

ANÁLISE DA SENSIBILIDADE AOS PRINCIPAIS PARÂMETROS NA PERDA DE CARGA DURANTE O ESCOAMENTO DE ÁGUA.

Jordana Ferreira Rezio, jordanarezio.123@gmail.com¹
Jair Dinoah de Araújo Junior, jair.junior@ifg.edu.br²

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, endereço para correspondência, Rua 75, nº46, Centro, Goiânia, Goiás, CEP: 74055-110

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, endereço para correspondência, Rua 75, nº46, Centro, Goiânia, Goiás, CEP: 74055-110

Resumo. A elaboração de um projeto hidráulico requer otimização e para isso faz-se necessário conhecer o comportamento dos parâmetros aos quais a perda de carga é sensível, com o intuito de subsidiar a seleção do diâmetro e do material do tubo projetado. Diante disso, esse trabalho propõe um breve histórico do escoamento do fluido em dutos, o estudo da influência dos fatores como diâmetro interno, velocidade, rugosidade absoluta e viscosidade dinâmica na alteração da perda de pressão ao analisar esses parâmetros através de algoritmo próprio gerado no software livre Scilab. Inicialmente foi apresentado o comportamento da sensibilidade à perda de carga, a partir de valores médios dos parâmetros de um escoamento, com uma varredura entre 80% e 120% destes valores que, calculadas, trouxeram, em módulo, respectivamente, 519%, 196%, 17,5% e 5,38% de sensibilidade. Em seguida, foram combinados valores altos e baixos destes, onde a maior sensibilidade ao diâmetro de 538%, à velocidade de 201% e à rugosidade, de 31,7%, ocorreu com rugosidade de 2 mm. Já a maior sensibilidade à viscosidade, de 17,9%, foi identificada com o uso da rugosidade baixa (0,0015 mm). Os resultados obtidos foram interpretados de maneira a entender estas variações de parâmetros na perda de carga.

Palavras-chave: Perda de carga. Análise de sensibilidade. Seleção de diâmetro.

Abstract. The elaboration of hydraulic project requires optimization and for that is necessary to know the behavior of the parameters to which the pressure drop is sensitive, to subsidize the selection of the diameter and material of the projected pipe. In view of this, this work proposes a brief history of fluid flow in pipelines, the study of the influence of factors such as internal diameter, velocity, absolute roughness and dynamic viscosity in the alteration of pressure loss when analyzing these parameters through a proprietary algorithm generated in the software free Scilab. Initially, the behavior of the sensitivity to head loss was presented, based on average values of the parameters of a flow, with a sweep between 80% and 120% of these values which, calculated, brought, in module, respectively, 519%, 196%, 17.5% and 5.38% sensitivity. Then, high and low values of these were combined, where the greatest sensitivity to the diameter of 538%, to the speed of 201% and to the roughness, of 31.7%, occurred with a roughness of 2 mm. The highest sensitivity to viscosity, 17.9%, was identified with the use of low roughness (0.0015 mm). The obtained results were interpreted to understand these parameter variations in pressure drop.

Keywords: Head loss. Sensitivity analysis. Diameter selection.

1. INTRODUÇÃO

Mais recentemente, a partir da revolução industrial, o escoamento de fluidos passou a ser trabalhado de maneira mais abrangente e científica, com destaque para a classificação dos escoamentos a partir das características apresentadas. Essa separação é abordada como: interno ou externo; de líquidos ou de gases; compressíveis ou incompressíveis; viscosos ou não viscosos, turbulentos ou não turbulentos; subsônicos ou supersônicos; adiabático ou não adiabático.

O entendimento do comportamento de parâmetros como vazão, diâmetro, viscosidade e rugosidade, na geração das perdas de pressão em tubulações e acessórios hidráulicos são de grande importância, porque influenciam nas especificações do projeto hidráulico, onde, a partir de uma demanda, é possível otimizar um projeto.

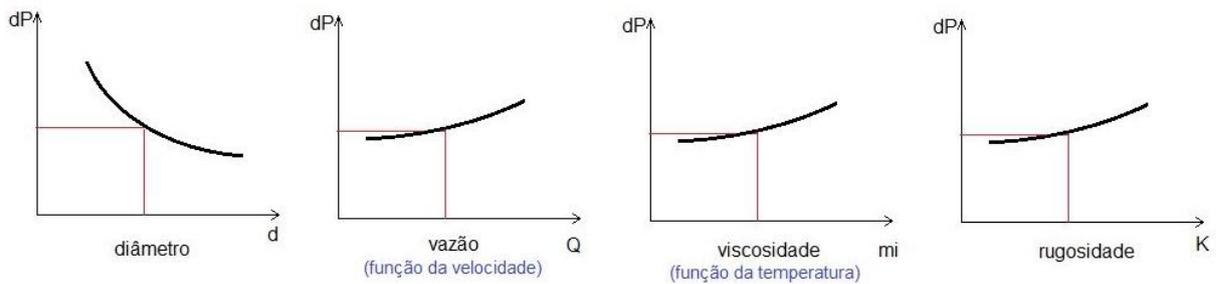


Figura 1. Comportamento geral dos parâmetros analisados. (Própria, 2022)

O presente trabalho tem o intuito de analisar o comportamento da perda de carga por atrito viscoso durante o escoamento de água em uma tubulação ao quantificar os parâmetros de maior e de menor impacto nessa perda, cujas análises serão efetuadas e discutidas através de equações já conhecidas, como equação da continuidade, de Bernoulli e de Darcy-Weisbach.

Neste estudo, dentro da hidrodinâmica, foram usadas algumas hipóteses simplificadoras de um escoamento interno de água, também chamado de escoamento em dutos forçados, como seguem: o escoamento é de líquido incompressível, viscoso e adiabático. Quanto à turbulência, pode ser, a depender da situação, turbulento ou não turbulento, mas nas condições usuais, o mesmo normalmente é turbulento. Estas e outras características estarão detalhadas na fundamentação teórica deste trabalho.

Inerente às especificidades, ocorre perda de carga durante o transporte da água, onde o atrito viscoso provoca uma perda de pressão que simultaneamente gera calor, garantindo assim a Lei da Conservação de Energia. Apesar de existir uma relação entre a perda de pressão e a geração de calor, essa pouco interfere na temperatura do escoamento, assim, a modelagem destes problemas, comumente, se restringem às grandezas mecânicas pressão, vazão e nível geométrico (gravitacional).

CONNOR (2020) afirma ainda que a perda de carga que ocorre nos tubos é dependente da velocidade do escoamento, diâmetro e comprimento do tubo, e um fator de atrito baseado na rugosidade do tubo e no número de Reynolds do escoamento. Embora a perda de carga represente uma perda de energia, ela não representa uma perda de energia total do fluido. A energia total do fluido se conserva como consequência da lei de conservação de energia. Na realidade, a perda de carga devido ao atrito resulta em um aumento equivalente na energia interna (aumento da temperatura) do fluido.

Do ponto de vista da engenharia, é importante conhecer a viscosidade à temperatura de operação, pois ela influencia o cálculo do Número de Reynolds e outras etapas de troca térmica. Para Çengel (2012), a viscosidade é a propriedade que representa a resistência interna do líquido ao movimento. Em geral, a viscosidade de um fluido depende da temperatura e da pressão, embora a dependência da pressão seja bastante fraca. Para líquidos tanto a viscosidade dinâmica como a cinemática são, praticamente, independentes da pressão e qualquer variação pequena de pressão é normalmente desprezada, exceto nos casos de pressões extremamente altas. Já para os gases, a viscosidade dinâmica não depende da pressão, mas a cinemática sim.

Segundo Araújo e Bezerra (2016), em Método para diâmetro e fator de atrito: rede de distribuição, uma das mais comuns dificuldades ao projetar uma rede de distribuição de água é definir o diâmetro a ser utilizado para o dimensionamento de seus trechos, uma vez que, para alguns intervalos de vazão, mais de um diâmetro atende ao estabelecido pela NBR 12218:1994. Como critério de dimensionamento, a citada norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) determina que a amplitude de velocidade entre uma vazão mínima e uma vazão máxima nas tubulações da rede deve ser de maior que 0,6 m/s e menor que 3,5 m/s.

Quando duas camadas fluidas se movem uma em relação a outra, desenvolve-se uma força de atrito entre elas e a camada mais lenta tenta reduzir a velocidade da camada mais rápida. Tal resistência interna ao escoamento é denominada viscosidade (Çengel, 2012). Os escoamentos em que os efeitos do atrito são significativos chamam-se escoamentos viscosos.

Para regimes turbulentos ($Re > 4000$), essa pesquisa utilizou equações que representam analiticamente a região de turbulência, como é o caso da equação de Swamee-Jain (Fig. 2), usada no algoritmo gerado.

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

Figura 2. Equação de Swamee-Jain. (Fox, 1998)

2. METODOLOGIA

Conforme ilustrado no fluxograma representado na Fig. 3, as atividades deste trabalho foram realizadas em quatro etapas principais.

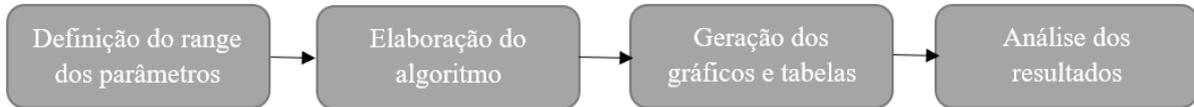


Figura 3. Fluxograma metodológico adotado. (Própria, 2022)

Com o uso de um software livre (Scilab), foi gerado um algoritmo que objetiva a análise da variação da pressão em relação a diâmetro, rugosidade absoluta, velocidade e viscosidade dinâmica, conforme valores da Tab.1.

Tabela 1. Parâmetros utilizados na simulação.

Parâmetro	Valor menor	Valor médio	Valor maior
Diâmetro Interno (mm)	Dmín	Dméd	Dmáx
	54,6	272	489,4
Velocidade (m/s)	Vmin (d = 50)	Vméd	Vmáx (d=500)
	~0,6	1,5	~2,4
Rugosidade Absoluta (mm)	PVC	GALVANIZADO	AÇO ENFERRUJADO
	0,0015	0,15	2,0
Viscosidade Dinâmica (Pa.s)	60°C	20°C	5°C
	0,5x 10 ⁻³	1x10 ⁻³	1,5x 10 ⁻³

Fonte: Própria (2022)

A perda de carga ou de pressão está sendo calculada em metros de coluna de água (mca) conforme a Eq. (1), de Darcy-Weisbach, para 1 Km de tubulação (1000 metros). Essa tubulação possui o mesmo diâmetro em toda a sua extensão.

$$\Delta P_L = f \frac{L}{D} \frac{\rho V_{med}^2}{2} \quad (1)$$

A proposta principal das análises é o estudo do regime turbulento da água com a variação de um parâmetro por vez, mantendo os demais com valor base, mas, no decorrer do trabalho, essa análise foi expandida para a verificação da sensibilidade à perda de carga usando o valor mínimo para todos os parâmetros e, por fim, considerando o valor máximo para todos os parâmetros.

A varredura dos parâmetros ocorrerá entre 80% e 120% de um valor de referência ou valor base, conforme discriminado abaixo, onde, somente um valor de referência está sendo abordado, sendo o valor médio de cada parâmetro.

- Diâmetro interno base é de 272 milímetros, mas também será observado o comportamento para um valor mínimo de 54,6 mm e um valor máximo de 489,4 mm, que são valores correspondentes para diâmetros nominais comerciais entre 50 e 500 milímetros, respectivamente entre 2” e 20”;

- A velocidade, com valor de 1,5 m/s; sendo o piso de 0,6 m/s e um valor teto de 2,4 m/s que são os valores mínimo e máximo indicados pela NBR 12218:1994;

- A rugosidade de referência será de 0,15 milímetros, que é a rugosidade do ferro galvanizado, onde a menor rugosidade calculada é de 0,0015 mm (do PVC) e a maior de 2,0 mm (do aço enferrujado);

- A viscosidade absoluta da água à 20°C é de 1 . 10⁻³ Pa.s, sendo o valor de referência a ser utilizado. O menor valor foi de 0,5 . 10⁻³ Pa.s (água à ~60°C) e o maior de 1,5 . 10⁻³ Pa.s (água à ~5°C).

- O fator de atrito “f” está sendo calculado de forma direta pela equação de Swamee-Jain, conforme Fig. 2.

Os resultados foram analisados e discutidos com o suporte de gráficos e tabelas com os dados gerados pelo algoritmo gerado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao executar o algoritmo criado foram obtidas as informações gráficas mostradas e discutidas a seguir.

O gráfico da Fig. 4, apresenta o comportamento, num escoamento turbulento, da perda de pressão na tubulação entre 80% e 120% dos valores nominais médios, tanto de diâmetro, quanto de velocidade, rugosidade absoluta e viscosidade dinâmica, sendo, respectivamente: 272 mm; 1,5 m/s; 0,15 mm e 0,001 Pa.s.

Desde já, em virtude da sensibilidade ser a relação entre a variação da grandeza em “y” e a variação da mesma em “x” é possível observar os parâmetros em ordem decrescente de sensibilidade: 1) diâmetro; 2) velocidade; 3) rugosidade absoluta e 4) viscosidade dinâmica. No entanto, estes valores, em maior ou menor grau, podem ser alterados a depender de valores extremos destas mesmas grandezas a serem inseridos, o que será abordado em seguida.

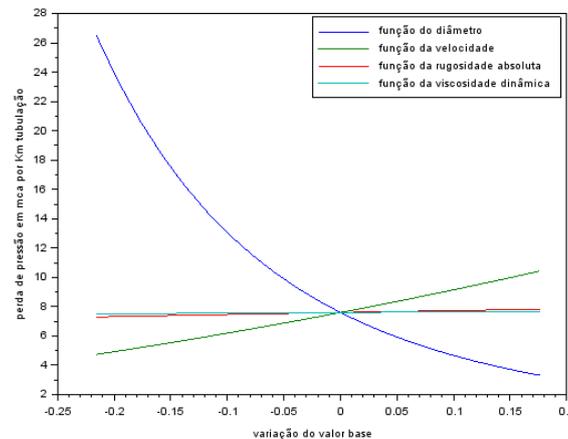


Figura 4. Variação do valor base de 80% a 120% - escoamento turbulento. (Própria, 2022)

A perda de carga apresentada na Fig. 4, bem como o seu comportamento, é específico para o entorno dos valores médios dos parâmetros. O resultado da perda de carga para esta situação é de 7,7 metros de coluna de água (mca), representada ponto de encontro das curvas dos parâmetros (Beta). É esperado que este valor seja majorado para maiores velocidades, rugosidades e viscosidades e atenuado para maiores diâmetros. As sensibilidades a estas variações, em diferentes situações, é que serão exploradas na sequência.

Em relação aos resultados obtidos através do algoritmo apresentado para valores médios, oriundos do comportamento da Fig. 4, o valor da inclinação da reta, adimensionalizada entorno dos valores de referência, representa as sensibilidades citadas abaixo, mantendo as demais condições de referência inalteradas:

- Para a velocidade encontrou-se o valor de +196% e este valor significa que para um aumento de 1% na velocidade haverá um aumento de 1,96% na perda de pressão, mantidas as demais condições de referência inalteradas;
- Analisando o diâmetro encontrou-se o valor de -519% e este valor significa que para um aumento de 1% no diâmetro haverá uma diminuição de 5,19% na perda de pressão;
- Em relação à rugosidade absoluta, foi obtido o valor de +17,5%, ou seja, para 1% de aumento na rugosidade absoluta, a perda de carga terá um aumento de 0,175%;
- Para a viscosidade dinâmica foi gerado o valor de +5,38%, o que traduz um aumento de 0,0538% na perda de carga a cada 1% de aumento da viscosidade dinâmica.

Com a utilização de valores médios para cada um dos parâmetros utilizados foi possível obter o gráfico em barra dos percentuais de sensibilidade, Fig. 5. Os valores, em módulo, gerados pelo algoritmo foram transcritos para a Tab. 2.

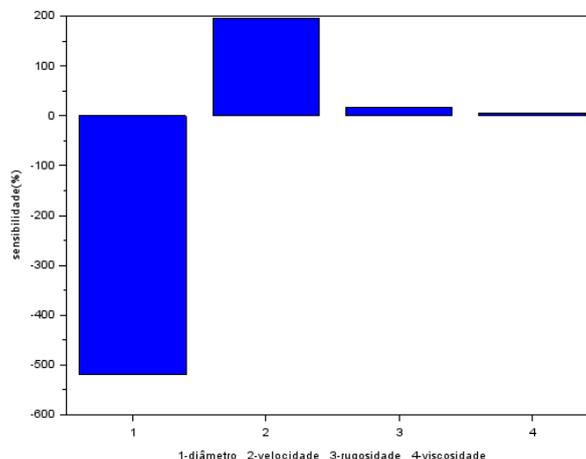


Figura 5. Gráfico sensibilidade em relação aos valores médios. (Própria, 2022)

Tabela 2- Valor base dos parâmetros.

Parâmetro	Valor Base (Médio)	Sensibilidade
Diâmetro Interno (mm)	Dmed	519%
	272	
Velocidade (m/s)	Vmed	196%
	1,5	
Rugosidade Absoluta (mm)	Ferro Galvanizado	17,5%
	0,15	
Viscosidade Dinâmica (Pa.s)	20°C	5,38%
	$1 \cdot 10^{-3}$	

Fonte: Própria (2022)

A seguir consta o comportamento da sensibilidade da perda de carga quando se altera os parâmetros, sendo a alteração do valor de um e a manutenção dos demais com o valor base, conforme Fig. 6 e Tab. 3.

Tabela 3 – Variação da sensibilidade com a alteração de um parâmetro por vez.

Parâmetro		Sensibilidade								Valor da perda de carga (mca)
		Diâmetro		Velocidade		Rugosidade		Viscosidade		
		Valor da sensibilidade	Comparativo com valor base	Valor da sensibilidade	Comparativo com valor base	Valor da sensibilidade	Comparativo com valor base	Valor da sensibilidade	Comparativo com valor base	
Diâmetro	Diâmetro Pequeno	524%	101%	196%	100%	22,3%	127%	5,84%	108,5%	57,6
	Diâmetro Grande	518%	100,2%	197%	100,5%	16,2%	93%	5,27%	98%	3,8
Velocidade	Velocidade Baixa	511%	98%	192%	98%	13,6%	78%	9,6%	178%	1,3
	Velocidade Alta	522%	101%	198%	101%	19,1%	109%	3,82%	71%	19,3
Rugosidade	Rugosidade Baixa	489%	94%	184%	94%	0,6%	3,4%	17,9%	333%	5,8
	Rugosidade Alta	538%	104%	201%	102,5%	31,7%	181%	0,7%	13%	14,5
Viscosidade	Viscosidade Baixa	523%	101%	199%	101,5%	19,6%	112%	3,22%	60%	7,5
	Viscosidade Alta	516%	99%	195%	99,5%	15,9%	91%	7,07%	131%	7,9

Fonte: Própria (2022)

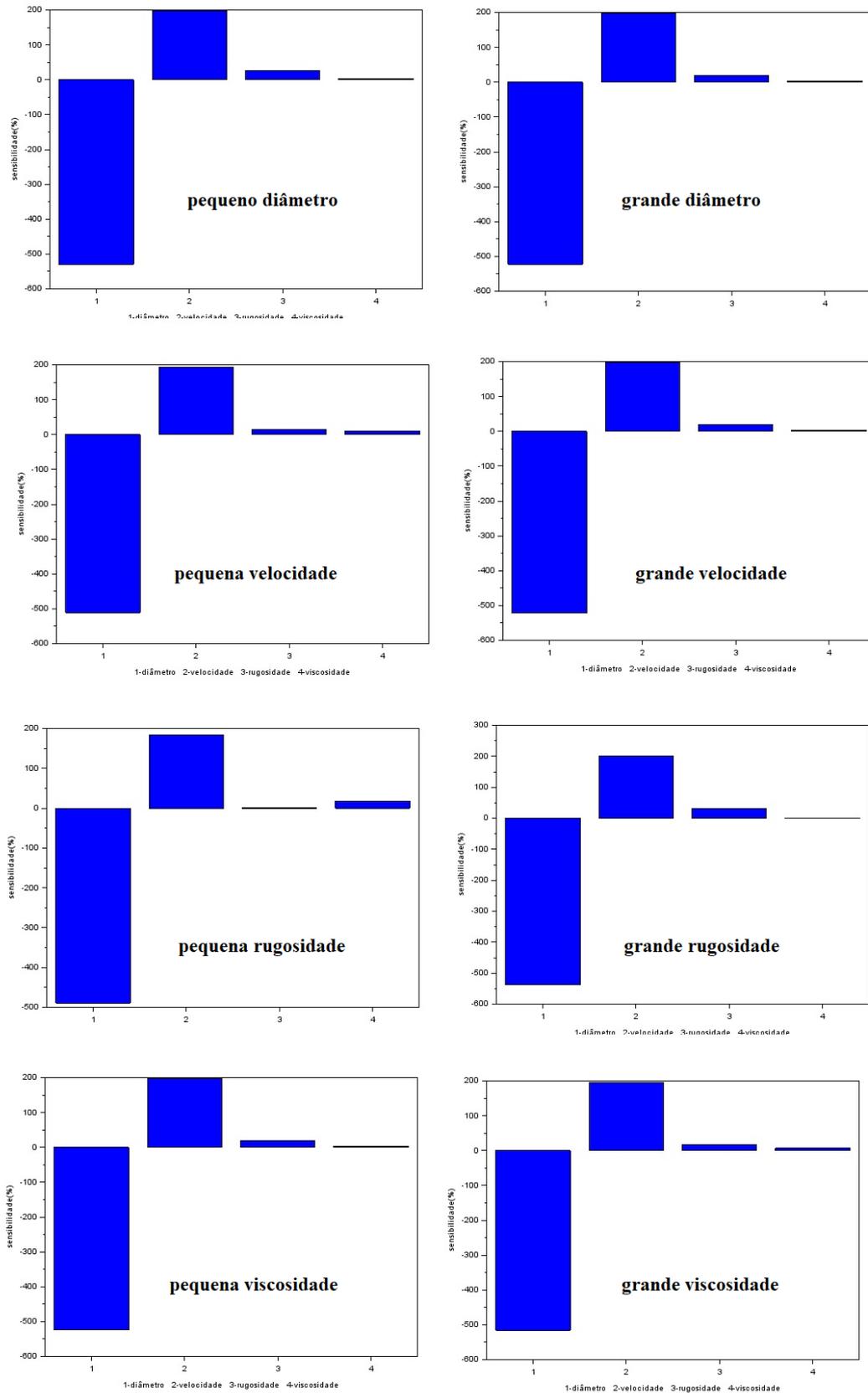


Figura 6. Demonstração gráfica do comportamento da sensibilidade com a variação de um parâmetro por vez. (Própria, 2022)

Ainda que a metodologia do trabalho consista em variar um parâmetro por vez, mantendo os demais com o valor base, no desenvolvimento dos cálculos surgiu o interesse em saber o comportamento da sensibilidade e o valor da perda de carga ao utilizar os valores máximo e mínimos de todos os parâmetros. A fim de esclarecer o comportamento da sensibilidade e da perda de carga com essa variação, foram gerados os dados da Tab. 4 e das Fig. 7 e 8.

Tabela 4 – Valores mínimos e máximos dos parâmetros.

Valor considerado para todos os parâmetros	Sensibilidade								Perda de Carga (mca)
	Diâmetro		Velocidade		Rugosidade		Viscosidade		
	Valor da sensibilidade	Comparativo com valor base	Valor da sensibilidade	Comparativo com valor base	Valor da sensibilidade	Comparativo com valor base	Valor da sensibilidade	Comparativo com valor base	
Mínimo	485%	93,4%	180%	92%	0,66%	4%	21,5%	399%	6,6
Médio	519%	100%	196%	100%	17,5%	100%	5,38%	100%	7,7
Máximo	535%	103%	201%	102%	28,9%	165%	0,66%	12%	17,3

Fonte: Própria (2022)

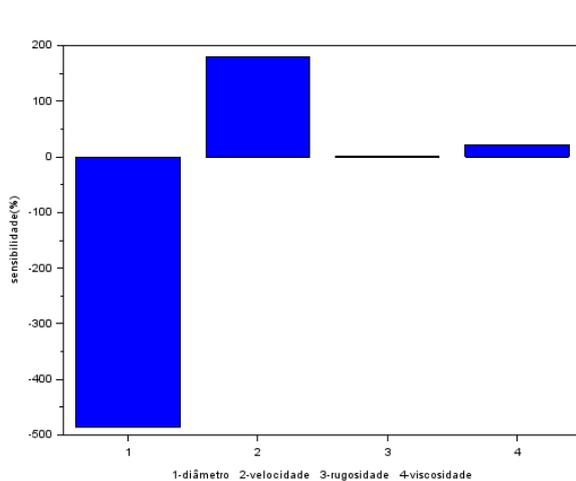


Figura 7. Gráfico da sensibilidade para todos os parâmetros com valor mínimo. (Própria, 2022)

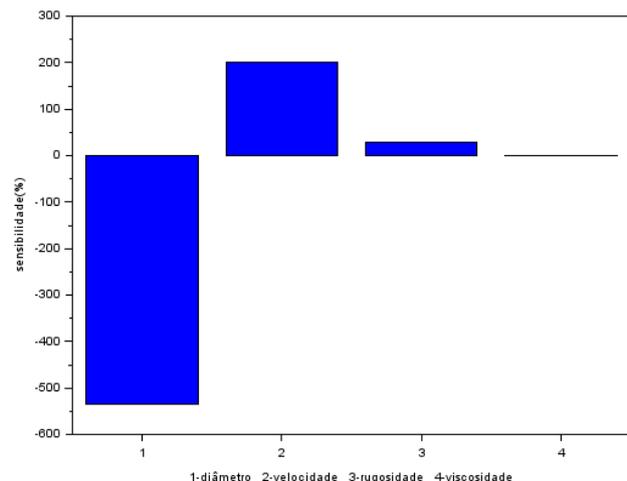


Figura 8. Gráfico da sensibilidade para todos os parâmetros com valor máximo. (Própria, 2022)

4. CONCLUSÕES

Em relação ao comportamento da sensibilidade à perda de pressão utilizando todos os parâmetros com valor mínimo, a viscosidade encontra a sua maior sensibilidade (21,5%) e torna-se mais sensível que a rugosidade, chegando a um aumento de 299% de sensibilidade à viscosidade em relação ao uso do valor médio para todos os parâmetros. Essa mudança se justifica pelo fato do escoamento ser regido pela inércia e pela viscosidade, tendo a sensibilidade a última aumentada ao se diminuir a força de inércia, utilizando valor baixo para a velocidade, como afirma Çengel (2012).

Alterando todos os parâmetros para os valores máximos admitidos nessa pesquisa, a sensibilidade à rugosidade foi onde se identificou o aumento mais expressivo (65%), comparado com o uso dos valores base, o que é um resultado plausível tendo em vista que o valor utilizado para a rugosidade foi majorado em 1200% (de 0,15 mm para 2 mm). Ainda nessas condições, a maior redução da sensibilidade à perda de carga em relação à viscosidade (88%), o que demonstra o efeito do aumento da inércia (majoração do valor da velocidade), sobre as forças viscosas, conforme já explanado no parágrafo acima. Outra condição em que a sensibilidade da perda de pressão à viscosidade apresenta o mesmo valor da

situação anterior, 0,7%, é vista com o maior valor de rugosidade (2,0 mm). Esse diagnóstico é confirmado pelo fato do fator de atrito, no escoamento laminar, ser uma função importante da rugosidade da superfície, segundo Çengel (2012).

Ao se manter o valor médio de todos os parâmetros e o regime turbulento, foi identificada uma ordem decrescente dos parâmetros estudados, em relação à sensibilidade da perda de carga que geram: 1) diâmetro; 2) velocidade; 3) rugosidade absoluta e 4) viscosidade dinâmica. Tem apenas 2 situações em que a viscosidade dinâmica apresenta sensibilidade mais significativa do que a rugosidade, que são quando é atribuído o valor mínimo para todos os parâmetros e ao considerar o valor pequeno da rugosidade (0,0015 mm) mantidos os demais parâmetros com valor médio.

Retomando o comportamento da viscosidade, esta não interfere significativamente na perda de carga para grandes diâmetros, motivo pelo qual em diâmetros maiores são permitidas grandes velocidades. A camada limite, com maior interferência próximo às paredes da tubulação justifica este comportamento, ao passo que quando mais distante da subcamada viscosa, mais desprezível será o efeito da viscosidade (Çengel, 2012). Em tubulações com maior rugosidade este efeito é ainda menor, com a sensibilidade à viscosidade reduzida a apenas 13%, comparando com a sensibilidade gerada ao atribuir o valor médio à viscosidade.

Considerando a rugosidade, sua maior sensibilidade (31,7%) ocorre com a maior rugosidade (2,0 mm) e a menor sensibilidade (0,6%) aparece com o menor valor de rugosidade (0,0015 mm). Ao aumentar a rugosidade, esta se torna 177,6% mais sensível, enquanto a viscosidade tem uma redução de 320%.

Após a análise dos resultados, a rugosidade demonstrou ser um parâmetro extremamente importante na sensibilidade à perda de carga, uma vez que sua variação se relaciona às sensibilidades mínimas e máximas de todos os parâmetros considerados, conforme abaixo:

- o valor alto de rugosidade (2 mm) resulta na menor sensibilidade da viscosidade (0,7%), enquanto o valor baixo de rugosidade (0,0015 mm) gera a menor sensibilidade à perda de pressão dos parâmetros velocidade (184%), rugosidade (0,6%) e diâmetro (489%);
- a maior sensibilidade ao diâmetro (538%), à velocidade (201%) e à rugosidade (31,7%), ocorreu quando se utilizou o valor alto para rugosidade (2 mm). Já a maior sensibilidade à viscosidade, de 17,9%, foi identificada com o uso da rugosidade baixa (0,0015 mm).

Essa conclusão a respeito da rugosidade confirma a afirmação de Çengel (2012) de que qualquer irregularidade ou rugosidade na superfície perturba a subcamada viscosa e afeta o escoamento, uma vez que as características dessa camada, apesar de, em geral, ser muito menor do que 1% do diâmetro do tubo, definem o escoamento no restante do tubo.

O aumento do diâmetro torna tanto a rugosidade quanto a viscosidade menos sensível devido a uma grande região fora da camada limite. Esse resultado confirma a afirmação de Fox (1998), onde este alega que apenas na delgada região adjacente a uma fronteira sólida (camada limite) o efeito da viscosidade é importante. Já a diminuição da sensibilidade à rugosidade se justifica pelo fato de quanto mais distante das paredes do tubo, menor a tensão de cisalhamento e consequentemente menor perda de carga.

Em relação à velocidade destaca-se que em todos os testes realizados nesta pesquisa, este parâmetro teve variação mínima de sensibilidade, de 196% a 201%, o que se deve ao fato de, em todo o comprimento da tubulação, não haver variação do diâmetro.

Por fim, conclui-se que a análise realizada nesse trabalho se demonstrou extremamente significativa, uma vez que os resultados estão coerentes com a teoria abordada e a interferência de cada parâmetro está explicitada de forma direta, facilitando e subsidiando a tomada de decisão do projetista que deve estar sempre atento à perda de carga visto que esta afeta tanto o custo total do projeto quanto o balanço hidráulico do sistema.

6. REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12218/1994 - Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público*. ABNT, 1994.
- ARAÚJO, Renata S. A., BEZERRA, Alessandro A. Método para diâmetro e fator de atrito: rede de distribuição. DOI 10.4322/dae.2016.005.
- CONNOR, N. O que é perda de cabeça – perda de pressão – definição. [S. l.], 2 fev. 2020. Disponível em: <https://www.thermal-engineering.org/pt-br/o-que-e-perda-de-cabeca-perda-de-pressao-definicao/>. Acesso em: 04 nov. 2022
- ÇENGEL, Yunus A., CIMBALA, John M. *Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações*. Traduzido em São Paulo: 2012.
- FOX, Robert W. *Introdução à mecânica dos fluidos*. Rio de Janeiro: LTC, 1998. 504 p.