisar os gráficos de perda de carga em relação ao número de Reynolds (Re), observou-se que a maioria dos testes apresentou valores de Re acima de 4.104 [-], indicando um regime de escoamento turbulento. Exceto, o teste 1 da curva 90° raio curto, que se situou em uma região de transição entre fluxo laminar e turbulento, com um Reynolds de 31852 [-]. A explicação para esse fenômeno foi associada à velocidade relativamente baixa do fluido e à influência das curvas mais fechadas, favorecendo um fluxo mais organizado.

Em resumo, a pesquisa enfrentou desafios técnicos iniciais, superados pela mudança para uma bancada mais adequada. Os resultados obtidos foram satisfatórios, demonstrando uma coerência aceitável entre os cálculos teóricos e experimentais. A análise dos gráficos contribuiu para uma compreensão mais profunda do comportamento do fluido em diferentes condições, consolidando o conhecimento sobre perda de carga e fator de atrito em sistemas hidráulicos.

REFERÊNCIAS

CANEDO, E. L. **Fenômenos de Transporte**. 1a ed. Campina Grande, PB: LTC, 2009

COSTA, A. C. **Estudo da perda de carga em tubulações com acessórios**. Dissertação de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ: UFRJ, 2015.

ÇENGEL, Y. A., & CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos - Fundamentos e Aplicações**. 3a ed. São Paulo, SP: McGraw-Hill Education, 2019.

MARTINS, F. C., & OLIVEIRA, L. R. **Influência da rugosidade na perda de carga em tubulações**. Artigo Científico da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG: UFMG, 2016.

MUNSON, B. R., & YOUNG, D. F., & OKISHI T. H. **Fundamentos da mecânica dos fluidos**. Tradução da quarta edição americana: Euryale de Jesus Zerbini. São Paulo, SP: Edgard Blücher, 2004.

SILVEIRA, P. E. **Manual Bancada de mecânica dos fluidos MF3/09 (PP30)**. Itatiba, SP: Labtrix Bancadas didáticas e industriais, 2012.

THERMAL-ENGINEERING. **O que é o Diagrama de Moody – Definição**. Disponível em: <https://www.thermal-engineering.org/pt-br/o-que-e-o-diagrama-moody-definicao/>
Acesso em: 25/11/2023



UNICAMP. **Cálculo da perda de energia mecânica por atrito em acessórios.** Disponível em: https://www.unicamp.br/fea/ortega/aulas/aula07_perdaLocalizada.ppt
Acesso em: 20/08/2023

VASCONCELOS, R., & COSTA, A. C., & ARAUJO, J. R. **Estudo da perda de carga em tubulações com rugosidade variável.** Artigo Científico da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ: UFRJ, 2015.

WHITE, F. M. **Mecânica dos fluidos.** 6a ed. Porto Alegre, RS: Bookman. 2010.