



# Análise computacional do escoamento em uma tubulação

Helena Barbosa Santos

*Universidade de Brasília, Faculdade do Gama - FGA*

Agosto, 2020

## Resumo

Na área da mecânica dos fluidos, a análise computacional é muito importante para a avaliação de escoamentos. Neste artigo foi abordada uma seção da tubulação de uma instalação de bombeamento que apresenta problemas. Com isso, o valor da perda de carga medido no tubo foi analisado conforme a teoria, da mesma forma para o estudo paramétrico do fator de atrito. O objetivo consiste em avaliar a normalidade da situação com o auxílio de recursos de CFD, no caso o software Ansys. Após realizar a simulação, concluiu-se que a tubulação apresenta problemas referentes a perda de carga, possivelmente causados por deformidades no trecho analisado.

**Palavras-chave:** Mecânica dos fluidos. Escoamento. Tubulação. Perda de carga. Fator de Atrito. Simulação.

## Abstract

In the metier of fluid mechanics, computational analysis is very important for the evaluation of flows. In this article, a section of the piping of a pumping installation that has problems was addressed. Therewith, the value of the head loss measured at the pipe was analyzed according to the theory, in the same way for the parametric study of the friction factor. The objective is to assess the normality of the situation with the help of CFD resources, in this case the Ansys software. After performing the simulation, it was concluded that the pipeline has problems related to pressure loss, possibly caused by deformities in the analyzed section.

**Keywords:** Fluid mechanics. Flow. Pipeline. Pressure loss. Friction factor. Simulation.

## Lista de Símbolos

$\mu$	Viscosidade dinâmica
$\rho$	Massa específica
$\varepsilon$	Rugosidade absoluta
$\varepsilon/D$	Rugosidade relativa
$A_s$	Área da secção transversal
$D$	Diâmetro do tubo
$f$	Fator de atrito
$h_l$	Perda de carga
$L$	Comprimento do tubo
$Q$	Vazão volumétrica
$Q_e$	Vazão volumétrica de entrada
$Q_s$	Vazão volumétrica de saída
$Qm_e$	Vazão mássica de entrada
$Qm_s$	Vazão mássica de saída
$Re$	Número de Reynolds
$v$	Velocidade

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Materiais e Métodos</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Resultados</b>	<b>8</b>
3.1	Número de Reynolds . . . . .	9
3.2	Fator de atrito . . . . .	10
3.3	Perda de carga . . . . .	13
3.4	Perfil de velocidade . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Conclusões</b>	<b>15</b>
	<b>Referências</b>	<b>17</b>

## Lista de Figuras

1	Malha automática. . . . .	7
2	Diagrama de Moody. . . . .	10
3	Gráfico da perda de carga. . . . .	13
4	Contorno do perfil de velocidade com 15 amostras. . . . .	14
5	Gráfico do perfil de velocidade. . . . .	15

## Lista de Tabelas

1	Margem de valores para dissimetria e qualidade ortogonal. . . . .	7
2	Valores de dissimetria e qualidade ortogonal da malha do projeto. . . . .	7
3	Comparação dos valores de número de Reynolds. . . . .	9
4	Valores do fator de atrito para $v_1$ . . . . .	11
5	Valores do fator de atrito para $v_2$ . . . . .	11
6	Valores do fator de atrito para $v$ . . . . .	11
7	Valores do fator de atrito para $v_4$ . . . . .	12
8	Comparação dos valores de perda de carga. . . . .	14

# 1 Introdução

Uma instalação de bombeamento apresentou problemas em uma determinada seção da tubulação com 1 metro de comprimento e 40 mm de diâmetro. A perda de carga foi medida usando sensores de pressão, e mensurou-se uma queda de pressão de 2 Pa. A bomba que supre esta tubulação com água opera em potência máxima. Também se mediu a vazão deste escoamento, obtendo um valor de na saída do tubo.

O objetivo geral deste projeto é obter uma simulação da tubulação em questão, através de recursos de CFD (*Computational Fluid Dynamics*), utilizando o software Ansys. Os objetivos específicos consistem em comparar os resultados de vazão e perda de carga obtidos na simulação e os valores teóricos. E assim, averiguar se estão consistentes com a realidade física do escoamento. Caso não se encontrem coerentes, serão apresentadas possibilidades de problemas. Além disso, será realizado um estudo paramétrico do fator de atrito, adotando variações de velocidade e material, para avaliar se o cenário é normal para esta instalação.

O projeto tem finalidade acadêmica para demonstração e visualização do escoamento citado. Desta forma, os requisitos de solução são os valores de perda de carga, fator de atrito, e os valores necessários para seu cálculo, a precisão requerida será definida de acordo com os cálculos utilizados. A utilização de CFD é importante na observação de escoamentos para a área de mecânica dos fluidos. Na análise do problema, os recursos teóricos serão essenciais para obter uma maior confiabilidade dos resultados simulados. E assim, definir o comportamento esperado para a tubulação apresentada. Correlato a isso, a organização do projeto foi dividida em três etapas, sendo elas a modelagem do problema, o pré-processamento da simulação, o processamento e o pós-processamento.

# 2 Materiais e Métodos

A simulação foi realizada através do software Ansys 2020 R1 Academic e o pacote CFX. Na modelagem do projeto a ferramenta utilizada foi o Design Modeler para a geração da geometria da tubulação com as medidas de diâmetro, de 0,04 metros e comprimento, de 1 metro. O sólido obtido apresenta uma geometria simples, sendo adequada para a análise em questão, além de não possuir elementos desnecessários que podem causar atrasos no pré-processamento da simulação. Após a modelagem, utilizou-se o Meshing para a geração da malha do problema, a qual pode ser vista na figura 1. A malha adotada foi gerada automaticamente utilizando a opção “Generate”.

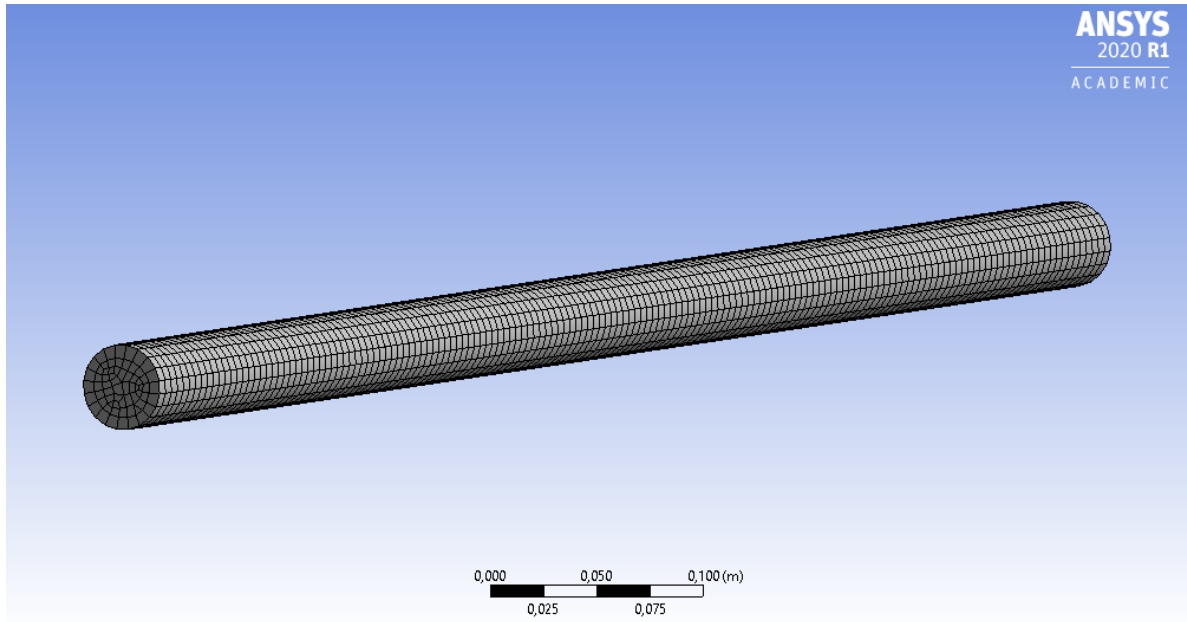


Figura 1: Malha automática.

A malha obtida é estruturada e permite que seus elementos possam se alinhar na direção dos gradientes do escoamento. Desta maneira, reduz-se o tempo da simulação e possibilita a obtenção de uma maior precisão nos resultados. Além disso, adotou-se o Método dos Volumes Finitos para a análise.

Vale ressaltar que, além da escolha do método de geração da malha auxiliar na confiabilidade dos resultados, também se faz necessário avaliar a sua qualidade. Tendo em foco os valores referentes a Dissimetria (*Skewness*) máxima e Qualidade Ortogonal (*Orthogonal Quality*) mínima. As escalas de qualidade para a classificação destes parâmetros constam na Tabela 1. Na Tabela 2, se encontram os valores obtidos para a malha.

Escala de qualidade	Dissimetria	Qualidade Ortogonal
Excelente	0 – 0,25	0,95 – 1
Muito Bom	0,25 – 0,50	0,70 – 0,95
Bom	0,50 – 0,80	0,20 - 0,69
Aceitável	0,80 – 0,94	0,15 – 0,20
Ruim	0,95 – 0,97	0,001 – 0,14
Inacetiável	0,98 – 1	0 – 0,001

Tabela 1: Margem de valores para dissimetria e qualidade ortogonal.

Dissimetria	Qualidade Ortogonal
0,047313	0,82069

Tabela 2: Valores de dissimetria e qualidade ortogonal da malha do projeto.

Nota-se que ambos os parâmetros se classificaram na margem de “Muito Bom” nas escalas de qualidade, desta forma, a malha gerada está adequada para o projeto. A partir da malha finalizada, foram estabelecidas no CFX-Pre as características do domínio padrão, as hipóteses adotadas para o escoamento consistem em:

1. Regime permanente;
2. Não há trocas de calor com o meio externo;
3. Pressão de referência de 1 atm;

Desta forma, foram definidos os detalhes das condições de contorno nas regiões de entrada e saída do tubo. Para a entrada, a condição definida foi a velocidade do escoamento, a qual foi calculada a partir da vazão volumétrica aferida na tubulação. Utilizou-se a equação da continuidade (1) para obter a relação entre as vazões volumétricas do escoamento (2), como pode ser visto a seguir.

$$\sum Qm_e = \sum Qm_s \quad (1)$$

$$\sum Q_e = Q_s \quad (2)$$

$$Q = v \cdot A_s \quad (3)$$

$$0,0001[m^3/s] = v[m/s] \cdot \left( \frac{0,04^2 \pi}{4} \right) [m^2] \quad (4)$$

$$v = 0,0795m/s \quad (5)$$

Com o valor de velocidade definido, os detalhes referentes a região da entrada do escoamento foram concluídos. Para a saída o parâmetro escolhido foi a pressão estática relativa de 0 Pa. Por fim, os detalhes do controle de solução permaneceram nos padrões, finalizando a etapa de pré-processamento.

### 3 Resultados

Após o processamento da solução, utilizou-se o CFD-Post para obter resultados qualitativos de engenharia e os valores numéricos necessários para o estudo paramétrico. Primeiramente, serão apresentados os valores obtidos para o Número de Reynolds, pois este parâmetro é essencial para a realização do estudo do fator de atrito.



### 3.1 Número de Reynolds

O número de Reynolds permite avaliar o perfil do escoamento. O qual pode ser classificado como laminar, de transição ou turbulento. Estas regiões possuem valores limites característicos para este número, são eles:

- Regime laminar:  $Re < 2100$ ;
- Regime de transição:  $2100 < Re < 4000$ ;
- Regime turbulento:  $Re > 4000$ ;

O cálculo teórico do número de Reynolds é realizado da seguinte maneira:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (6)$$

Os valores para a massa específica da água e viscosidade dinâmica da água são, respectivamente  $997 kg/m^3$  e  $0,0891 \cdot 10^{-3} kg/ms$ . Com estes dados é possível encontrar o valor para o número de Reynolds no escoamento analisado e caracterizar o seu escoamento.

$$Re = \frac{997 \cdot 0,0795 \cdot 0,04}{0,891 \cdot 10^{-3}} \quad (7)$$

$$Re = 3558,31 \quad (8)$$

A partir do valor obtido, nota-se que o escoamento apresenta regime de transição para turbulento. Para avaliar a mudança de regime do escoamento e do número de Reynolds, adotou-se a velocidade como variável. Sendo assim, a Tabela 3 apresenta os dados teóricos e simulados e seu erro percentual.

Velocidade (m/s)	$Re$ teórico	$Re$ simulado	Erro percentual
0,02	895,17	894,99	0,0201%
0,05	2237,93	2239,4	0,0656%
0,0795	3558,31	3556,7	0,0452%
0,1	4475,86	4471,1	0,1064%

Tabela 3: Comparação dos valores de número de Reynolds.

Os dados obtidos respeitam a realidade física do escoamento pois, conforme o valor da velocidade aumenta, o número de Reynolds apresenta um comportamento crescente. Correlato a isso, o regime do escoamento alterou-se entre laminar, de transição e turbulento, apenas com a mudança da velocidade. Com isso, nota-se que a velocidade é um fator importante a ser considerado para a análise do estudo deste projeto. Portanto, será a variável para a análise dos demais fatores abordados a seguir.

### 3.2 Fator de atrito

Para a realização do estudo paramétrico, faz-se necessária uma breve definição. O fator de atrito é resultado das forças de cisalhamento do fluido. Sendo um dos fatores responsáveis pelas perdas energéticas presentes em um escoamento, para os regimes apresentados, há distintas formas de calcular o fator de atrito.

No escoamento laminar, o Fator de atrito de Darcy depende apenas do número de Reynolds. Conforme a equação 9.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (9)$$

Para os demais regimes faz-se importante a consideração de outro fator, a rugosidade, a qual pode variar de acordo com o material da tubulação, o tipo de fabricação e o tempo de utilização. A rugosidade absoluta possui unidade de medida de comprimento e a rugosidade relativa é adimensional.

Para escoamentos turbulentos, a expressão mais usual para calcular o fator de atrito, é a de Colebrook (equação 10).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \cdot \log \left( \frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (10)$$

Baseado na expressão de Colebrook, traçou-se o Diagrama de Moody (Figura 2), tal gráfico mostra as relações entre o fator de atrito, número de Reynolds e a rugosidade relativa do tubo. A partir do diagrama é possível estimar os valores para o fator de atrito de acordo com a variável escolhida.

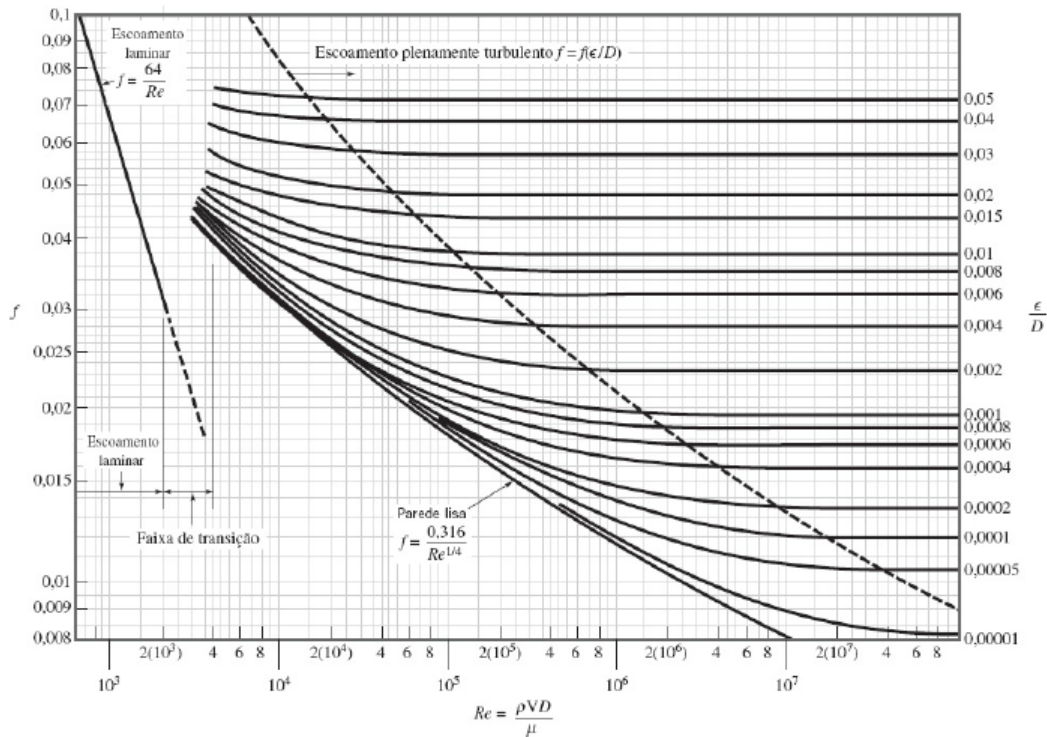


Figura 2: Diagrama de Moody.

Para o estudo paramétrico, a variação da velocidade será considerada para observar a mudança do fator de atrito de acordo com o regime de escoamento. Além desta variável, serão considerados diferentes materiais para a tubulação. Tal escolha de variáveis possui as seguintes finalidades:

1. Analisar os efeitos causados por materiais diferentes perante o fator de atrito;
2. Avaliar a mudança do fator de atrito de acordo com a diferença de rugosidade entre tubos com processos de fabricação distintos, para o mesmo material;
3. Calcular os efeitos da oxidação no mesmo material, levando em consideração a idade da tubulação.

A variação de valores para o fator de atrito de acordo com os parâmetros apresentados, poderá ser observada nas tabelas a seguir.

- $v_1 = 0,02$  m/s

$f$ teórico	$f$ simulado	Erro percentual
0,07149480	0,0715092	0,0201%

Tabela 4: Valores do fator de atrito para  $v_1$ .

- $v_2 = 0,05$  m/s

Material	$\varepsilon(\text{m})$	$f$ teórico	$f$ simulado	Erro percentual
Aço galvanizado com costura	0,00015	0,0506346	0,0506253	0,0183%
Aço galvanizado sem costura	0,00006	0,0488869	0,0488869	0,0167%
Ferro fundido novo	0,00025	0,0525283	0,0525194	0,0169%
Ferro fundido com leve oxidação	0,0003	0,0534576	0,0534489	0,0162%
Ferro fundido velho	0,003	0,0950934	0,0950934	0,0112%
PVC	0,0000015	0,0477268	0,0477168	0,0209%
“liso”	0	0,0476968	0,0476868	0,0209%

Tabela 5: Valores do fator de atrito para  $v_2$ .

- $v = 0,0795$  m/s

Material	$\varepsilon(\text{m})$	$f$ teórico	$f$ simulado	Erro percentual
Aço galvanizado com costura	0,00015	0,0448128	0,0448178	0,0111%
Aço galvanizado sem costura	0,00006	0,0427494	0,0427547	0,0123%
Ferro fundido novo	0,00025	0,0470113	0,0470160	0,0100%
Ferro fundido com leve oxidação	0,0003	0,0480778	0,0480823	0,0093%
Ferro fundido velho	0,003	0,0922701	0,0922723	0,0023%
PVC	0,0000015	0,0413589	0,0413645	0,0135%
“liso”	0	0,0413226	0,0413283	0,0137%

Tabela 6: Valores do fator de atrito para  $v$ .

- $v_4 = 0,1 \text{ m/s}$

Material	$\varepsilon(\text{m})$	$f$ teórico	$f$ simulado	Erro percentual
Aço galvanizado com costura	0,00015	0,0424226	0,0424330	0,0245%
Aço galvanizado sem costura	0,00006	0,0401788	0,040901	0,0281%
Ferro fundido novo	0,00025	0,0447875	0,0447971	0,0214%
Ferro fundido com leve oxidação	0,0003	0,0459265	0,0459358	0,0202%
Ferro fundido velho	0,003	0,0912639	0,0912681	0,0046%
PVC	0,0000015	0,0386512	0,0386631	0,0307%
“liso”	0	0,0386112	0,0386232	0,0310%

Tabela 7: Valores do fator de atrito para  $v_4$ .

Observa-se que com o aumento da velocidade média e o número de Reynolds, o fator de atrito decresce. Quando isto ocorre, a espessura da fina camada viscosa próxima à parede do tubo diminui. Sendo assim, os elementos de rugosidade passam a emergir através desta camada, tornando o efeito da rugosidade relevante para estes casos. Perante isso, a análise com diversos materiais foi importante para mostrar a relação diretamente proporcional entre a rugosidade e o fator de atrito.

Com a mudança de material e rugosidade, a análise foi dividida de acordo com:

- A mudança simples de material;
- A técnica de fabricação, a partir do mesmo material;
- A idade da tubulação, com o mesmo material;

O material com a rugosidade menor é o de PVC, sendo muito próxima do valor para tubos “lisos”. Logo, os dois materiais apresentaram os menores valores de Fator de Atrito, pelo fato de possuírem uma menor irregularidade nos seus interiores.

O aço galvanizado com costura, fabricado através da soldagem de uma chapa de metal, possui um valor de rugosidade maior. O aço galvanizado sem costura, produzido a partir da perfuração de um cilindro de metal, possui rugosidade menor. Desta forma, o Fator de Atrito foi maior para o tubo de aço galvanizado com costura, devido à sua maior irregularidade. Diferentemente do tubo produzido sem costura, que apresentou um fator de atrito menor.

O ferro fundido novo apresenta um valor de rugosidade muito menor em relação ao ferro fundido velho. Pelo fator temporal a camada de oxidação, formada no interior de tubos deste material, aumenta gradativamente. Devido a isto, o mesmo ocorre para a rugosidade e para o Fator de Atrito no escoamento.

Com os dados apresentados, conclui-se a natureza física do escoamento foi respeitada tanto para a variação da velocidade, quanto para a mudança de material. E assim, o estudo paramétrico foi finalizado.

### 3.3 Perda de carga

O pós-processamento da solução forneceu o gráfico referente a perda de carga de acordo com o comprimento do tubo, como pode ser observado na figura 3.

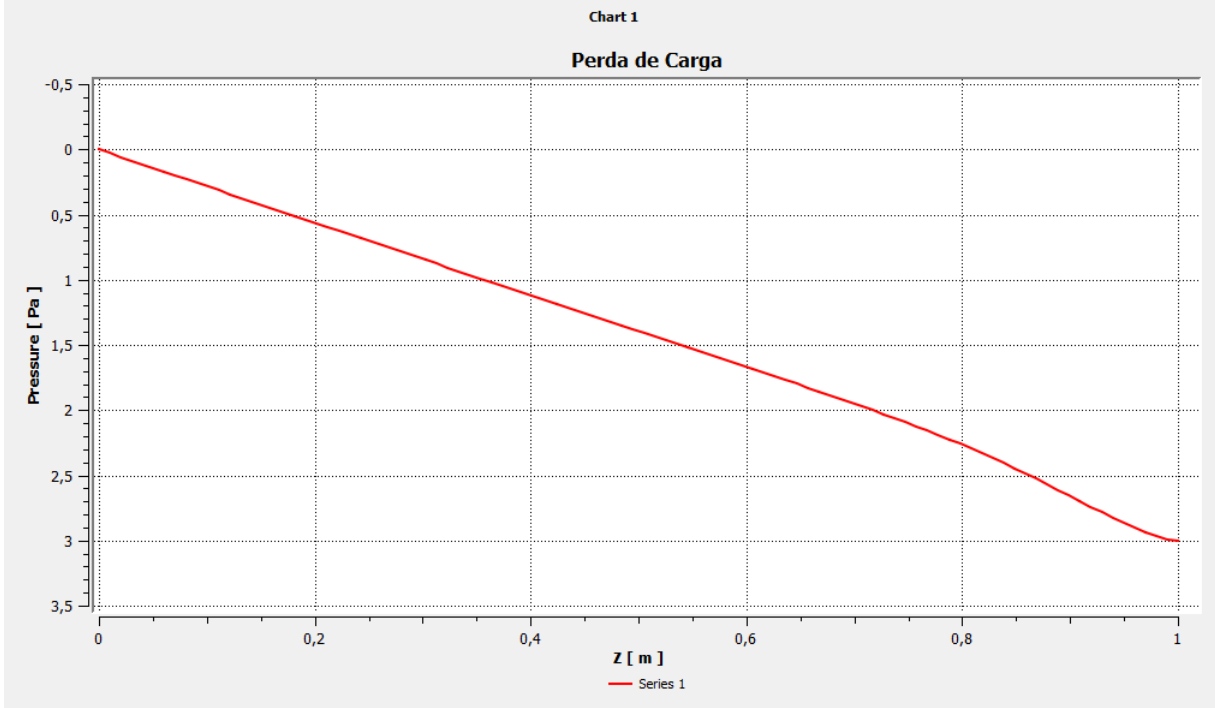


Figura 3: Gráfico da perda de carga.

Para analisar a normalidade da tubulação, é necessário realizar o cálculo teórico da perda de carga, para isso utilizou-se a equação 11.

$$h_l = f \frac{L \rho v^2}{2D} \quad (11)$$

Adotou-se a superfície do tubo como “lisa”, desta maneira, o valor resultante para o fator de atrito é de 0,0413. Obtendo o seguinte valor teórico para a perda de carga.

$$h_l = 0,0413 \cdot \frac{1}{0,04} \cdot \frac{997 \cdot 0,0795^2}{2} \quad (12)$$

$$h_l = 3,253 Pa \quad (13)$$

A perda de carga mensurada na tubulação, com velocidade média de 0,0795 m/s, foi de 2 Pa, de acordo com os sensores de pressão. Assim como para o estudo paramétrico, foram inseridos diferentes valores de velocidade média para uma análise breve do comportamento da perda de carga. Como pode ser visto na tabela a seguir.

Velocidade (m/s)	$h_l$ teórico	$h_l$ simulado	Erro percentual
0,02	0,2058	0,2034	1,179%
0,05	1,2867	1,2759	0,846%
0,0795	3,2530	3,0171	7,818%
0,1	5,1470	4,7521	8,310%

Tabela 8: Comparação dos valores de perda de carga.

### 3.4 Perfil de velocidade

A velocidade do escoamento varia com o raio do tubo, devido a essa variação e a viscosidade do fluido é causada uma tensão de cisalhamento na parede do tubo. No pós-processamento, foi inserido um contorno do perfil de velocidade com 15 amostras (Figura 4). Consecutivamente, para uma melhor análise de engenharia, foi gerado um gráfico do perfil de velocidade pelo comprimento do tubo (Figura 5).

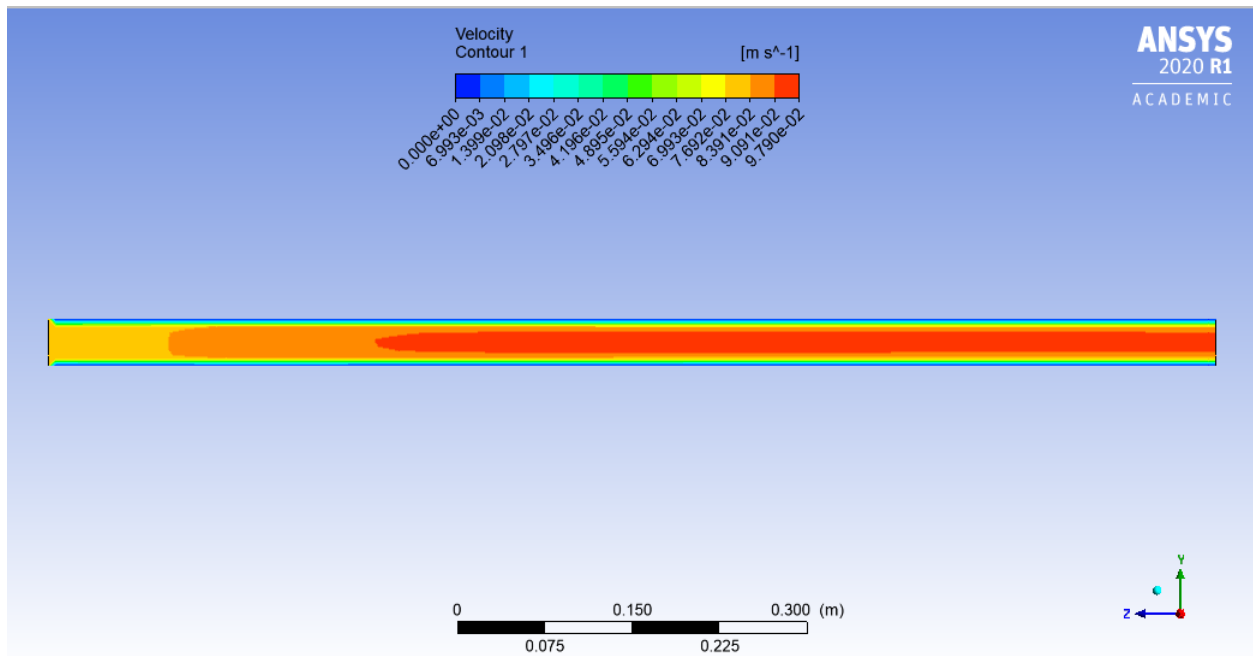


Figura 4: Contorno do perfil de velocidade com 15 amostras.

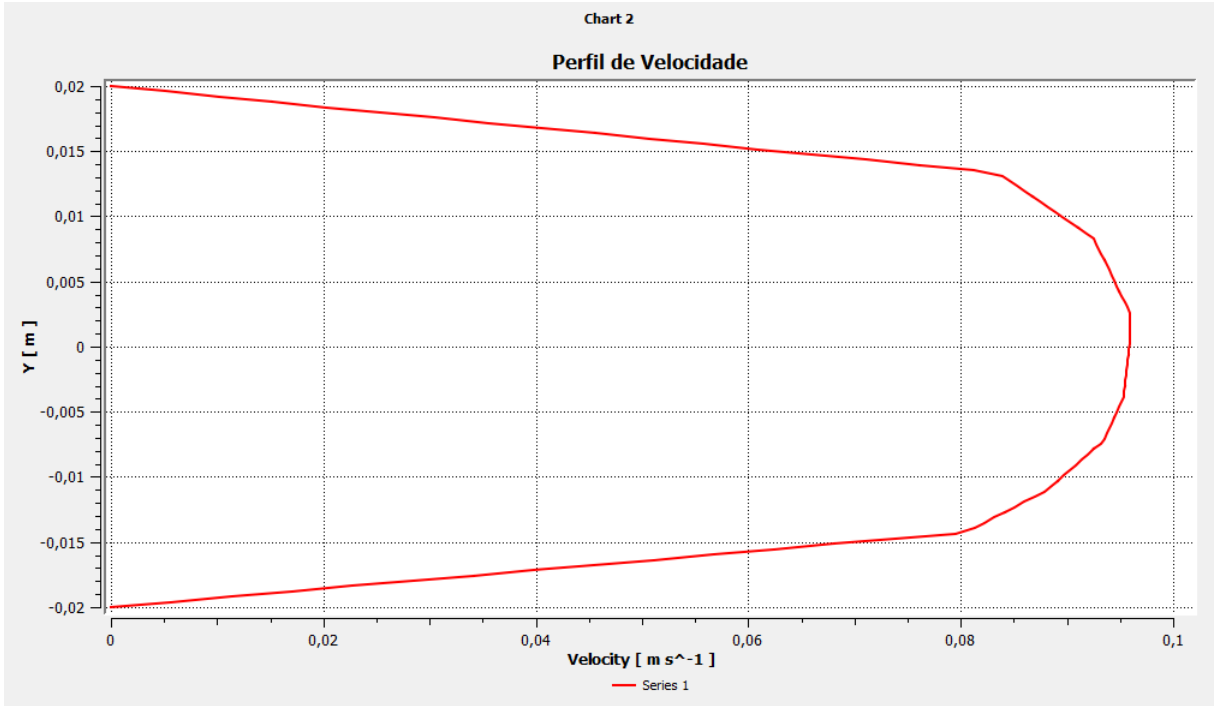


Figura 5: Gráfico do perfil de velocidade.

## 4 Conclusões

O objetivo do projeto consiste em avaliar a normalidade da tubulação apresentada, e assim, fornecer soluções para possíveis problemas encontrados. Após as escolhas realizadas para a modelagem e pré-processamento, foi necessário observar se estas condições se encontram condizentes com os cálculos efetuados. Desta maneira, as etapas de processamento e pós-processamento forneceram os valores qualitativos e quantitativos necessários para verificar que a tubulação pode haver problemas.

No caso estudado, a perda de carga aferida na seção da tubulação apresentou-se divergente do valor calculado. Ao avaliar o estudo paramétrico do fator de atrito observou-se que, para este parâmetro, a natureza no escoamento foi respeitada. Para o cálculo da perda de carga adotou-se o menor valor possível para o fator de atrito, ao considerar a superfície do tubo como “lisa”. Porém, o valor teórico da perda de carga foi maior do que o medido no local. Sendo assim, é possível aferir que a tubulação apresenta uma irregularidade comprovada através dos cálculos e da simulação.

Conforme o que foi exposto, a análise referente à tubulação foi completada de forma satisfatória e atendeu aos requisitos de solução propostos. O estudo paramétrico do fator de atrito foi concluído e portanto, foi capaz de demonstrar analiticamente sua relação com os valores de velocidade média e a mudança de material. Da mesma forma para a análise do Número de Reynolds e do perfil de velocidade. No entanto, o único parâmetro calculado que se apresentou divergente da realidade, foi a perda de carga. Uma possível causa para essa anormalidade seria a existência de uma deformação no trecho da tubulação, comprometendo sua uniformidade interna. A partir disto, seria possível ocorrer mudanças no comportamento

do escoamento, devido à divergência entre a geometria adotada e a situação real. Tendo em vista os resultados obtidos e a análise definitiva, o estudo realizado forneceu as respostas necessárias para a avaliação da situação. Desta forma, conforme o que foi proposto, o objetivo do projeto foi concluído.



## Referências

- [1] MORAN, M. J. *Introdução à engenharia de Sistemas Térmicos: Termodinâmica, Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor*. Nova Jersey: John Wiley and Sons, Inc, 2003. ISBN 978-85-216-1853-9.
- [2] FOX, R. W. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- [3] WHITE, F. M. *Fluid Mechanics*. Nova Iorque: McGraw – Hill, 2011.