

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

AVALIAÇÃO DO EFEITO DA MALHA E DO MODELO DE TURBULÊNCIA NA PREDIÇÃO DE PERDA DE CARGA EM UM CANAL DE SEÇÃO QUADRADA UTILIZANDO SIMULAÇÕES CFD

*Lucas Fernandes de Sousa Pessoa¹; Isabela Gomes Custódio²; André Vinicius dos Reis Pereira³
Philip Von Pritzelwitz⁴; Mariana Lopes Pinto⁵; Vinícius Carvalho Teles⁶; Ana Letícia Pilz de
Castro⁷ & Paulo Henrique Vieira Magalhães⁸*

Abstract: This study aimed to assess the effects of mesh refinement and turbulence model selection on the prediction of pressure loss in a square-section channel by comparing CFD results with theoretical values. Three meshes (Coarse, Intermediate, and Refined) were generated and three turbulence models ($k-\epsilon$, $k-\omega$ SST, and RSM) were applied across nine simulations under identical boundary conditions and water properties at 20 °C. The percentage deviations revealed that the Coarse mesh yielded the lowest error—counterintuitively—due to a better balance between discretization error and numerical conditioning, whereas the Refined mesh—being unstructured and exhibiting high skewness, aspect ratio, and low orthogonality—amplified inaccuracies. Among the models, $k-\omega$ SST performed best by accurately capturing near-wall gradients, resulting in the smallest deviations for all meshes. It is concluded that, beyond refinement level, element geometric quality and near-wall modeling capability critically influence accuracy; therefore, structured or rigorously controlled meshes and the $k-\omega$ SST model are recommended for similar flows.

Resumo: Este estudo objetivou avaliar o efeito do refinamento de malha e da escolha do modelo de turbulência na predição de perda de carga em um canal de seção quadrada, confrontando resultados CFD com valores teóricos. Para isso, gerou-se três malhas (*Coarse*, *Intermediate* e *Refined*) e aplicou-se três modelos de turbulência ($k-\epsilon$, $k-\omega$ SST e RSM) em nove simulações, mantendo as mesmas condições de contorno e propriedades da água a 20 °C. Os desvios percentuais mostraram que a malha grosseira apresentou menor erro, contraintuitivamente, devido ao melhor balanço entre erro de discretização e condicionamento numérico, enquanto a malha refinada — não estruturada e com altos níveis de *skewness* e *aspect ratio* e baixa ortogonalidade — amplificou as imprecisões. Entre os modelos, o $k-\omega$ SST destacou-se por capturar com maior fidelidade os gradientes *near-wall*, resultando nos menores desvios em todas as malhas. Concluiu-se que, além do grau de refinamento, a qualidade geométrica dos elementos e a capacidade do modelo *near-wall* são determinantes para a acurácia, recomendando-se o uso de malhas estruturadas ou com controle rigoroso de qualidade e o modelo $k-\omega$ SST em escoamentos similares.

Palavras-Chave – Perda de carga, Simulação CFD, modelo de turbulência

1) Discente, Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG. lucas.pessoa@aluno.ufop.edu.br

2) Engenheira Urbana, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG. isabela.custodio@aluno.ufop.edu.br

3) Técnico de laboratório/Área, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto – MG. andre.pereira@ufop.edu.br

4) Pesquisador, Instituto Tecnológico Vale (ITV), Ouro Preto – MG. philip.pritzelwitz@itv.org

5) Pesquisadora, Instituto Tecnológico Vale (ITV), Ouro Preto – MG. mariana.pinto@itv.org

6) Faculdade de Ciéncia e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás, Aparecida de Goiânia – GO. vinicius_teles@ufg.br

7) Docente, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG. anacastro@ufop.edu.br

8) Docente, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG. paulo.magalhaes@ufop.edu.br

INTRODUÇÃO

A perda de carga em escoamentos internos consiste na redução de pressão causada pelo atrito e turbulência no fluxo de fluidos (WHITE, 2016). Avaliar esse fenômeno é crucial para o funcionamento eficiente de sistemas como dutos, trocadores de calor, sistemas de ventilação e demais aplicações industriais. Sua estimativa é feita com modelos teóricos, como a equação de Darcy-Weisbach. O fator de atrito é obtido por fórmulas empíricas, como a equação de Colebrook-White (MUNSON et al., 2013).

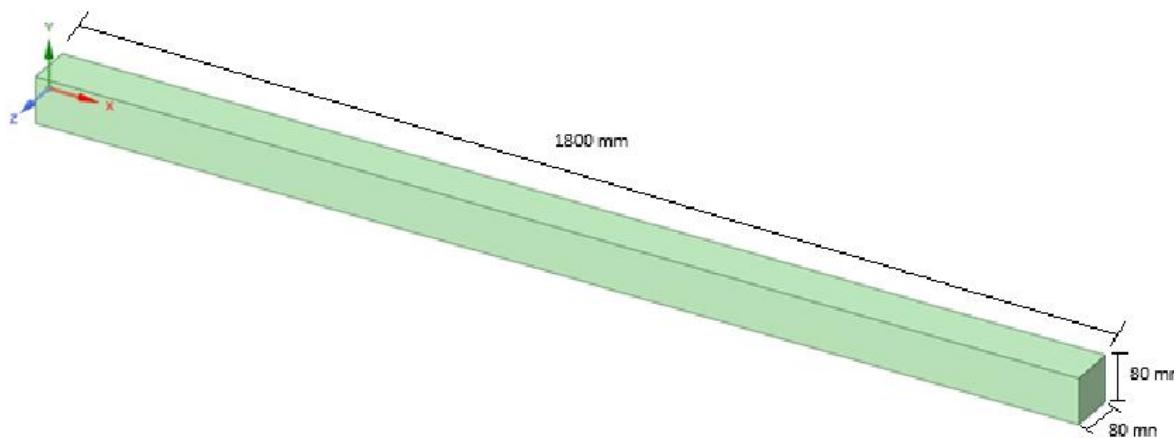
Com a evolução das ferramentas computacionais, a simulação numérica, por meio da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), tornou-se uma ferramenta essencial para estudar escoamentos internos. No entanto, os resultados numéricos estão sujeitos à qualidade da malha computacional e à escolha do modelo de turbulência, exigindo avaliação cuidadosa desses fatores (FERZIGER; PERIĆ, 2020). Por isso, é necessária a verificação da confiabilidade dos resultados das simulações numéricas que pode ser feita comparando-os com os das soluções teóricas (ROACHE, 2009).

Este estudo visa analisar a influência da malha gerada e do modelo de turbulência nos resultados de perda de carga estimados por métodos numéricos, utilizando o software ANSYS 2025 R1, em comparação com os valores teóricos em um canal de seção quadrada.

MÉTODOS

O objeto deste estudo foi um modelo de duto com seção quadrada de 8 cm x 8 cm e 180 cm de comprimento, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Modelo de duto definido para estudo



A perda de carga teórica foi calculada no comprimento de 1m, adotando-se cinco vazões, sendo estas de 130, 160, 190, 220 e 250 L/min. Demais parâmetros adotados foram diâmetro hidráulico de 0,08m, rugosidade do duto de aço inox de 0,002mm, densidade da água de 998,2kg/m³ e viscosidade dinâmica da água de 1,003x10⁻³kg/m.s.

Inicialmente, converteu-se as vazões de L/min para m³/s e encontrou-se os valores das velocidades, conforme a Equação 1.

$$V = \frac{Q}{A} \quad (1)$$

Sendo,

V: velocidade [m/s]; Q: vazão [m³/s]; A: área da seção do duto [m²].

Em seguida, calculou-se o número de Reynolds (Equação 2) para definição do tipo de escoamento, conforme Çengel & Cimbala (2013), para os cinco valores de vazão adotados.

$$Re_D = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2)$$

Sendo,

Re: Número de Reynolds [adim]; ρ: massa específica da água [kg/m³]; V: velocidade da água [m/s]; D: diâmetro hidráulico do duto [m]; μ: viscosidade dinâmica da água [kg/m.s].

Posteriormente, calculou-se o fator de atrito usando a equação de Swamee-Jain, conforme a Equação 3, como estimativa inicial para resolver a equação de Colebrook-White (Equação 4).

$$f_0 = 0,25 \left[\log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^{-2} \quad (3)$$

Sendo,

f_0 : fator de atrito estimado [adim]; ε: rugosidade absoluta do duto [m]; D: diâmetro hidráulico do duto [m]; Re: Número de Reynolds [adim].

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f_0}} \right) \quad (4)$$

Sendo,

f: fator de atrito [adim]; ε: rugosidade absoluta do duto [m]; D: diâmetro hidráulico do duto [m]; Re: Número de Reynolds [adim].

Em seguida, calculou-se a perda de carga, conforme a Equação 5, utilizando a equação de Darcy-Weisbach, com o auxílio do software Excel.

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (5)$$

Sendo,

h_f : Perda de carga [m]; f: fator de atrito [adim]; L: comprimento do duto [m]; D: diâmetro hidráulico do duto [m]; V: velocidade média da água [m/s]; g: aceleração da gravidade [m/s^2].

A Tabela 1 apresenta os resultados dos cálculos teóricos das perdas de carga das vazões adotadas.

Tabela 1 – Resultado dos cálculos teóricos

Q [L/min]	Q [m³/s]	A [m²]	V [m/s]	Re	f₀	f	h₁ [mCA]	h₁ [mmCA]
130	0,00217	0,00640	0,3385	26953,72	0,02406	0,02416	0,00176	1,76
160	0,00267	0,00640	0,4167	33173,81	0,02290	0,02302	0,00255	2,55
190	0,00317	0,00640	0,4948	39393,90	0,02201	0,02214	0,00345	3,45
220	0,00367	0,00640	0,5729	45613,99	0,02129	0,02143	0,00448	4,48
250	0,00417	0,00640	0,6510	51834,08	0,02070	0,02083	0,00563	5,63

Apesar do interesse em calcular a perda de carga em 1 metro de comprimento, o domínio da simulação CFD foi modelado com 1,8m para que a perda de carga fosse calculada na região hidrodinamicamente completamente resolvida. Assim, modelou-se o comprimento da região de entrada como 10 vezes o valor do diâmetro hidráulico.

A Figura 2 ilustra o fluxo de trabalho paramétrico. A partir de uma única geometria, gerou-se três malhas com níveis de refinamento *Coarse*, *Intermediate* e *Refined*. Cada malha foi importada no software ANSYS Fluent e submetida a três configurações de modelo de turbulência, sendo estes o *k-epsilon realizable*, *k-omega SST* com *Corner Flow Correction* e *Reynolds Stress Model Stress-Omega (RSM)*, totalizando nove simulações distintas. Por fim, todos os resultados foram reunidos em um único conjunto para comparação e análise do impacto do refinamento de malha e da escolha do modelo sobre a precisão do cálculo.

Figura 2 – Fluxo de trabalho paramétrico.



As malhas grosseira e intermediária foram geradas com um tamanho de elemento de 8mm e 4mm, respectivamente (Figuras 3 a 6). A malha refinada manteve o tamanho de elemento de 4mm, porém foi aplicado o *inflation* nas paredes do domínio, o que representa 10 camadas de elementos a uma taxa de crescimento de 2%, onde o elemento mais próximo da parede foi definido com espessura de 2mm (Figuras 7 e 8).

Figura 3 – Malha grosseira

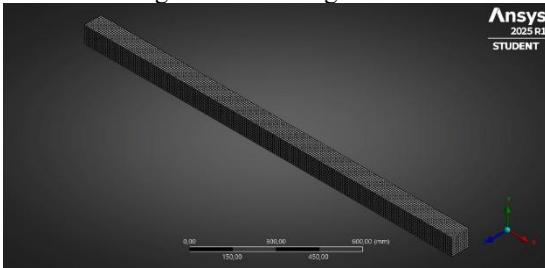


Figura 4 – Vista frontal da malha grosseira

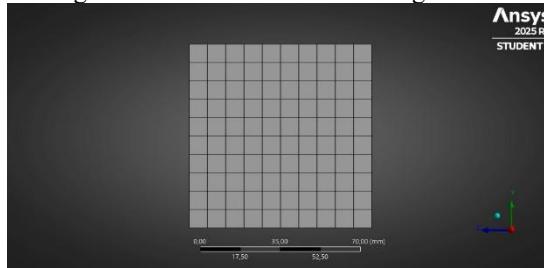


Figura 5 – Malha intermediária

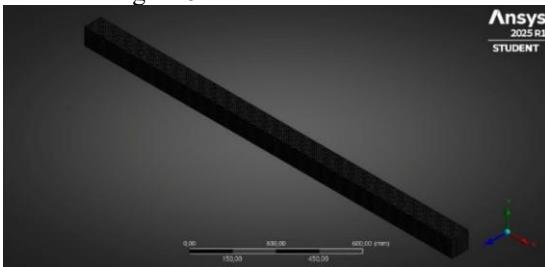


Figura 6 – Vista frontal da malha intermediária

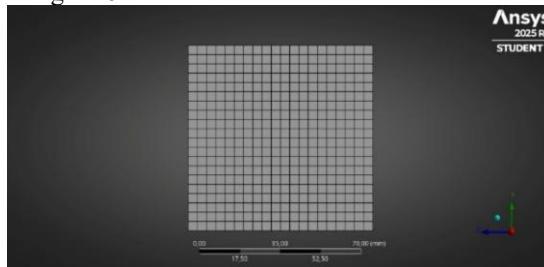


Figura 7 – Malha refinada

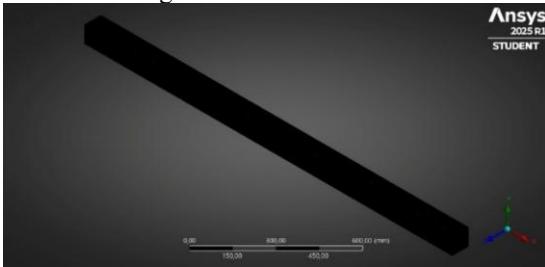
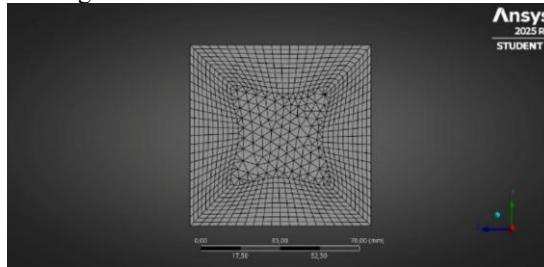


Figura 8 – Vista frontal da malha refinada



Os cálculos foram realizados em regime permanente, isotérmico e utilizando fluido incompressível e propriedades constantes da água à temperatura de 20°C. A pressão de operação utilizada foi de 101.325 Pa e aceleração da gravidade de -9,81 m/s².

O *inlet* foi configurado como *velocity-inlet* e parametrizado como valor de entrada, com as velocidades referentes a cada vazão volumétrica usada no cálculo teórico. No *outlet* se manteve a condição padrão de *pressure-outlet* de pressão manométrica zerada. A *wall* foi configurada com a condição de não-escorregamento e rugosidade de 0,002mm. O critério de convergência adotado foi de 10⁻⁵ resíduos das equações da continuidade, das três componentes da equação de Navier-Stokes e dos modelos de turbulência.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 4, apresenta-se a quantidade de elementos e nós de cada malha, assim como os critérios de qualidade a serem avaliados.

Tabela 4 – Parâmetros de malha

<i>Mesh</i>	<i>Elements</i>	<i>Nodes</i>	<i>Min Orthogonality</i>	<i>Max Skewness</i>	<i>Max Aspect Ratio</i>
<i>Coarse</i>	22500	27346	1	0	1
<i>Intermediate</i>	180000	198891	1	0	1
<i>Refined</i>	1038142	472004	0,1	0,9	21,38

Quanto aos critérios de qualidade, as malhas grosseira e intermediária são totalmente estruturadas e sem distorção, o que indica que todos os elementos são cubos perfeitos. A malha refinada possui praticamente a quantidade máxima de elementos permitida pela versão estudantil do software, e por isso não foi mais refinada. Por não ser completamente estruturada, a malha possui elementos que variam de qualidade. Na Tabela 5 são apresentadas as métricas dos critérios de qualidade da malha refinada.

Tabela 5 – Critérios de qualidade da malha refinada

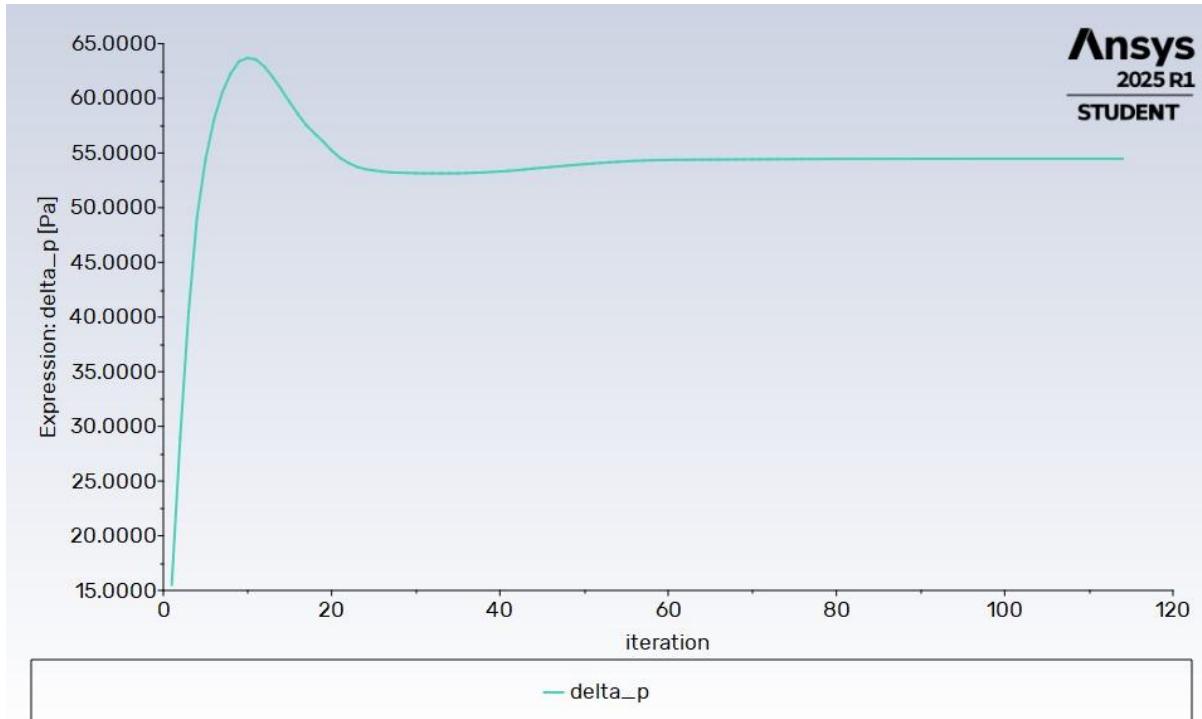
<i>Mesh</i>	Mínima	Máxima	Média	Desvio Padrão
<i>Orthogonality</i>	0,1	0,99527	0,61509	0,17131
<i>Skewness</i>	0	0,9	0,38466	0,17156
<i>Aspect Ratio</i>	1,1796	21,38	2,2869	0,57568

Na simulação CFD, atingiu-se o critério de convergência dos resíduos e observou-se o fechamento do balanço de massa (Figura 9) e a estabilização do parâmetro de interesse, que foi a perda de pressão (Figura 10) para garantir que a simulação gerasse resultados fisicamente confiáveis.

Figura 9 – Fechamento do balanço de massa

Mass Flow Rate	[kg/s]
inlet	4.1591669
outlet	-4.1591668
Net	8.8041656e-08

Figura 10 – Estabilização da perda de carga



O mesmo processo se repetiu para as 5 vazões nas 3 malhas geradas atreladas aos 3 modelos de turbulência, totalizando 45 simulações realizadas de forma parametrizada. A Tabela 2 apresenta os resultados de cada uma das simulações para as vazões adotadas.

Tabela 2 – Resultado das simulações CFD da perda de carga [mmCA]

Modelo de turbulência k- ϵ

Q (L/min)	<i>Coarse</i>	<i>Intermediate</i>	<i>Refined</i>
130	1,72	1,62	1,58
160	2,49	2,34	2,29
190	3,40	3,19	3,12
220	4,42	4,16	4,06
250	5,56	5,24	5,11

Modelo de turbulência k- ω SST

Q (L/min)	<i>Coarse</i>	<i>Intermediate</i>	<i>Refined</i>
130	1,79	1,73	1,69
160	2,58	2,50	2,41
190	3,49	3,39	3,27
220	4,53	4,41	4,26
250	5,68	5,54	5,35

Modelo de turbulência RSM

<i>Q</i> (L/min)	<i>Coarse</i>	<i>Intermediate</i>	<i>Refined</i>
130	1,74	1,88	1,59
160	2,50	2,71	2,24
190	3,34	3,67	3,00
220	4,31	4,76	3,87
250	5,38	5,97	4,84

A fim de comparar os resultados obtidos pelo método numérico e pelo teórico, calculou-se o erro percentual de cada um dos resultados, conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Diferença percentual do CFD com o teórico

Modelo de turbulência k-ε

<i>Q</i> (L/min)	<i>Coarse</i>	<i>Intermediate</i>	<i>Refined</i>
130	2,49%	8,36%	10,39%
160	2,07%	7,92%	10,08%
190	1,67%	7,52%	9,68%
220	1,36%	7,19%	9,33%
250	1,11%	6,90%	9,18%

Modelo de turbulência k-ω SST

<i>Q</i> (L/min)	<i>Coarse</i>	<i>Intermediate</i>	<i>Refined</i>
130	1,27%	2,09%	4,39%
160	1,16%	1,92%	5,19%
190	1,08%	1,77%	5,17%
220	1,02%	1,66%	4,94%
250	0,98%	1,56%	4,90%

Modelo de turbulência RSM

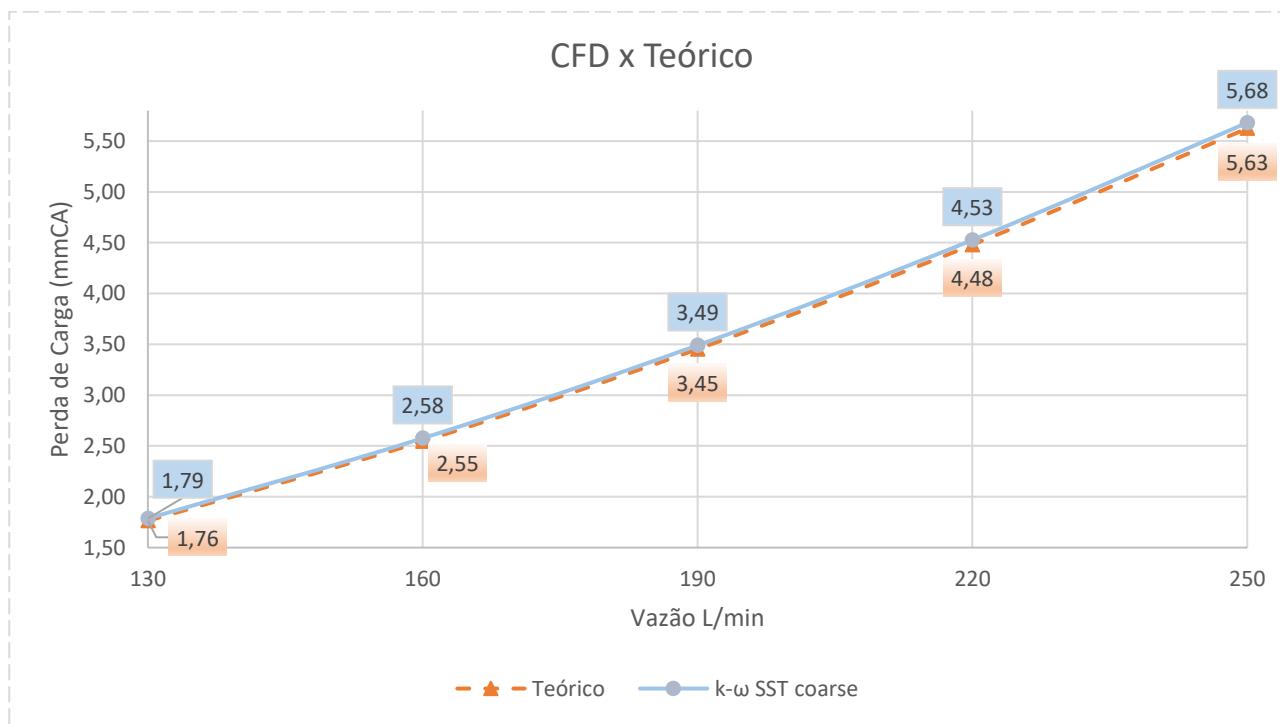
<i>Q</i> (L/min)	<i>Coarse</i>	<i>Intermediate</i>	<i>Refined</i>
130	1,45%	6,48%	9,70%
160	2,02%	6,41%	12,23%
190	3,20%	6,35%	13,26%
220	3,86%	6,29%	13,67%
250	4,43%	6,21%	13,95%

Observou-se, na malha mais refinada, uma intensificação do erro, pois o *grid* não foi estruturado e apresenta desvios significativos nos principais parâmetros de qualidade. O *skewness* elevado indica células muito distorcidas, que geram erros de interpolação; o *aspect ratio* alto promove anisotropia numérica e piora a resolução do gradiente de velocidades; e a ortogonalidade deficiente faz com que as normais das faces não fiquem perpendiculares aos vetores de conexão entre centros de célula, o que aumenta os erros de discretização dos termos convectivos e difusivos. Esses três fatores combinados tornam o sistema linear pouco condicionado e amplificam instabilidades locais em malhas não-estruturadas, levando a discrepâncias percentuais maiores em comparação tanto às malhas grosseiras quanto às intermediárias.

Observou-se que os resultados obtidos com a malha grosseira – caracterizada por um número reduzido de elementos – apresentaram maior acurácia em comparação às malhas intermediária e refinada. Esse comportamento contrapõe a expectativa de que o aumento no número de elementos conduza sempre a maior precisão, podendo, ao contrário, refletir o predomínio do erro de arredondamento em malhas refinadas, conforme discutido por Roache (2009). No entanto, para afirmar com segurança que esse efeito ocorreu no presente estudo, seria necessário aprofundar a análise de convergência de malha e quantificar separadamente os erros de truncamento e de arredondamento, por meio de estudos de sensibilidade e de *Grid Convergence Index* (GCI), conforme orientações de Roache (2009).

O modelo $k-\omega$ SST obteve o melhor desempenho, porque sua formulação híbrida alia a acurácia do $k-\omega$ junto à parede — onde resolve com maior fidelidade o desenvolvimento da camada limite sem necessidade de *wall-functions* equivocadas — à robustez do $k-\epsilon$ na região central do escoamento. Essa combinação permite capturar gradientes de velocidade e pressão muito acentuados próximos à parede, além de lidar melhor com possíveis separações e efeitos de pressão adversa. Como o $k-\omega$ SST não depende fortemente de funções empíricas para o tratamento *near-wall*, mantém-se estável mesmo em malhas menos estruturadas ou com refinamento variável, reduzindo erros locais de discretização e garantindo resultados mais próximos dos valores teóricos, conforme apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Comparação do resultado da simulação com o cálculo teórico



CONCLUSÃO

O presente estudo avaliou a influência do refinamento de malha e da escolha do modelo de turbulência na predição de perda de carga em um canal de seção quadrada, comparando os resultados CFD com os valores teóricos. Contrariando a premissa de que um maior refinamento sempre aumenta a precisão dos resultados, observou-se que a malha grosseira apresentou os menores desvios percentuais, enquanto a malha refinada — não estruturada e com altos níveis de *skewness* e *aspect*

ratio e baixa ortogonalidade — amplificou os erros numéricos. Entre os modelos testados, o k- ω SST destacou-se como o mais aderente aos valores de referência, em todos os níveis de malha. Já os modelos k- ε e RSM mostraram desempenho inferior, sobretudo em malhas de baixa qualidade. Esses resultados sugerem que, além do refinamento, a qualidade geométrica dos elementos e a capacidade *near-wall* do modelo de turbulência são fatores críticos para a acurácia. Recomenda-se, portanto, priorizar malhas estruturadas ou com controle rigoroso de qualidade e adotar o k- ω SST em regimes similares, bem como explorar técnicas de geração de camadas prismáticas para otimizar custo-benefício entre precisão e custo computacional.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à VALE, ao Instituto Tecnológico Vale (ITV), ao Laboratório de Análises Experimentais e Simulações de Sistemas (LAESS), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental (PROAMB) e ao Laboratório de Hidráulica da UFOP.

REFERÊNCIAS

- © ANSYS, Inc. (2025). “Ansys Fluent Theory Guide”
- CENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. (2013). “*Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações.*” 3. ed. Rio de Janeiro: LTC.
- FERZIGER, J. H.; PERIĆ, M. (2020). “*Computational methods for fluid dynamics.*” 4. ed. Berlin: Springer.
- MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H. (2013). “*Fundamentals of fluid mechanics.*” 7. ed. Hoboken: Wiley.
- ROACHE, P. J. (2009). “*Fundamentals of Verification and Validation.*” Albuquerque: Hermosa.
- WHITE, F. M. (2016). “*Mecânica dos fluidos.*” 8. ed. Porto Alegre: AMGH.