

Análise de independência de malha para o escoamento laminar completamente desenvolvido em um tubo

Gabriel Rege Faria¹,Jonatas Emmanuel Borges²

¹*Universidade Federal de Mato Grosso, Barra do Garças/MT, Brasil
(fariarg20@gmail.com)*

²*Universidade Federal de Mato Grosso, Barra do Garças/MT, Brasil*

Resumo: Este trabalho apresenta a validação numérica do escoamento laminar em duto cilíndrico ($Re = 100$) no ANSYS Fluent, comparando os resultados com a solução analítica. Foram testados três níveis de malha para o estudo de independência espacial. O perfil parabólico de velocidades foi reproduzido com sucesso, e a malha fina obteve erro relativo de apenas 0,48% da velocidade máxima, comprovando a convergência e a precisão física do modelo.

Palavras-chave: Fluidodinâmica Computacional; Escoamento Laminar; Independência de Malha; ANSYS Fluent.

INTRODUÇÃO

Os escoamentos internos em dutos fechados são essenciais para diversas áreas da engenharia, com aplicações que abrangem desde sistemas de distribuição hidráulica até complexas linhas de transporte de processos industriais. Tais escoamentos podem ocorrer em regime laminar ou turbulento, sendo essa classificação determinada pelo número de Reynolds (Re). Quando o fluido opera sob baixos valores ($Re < 2300$), o regime caracteriza-se como laminar, no qual o escoamento se desenvolve em lâminas ou camadas adjacentes sem mistura macroscópica, o que viabiliza sua resolução analítica em alguns casos. A formulação analítica decorre das equações de Navier-Stokes para o escoamento permanente e incompressível resultando em um perfil parabólico de velocidades e em um gradiente de pressão linear ao longo do comprimento do duto (Fox; Mc, 2018).

No estudo de escoamentos internos, esse perfil de velocidades e a perda de carga são duas variáveis fundamentais. Enquanto a queda de pressão representa a energia perdida pelo atrito do fluido com as paredes do tubo, a distribuição de velocidades mostra como o fluido se desloca ao longo da seção transversal. Compreender esses fatores é indispensável para projetar tubulações eficientes e reduzir o consumo de energia no transporte de fluidos (Al Amin, 2024).

Para analisar essas variáveis de forma detalhada, a Fluidodinâmica Computacional (CFD) tornou-se uma ferramenta indispensável na engenharia. A CFD permite determinar os campos de velocidade e as variações de pressão ao dividir o domínio do escoamento em um número finito de elementos, onde as equações que modelam o escoamento são resolvidas numericamente. Contudo, a precisão dos resultados depende diretamente do refinamento da malha adotada. Embora malhas mais finas aumentem a exatidão dos dados, elas também elevam o custo computacional e o tempo de processamento (Azwan, 2025). Portanto, realizar um estudo de independência de malha é um passo fundamental para garantir a confiabilidade dos resultados numéricos antes de aplicar o modelo em problemas mais complexos.

Diante disso, o objetivo deste trabalho é realizar a validação numérica do escoamento laminar em um tubo cilíndrico horizontal utilizando o software ANSYS Fluent. A metodologia baseia-se na análise comparativa de três níveis de refinamento de malha (grossa, média e fina) para avaliar o perfil de velocidades ao aumento na qualidade da malha. Os resultados numéricos serão comparados com a solução analítica, quantificando os erros relativos para verificar a convergência e a precisão do modelo computacional.

MATERIAL E MÉTODOS

O domínio computacional deste estudo foi concebido a partir da modelagem geométrica tridimensional de

um duto cilíndrico com diâmetro interno (D) de 0,1 m (10 cm) e comprimento total (L) de 1,5 m (150 cm) com o escoamento alinhado ao longo do eixo longitudinal Z . Essa geometria e a preparação do domínio de fluido foram desenvolvidas com as ferramentas nativas de CAD da plataforma ANSYS. Como fluido de trabalho, adotou-se água líquida em regime permanente, laminar e incompressível. A partir das propriedades físicas do fluido, a velocidade de entrada foi fixada em 0,001005 m/s, correspondendo a um número de Reynolds ($Re = 100$), o que assegura estritamente o escoamento na faixa laminar.

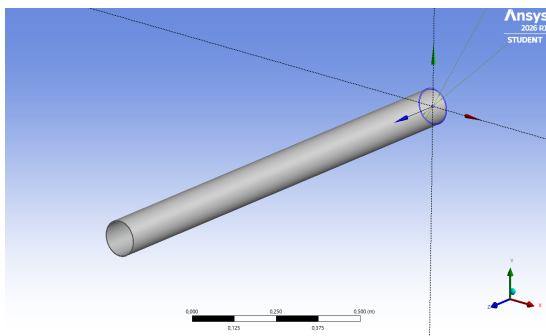


Figura 1. Geometria tridimensional do duto cilíndrico e eixos de referência feita no software ANSYS.

Para garantir que os resultados numéricos fossem extraídos na região de escoamento completamente desenvolvido, o comprimento físico do tubo foi dimensionado para exceder o comprimento de entrada laminar (L_e), calculado conforme o critério de Fox e McDonald (2018):

$$(L_e \approx 0,06 \cdot Re \cdot D) \quad (1)$$

Já na discretização espacial do domínio de fluido, utilizou-se o módulo ANSYS Meshing para gerar uma malha estruturada, dividindo o volume interno do duto em volumes de controle finitos. Para avaliar a influência da densidade de elementos na precisão dos resultados e garantir a independência da malha, foram desenvolvidos três níveis de refinamento: uma malha grossa, com 27.204 elementos; uma malha média, com 100.227 elementos; e uma malha fina, com 440.796 elementos. Assim, permitindo uma análise comparativa do comportamento do perfil de velocidades à medida que a densidade da malha aumenta.

O escoamento interno, por sua vez, é governado pelas equações de Navier-Stokes para fluido incompressível em regime permanente. A conservação da massa (equação da continuidade) é expressa em sua forma vetorial por:

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (2)$$

em que V representa o vetor velocidade. A conservação da quantidade de movimento linear em regime permanente assume a seguinte forma:

$$\rho (V \cdot \nabla V) = -\nabla P + \mu(\nabla^2 V) \quad (3)$$

em que ρ é a massa específica (998,2 Kg/m³), μ é a viscosidade dinâmica (0,001003 kg/m·s) e P é a pressão estática. Para o escoamento laminar completamente desenvolvido de um fluido newtoniano com propriedades físicas constantes, a velocidade na linha de centro da componente de velocidade axial assume a seguinte forma:

$$u_{max} = 2 \cdot V_{médio} \quad (4)$$

Por fim, a validação foi conduzida comparando-se o valor de velocidade máxima, obtido na linha de centro com a solução analítica, quantificando a exatidão do modelo através do erro relativo percentual:

$$Er = \left| \frac{\text{Valor Simulado} - \text{Valor Analítico}}{\text{Valor Analítico}} \right| \times 100\% \quad (5)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para iniciar a análise do comportamento do fluido, avaliou-se qualitativamente o campo de velocidades ao longo do duto cilíndrico. A Figura 2 ilustra os valores do módulo do vetor velocidade obtidos.

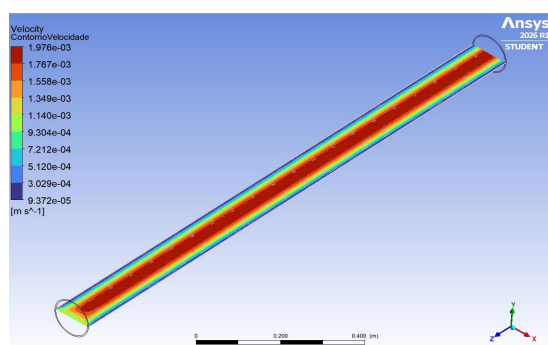


Figura 2. Contornos do perfil de velocidade ao longo do comprimento do tubo

A partir da Figura 2, observa-se a distribuição de velocidades ao longo da seção transversal do duto. Os contornos revelam que a velocidade do fluido é cada vez menor quanto mais próximo à parede sólida do tubo, o que comprova a aplicação física da condição de não-deslizamento, que ocorre devido à viscosidade do fluido em contato com a superfície sólida. À medida que se avança em direção ao centro do duto, a velocidade aumenta progressivamente até atingir o seu valor máximo no eixo central. Comportamento este, semelhante ao perfil parabólico previsto pela teoria de escoamento interno desenvolvido, evidenciando de forma clara a transição suave de velocidade causada pelas forças de cisalhamento viscosas.

Tabela 1. Velocidade máxima obtida nas simulações para os diferentes níveis de refinamento de malha.

Nível de malha	Elementos	u_{max} Simulado
Grossa	27.204	0,00198538
Média	100.227	0,00199943
Fina	440.796	0,00200027

Os resultados apresentados na Tabela 1 evidenciam a influência do refinamento da malha na solução numérica obtida. À medida que o número de elementos aumenta, observa-se um crescimento gradual da velocidade máxima calculada na seção de saída do tubo, aproximando-se de um valor praticamente constante. Entre as malhas média e fina, a diferença na velocidade máxima é bastante reduzida, indicando que a solução já apresenta comportamento convergente. Esse resultado demonstra que o refinamento espacial contribui para aumentar a precisão da solução.

Para a validação quantitativa, os resultados da velocidade máxima no centro do tubo (u_{max}) foram

comparados com o valor teórico de referência encontrado na literatura e estimado seu erro relativo (5). De acordo com Fox e McDonald (2018), a velocidade máxima desenvolvida para escoamento laminar em tubos deve ser exatamente o dobro da velocidade média de entrada, dada pela Equação 5, $u_{max} = 2 \cdot V_{média} = 2 \cdot 0,001005 = 0,00201 \text{ m/s}$

A partir desse valor de referência, foi calculado o erro relativo das simulações, cujos resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Erro relativo entre a velocidade máxima u_{max} simulada em comparação com a u_{max} analítica.

Nível de malha	Erro Relativo (%)
Grossa	1,22%
Média	0,53%
Fina	0,48%

A comparação entre os resultados numéricos e a solução analítica, apresentada na Tabela 2, confirma a convergência do modelo computacional. Observa-se que o refinamento da malha reduziu significativamente o erro relativo, passando de 1,22% na malha grossa para 0,53% na malha média. Entretanto, o refinamento adicional para a malha fina proporcionou apenas um pequeno ganho de precisão, reduzindo o erro para 0,48%, apesar do aumento expressivo no número de elementos. Esse comportamento indica que a independência de malha foi praticamente alcançada na malha média, tornando refinamentos adicionais pouco vantajosos em relação ao custo computacional. Por fim, o erro inferior a 0,5% obtido na malha fina demonstra a boa concordância entre os resultados numéricos obtidos no ANSYS Fluent e a solução analítica para o escoamento laminar plenamente desenvolvido.

CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo validar numericamente o escoamento laminar em um tubo cilíndrico utilizando o ANSYS Fluent, por meio da comparação entre os resultados numéricos e a solução analítica. Os resultados demonstraram boa concordância entre as soluções, reproduzindo o perfil parabólico característico do escoamento plenamente desenvolvido e apresentando erro inferior a 0,5% em relação ao valor teórico.

A análise dos diferentes níveis de refinamento evidenciou a convergência da solução numérica,



indicando que a malha média já apresenta independência de malha, enquanto refinamentos adicionais proporcionam ganhos pouco significativos frente ao aumento do custo computacional.

Dessa forma, conclui-se que a metodologia empregada foi adequada para a validação do modelo numérico, reforçando a importância da análise de independência de malha para garantir a confiabilidade de simulações CFD antes de sua aplicação em problemas de engenharia mais complexos.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento ao ModelSinc e a Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT).

REFERÊNCIAS

Al Amin, MD. CFD Analysis of Velocity Distribution and Pressure Drop in Laminar Pipe Flow. LAB University of Applied Sciences, Finlândia, 2024

Azwan, AAA. Laminar Flow in a Circular Pipe: Verification of Hagen–Poiseuille Law. Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, v. 106, p. 31-39, 2025.

FOX, Robert W.; McDONALD, Alan T. Introdução à Mecânica dos Fluidos. LTC, Rio de Janeiro, 2018