

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**AVALIAÇÃO DE CORRELAÇÕES PARA PARÂMETROS DE
ESCOAMENTO EM TUBOS UTILIZANDO CFD**

Bruno Henrique Braz

Trabalho de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Química da
Universidade Federal de São Carlos

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Gabriela Cantarelli Lopes

São Carlos - SP

2020

BANCA EXAMINADORA

Trabalho de graduação apresentado no dia 15 de dezembro de 2020 e composto pela banca:

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Gabriela Cantarelli Lopes – DEQ/UFSCar

Convidado: Prof. Dr. Rodrigo Béttega – DEQ/UFSCar

Professor da disciplina: Prof. Dr. Ruy de Sousa Júnior – DEQ/UFSCar

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais por todas as oportunidades que conseguiram me proporcionar e que foram fundamentais para conseguir chegar até aqui. Sem eles nada disso teria sido possível.

Gostaria de agradecer aos meus irmãos por todo o suporte ao longo dessa caminhada, todos os conselhos, todas as conversas, todas as demonstrações de carinho que contribuíam para que eu continuasse.

A minha orientadora Prof. Gabriela Cantarelli Lopes pela oportunidade de explorar essa temática e por toda a paciência e atenção dedicada ao longo de todo esse processo.

Aos discípulos, Luiz, Nicolas, Fabrício, Laira, Marianas, Iago, Vittor e Victor, por terem tornado a caminhada tão mais tranquila de ser realizada.

Aos 014, André, Bia, Marisa, Tati e Denise por terem me acolhido quando as coisas pareciam desandar.

Aos amigos da Raccoon, Luiz, Bea, Gazziro, Montanha e Carioca pelas oportunidades de aprendizado e crescimento que adquiri estando ao lado de vocês.

Aos grandes amigos Lucas, Fabs e Markão que acompanham essa jornada desde antes do início e que ainda não se cansaram de ouvir todos os episódios.

À minha namorada Cristiane por ter sido a pessoa mais fundamental para que todo esse ciclo fosse concluído, a pessoa que acreditou em mim mesmo quando eu mesmo já não acreditava tanto assim.

À todos, muitíssimo obrigado!

RESUMO

O transporte de fluidos no interior de tubos está presente em muitas operações industriais e o conhecimento das características do escoamento é essencial para que os processos sejam otimizados da melhor maneira. As soluções analíticas presentes na literatura são obtidas apenas para configurações simples de escoamento. Para casos mais complexos, as soluções empíricas são o caminho encontrado para contornar a dificuldade de análise desses casos, em contra partida, o número de correlações propostas e a divergência entre elas torna-se um problema na decisão de qual a melhor a ser utilizada. Neste trabalho, simulações de tubos circulares de comprimentos 0,1m, 0,2m, 0,4m, 0,7m, 1,2m, 1,4m, 1,5m, 1,75 e 2m com escoamento de água e glicerina em regimes laminar ($Re = 100, 498, 995$ e 1032), de transição ($Re = 2488, 2986, 3154$ e 3483) e turbulento ($Re = 4976, 6967, 9952$ e 10322) foram realizadas no *software* Ansys Fluent de maneira a se obter valores para variáveis de comprimento de entrada, perfil de velocidade e queda de pressão para que fossem posteriormente comparadas com valores obtidos por meio de correlações disponíveis na literatura. Os resultados demonstraram que os comprimentos de entrada são bem previstos pelas equações de Kays no escoamento laminar e Bhatti no escoamento turbulento, mas que nenhuma correlação testada apresentou proximidade satisfatória com os valores obtidos na simulação com glicerina. As simulações com água e glicerina apresentaram boa proximidade com o que foi previsto pelo perfil parabólico no escoamento laminar. No escoamento turbulento, as simulações com glicerina foram as que ficaram mais próximas dos perfis propostos pela lei de potência e pelo perfil universal. Na queda de pressão, tanto a simulação com água quanto a simulação com glicerina tiveram boa proximidade com a queda de pressão teórica, porém nos escoamentos turbulentos os resultados entre o que foi obtido na simulação e o valor teórico foram discrepantes.

ABSTRACT

The fluid flow inside tubes is present in many industrial operations and the knowledge of the flow parameters is essential for the processes to be optimized. The analytical solutions found in the literature are obtained only for simple flow configurations. For more complex cases, empirical solutions are the way found to overcome the difficulty of analyzing these cases, in contrast, the number of proposed correlations and the divergence between them becomes a problem in deciding which is the best to be used. In this work, simulations of circular tube with length of 0,1m, 0,2m, 0,4m, 0,7m, 1,2m, 1,4m, 1,5m, 1,75 e 2m with water and glycerin in laminar ($Re = 100, 498, 995$ e 1032), transition ($Re = 2488, 2986, 3154$ e 3483) and turbulent ($Re = 4976, 6967, 9952$ e 10322) flows were performed in the Ansys Fluent software in order to obtain values for entrance length, velocity profile and pressure drop variables so that they were subsequently compared with values obtained through correlations available in the literature. The results demonstrated that the entry lengths are well predicted by the Kays equations in the laminar flow and Bhatti in the turbulent flow, but that no correlation tested showed satisfactory proximity to the values obtained in the simulation with glycerin. The simulations with water and glycerin showed good proximity to what was predicted by the parabolic profile in the laminar flow. In turbulent flow, simulations with glycerin were the closest to the profiles proposed by the power law and the universal profile. In the pressure drop, both the water simulation and the glycerin simulation had good proximity to the theoretical pressure drop, however in the turbulent flows the results between what was obtained in the simulation and the theoretical value were different.

Sumário

BANCA EXAMINADORA	ii
AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	ix
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Comprimento de entrada	3
2.2. Perfis de velocidade	5
2.3. Queda de pressão	10
2.4. Fluidodinâmica Computacional	11
2.5. Método dos volumes finitos	11
3. MATERIAIS E MÉTODOS	12
3.1. Geometria simulada	12
3.2. Setup das simulações	15
3.3. Modelo matemático para abordagem do problema	15
3.4. Modelo de turbulência	16
3.5. Hipótese de Boussinesq	18
3.6. Modelo $k - \epsilon$	18
3.7. Teste de independência de malha	19
3.8. Pós-processamento dos dados simulados	22
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1. Escoamento laminar	25
4.1.1. Laminar 1	25
4.1.2. Laminar 2	28
4.1.3. Laminar 3	31
4.2. Escoamento turbulento	35
4.2.1. Turbulento 1	35
4.2.2. Turbulento 2	38
4.2.3. Turbulento 3	41
4.3. Escoamento transição	45
4.3.1. Transição 1	45

4.3.2. Transição 2.....	50
4.3.3. Transição 3.....	55
4.4. Glicerina.....	61
4.4.1. Glicerina Laminar	61
4.4.2. Glicerina turbulenta	65
4.4.3. Glicerina Transição	69
5. Conclusões.....	76
6. Sugestões	78
Referências Bibliográficas	79

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Desenvolvimento da camada limite em um tubo.	6
Figura 3.1 - Geometria simulada.	12
Figura 4.1 - Perfis de velocidade do escoamento laminar 1.	27
Figura 4.2 - Perfis de velocidade do escoamento laminar 2.	30
Figura 4.3 - Perfis de velocidade do escoamento laminar 3.	33
Figura 4.4 - Comparação entre as correlações para comprimento de entrada no escoamento laminar.	34
Figura 4.5 - Perfis de velocidade do escoamento turbulento 1.	37
Figura 4.6 - Perfis de velocidade do escoamento turbulento 2.	40
Figura 4.7 - Perfis de velocidade do escoamento turbulento 3.	43
Figura 4.8 - Comparação entre as correlações para comprimento de entrada no escoamento turbulento	45
Figura 4.9 - Perfis de velocidade do escoamento de transição com abordagem laminar 1.	48
Figura 4.10 - Perfis de velocidade do escoamento de transição com abordagem turbulenta 1.	49
Figura 4.11 - Perfis de velocidade do escoamento de transição com abordagem laminar 2.	53
Figura 4.12 - Perfis de velocidade do escoamento de transição com abordagem turbulenta 2.	54
Figura 4.13 - Perfis de velocidade do escoamento de transição com abordagem laminar 3.	58
Figura 4.14 - Perfis de velocidade do escoamento de transição com abordagem turbulenta 3.	58
Figura 4.15 - Comparação entre as correlações para comprimento de entrada no escoamento de transição com abordagem laminar.	60
Figura 4.16 - Comparação entre as correlações para comprimento de entrada no escoamento de transição com abordagem turbulenta.	61
Figura 4.17 - Perfis de velocidade do escoamento laminar para a Glicerina.	63
Figura 4.18 - Comparação entre as correlações para comprimento de entrada no escoamento laminar para água e glicerina	65
Figura 4.19 - Perfis de velocidade do escoamento turbulento para a Glicerina.	67
Figura 4.20 - Comparação entre as correlações para comprimento de entrada no escoamento turbulento para água e glicerina.	69
Figura 4.21 - Perfis de velocidade do escoamento de transição com abordagem laminar para a glicerina.	72
Figura 4.22 - Perfis de velocidade do escoamento de transição com abordagem turbulenta para a Glicerina.	72
Figura 4.23 - Comparação entre as correlações para comprimento de entrada no escoamento de transição com abordagem laminar para água e glicerina.	74
Figura 4.24 - Comparação entre as correlações para comprimento de entrada no escoamento de transição com abordagem turbulenta para água e glicerina.	75

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Equações de predição do comprimento de entrada em um tubo com escoamento laminar.	4
Tabela 2 - Equações de predição do comprimento de entrada em um tubo com escoamento turbulento.	5
Tabela 3 - Condições de contorno para a simulação da água em escoamento laminar.	13
Tabela 4 - Condições de contorno para a simulação da água em escoamento turbulento.	13
Tabela 5 - Condições de contorno para a simulação da água em escoamento de transição.	14
Tabela 6 - Condições de contorno para a simulação com Glicerina.	14
Tabela 7 - Propriedade dos fluidos simulados	15
Tabela 8 - Relação das malhas utilizadas para escoamento de água.	21
Tabela 9 - Relação das malhas utilizadas para a simulação com glicerina.	22
Tabela 10 - Comprimento de entrada em cada malha simulada do escoamento laminar 1.	25
Tabela 11 - Avaliação do GCI no escoamento laminar 1.	25
Tabela 12 - Comparação das correlações para comprimento de entrada no escoamento laminar 1.	26
Tabela 13 - Valores de velocidade máxima obtidos para o escoamento laminar 1.	27
Tabela 14 - Queda de pressão no tubo para escoamento laminar 1.	27
Tabela 15 - Comprimento de entrada em cada malha simulada do escoamento laminar 2.	28
Tabela 16 - Avaliação do GCI no escoamento laminar 2.	28
Tabela 17 - Comparação das correlações para comprimento de entrada no escoamento laminar 2.	29
Tabela 18 - Valores de velocidade máxima obtidos para o escoamento laminar 2.	30
Tabela 19 - Queda de pressão no tubo para escoamento laminar 2.	30
Tabela 20 - Comprimento de entrada em cada malha simulada do escoamento laminar 3.	31
Tabela 21 - Avaliação do GCI no escoamento laminar 3.	32
Tabela 22 - Comparação das correlações para comprimento de entrada no escoamento laminar 3.	32
Tabela 23 - Valores de velocidade máxima obtidos para o escoamento laminar 3.	33
Tabela 24 - Queda de pressão no tubo para escoamento laminar 3.	34
Tabela 25 - Comprimento de entrada em cada malha simulada do escoamento turbulento 1.	35
Tabela 26 - Avaliação do GCI no escoamento turbulento 1.	35
Tabela 27 - Comparação das correlações para comprimento de entrada no escoamento turbulento 1.	36
Tabela 28 - Valores de velocidade máxima obtidos para o escoamento turbulento 1.	37
Tabela 29 - Queda de pressão no tubo para escoamento turbulento 1.	38
Tabela 30 - Comprimento de entrada em cada malha simulada do escoamento turbulento 2.	38
Tabela 31 - Avaliação do GCI no escoamento turbulento 2.	39
Tabela 32 - Comparação das correlações para comprimento de entrada no escoamento turbulento 2.	39
Tabela 33 - Valores de velocidade máxima obtidos para o escoamento turbulento 2.	41
Tabela 34 - Queda de pressão no tubo para escoamento turbulento 2.	41
Tabela 35 - Comprimento de entrada em cada malha simulada do escoamento turbulento 3.	42
Tabela 36 - Avaliação do GCI no escoamento turbulento 3.	42
Tabela 37 - Comparação das correlações para comprimento de entrada no escoamento turbulento 3.	43
Tabela 38 - Valores de velocidade máxima obtidos para o escoamento turbulento 3.	44
Tabela 39 - Queda de pressão no tubo para escoamento turbulento 3.	44
Tabela 40 - Comprimento de entrada em cada malha simulada do escoamento de transição 1.	46
Tabela 41 - Avaliação do GCI no escoamento de transição com abordagem laminar 1.	46
Tabela 42 - Avaliação do GCI no escoamento de transição com abordagem turbulenta 1.	47
Tabela 43 - Comparação das correlações para comprimento de entrada no escoamento de transição 1.	47
Tabela 44 - Valores de velocidade máxima obtidos para o escoamento de transição com abordagem laminar 1.	49

Tabela 45 - Valores de velocidade máxima obtidos para o escoamento de transição com abordagem turbulenta 1.	50
Tabela 46 - Queda de pressão no tubo para escoamento de transição 1.	50
Tabela 47 - Comprimento de entrada em cada malha simulada do escoamento de transição 2.	51
Tabela 48 - Avaliação do GCI no escoamento de transição com abordagem laminar 2.	51
Tabela 49 - Avaliação do GCI no escoamento de transição com abordagem turbulenta 2.	52
Tabela 50 - Comparação das correlações para comprimento de entrada no escoamento de transição 2.	52
Tabela 51 - Valores de velocidade máxima obtidos para o escoamento de transição com abordagem laminar 2.	54
Tabela 52 - Valores de velocidade máxima obtidos para o escoamento de transição com abordagem turbulenta 2.	55
Tabela 53 - Queda de pressão no tubo para escoamento de transição 2.	55
Tabela 54 - Comprimento de entrada em cada malha simulada do escoamento de transição 3.	56
Tabela 55 - Avaliação do GCI no escoamento de transição com abordagem laminar 3.	56
Tabela 56 - Avaliação do GCI no escoamento de transição com abordagem turbulenta 3.	56
Tabela 57 - Comparação das correlações para comprimento de entrada no escoamento de transição 3.	57
Tabela 58 - Valores de velocidade máxima obtidos para o escoamento de transição com abordagem laminar 3.	59
Tabela 59 - Valores de velocidade máxima obtidos para o escoamento de transição com abordagem turbulenta 3.	59
Tabela 60 - Queda de pressão no tubo para escoamento de transição 3.	60
Tabela 61 - Comprimento de entrada em cada malha simulada do escoamento laminar para a glicerina.	62
Tabela 62 - Avaliação do GCI no escoamento laminar de Glicerina.	62
Tabela 63 - Comparação das correlações para comprimento de entrada no escoamento laminar de glicerina.	63
Tabela 64 - Valores de velocidade máxima obtidos para o escoamento laminar de glicerina.	64
Tabela 65 - Queda de pressão no tubo para glicerina em regime laminar.	64
Tabela 66 - Comprimento de entrada em cada malha simulada do escoamento turbulento para a glicerina.	65
Tabela 67 - Avaliação do GCI no escoamento turbulento de Glicerina.	66
Tabela 68 - Comparação das correlações para comprimento de entrada no escoamento turbulento de glicerina.	66
Tabela 69 - Valores de velocidade máxima obtidos para o escoamento turbulento de glicerina.	67
Tabela 70 - Queda de pressão no tubo para glicerina em regime turbulento.	68
Tabela 71 - Comprimento de entrada em cada malha simulada do escoamento de transição para a glicerina.	69
Tabela 72 - Avaliação do GCI no escoamento de transição com abordagem laminar para a Glicerina.	70
Tabela 73 - Avaliação do GCI no escoamento de transição com abordagem turbulenta para a Glicerina.	70
Tabela 74 - Comparação das correlações para comprimento de entrada no escoamento de transição da glicerina.	71
Tabela 75 - Valores de velocidade máxima obtidos para o escoamento de transição com abordagem laminar para glicerina.	73
Tabela 76 - Valores de velocidade máxima obtidos para o escoamento de transição com abordagem turbulenta para glicerina.	73
Tabela 77 - Queda de pressão no tubo para glicerina em regime de transição.	74

1. INTRODUÇÃO

O escoamento de fluidos no interior de dutos está presente em muitas operações industriais e o conhecimento das características do escoamento é essencial para que seja possível a realização otimizações nos processos, sejam elas relacionadas ao bombeamento dos fluidos, ao tipo de tubulação a ser utilizada, ao comportamento esperado do material no escoamento, entre outras situações do transporte.

Quando se avalia a literatura sobre o assunto, é possível notar que os escoamentos em regime laminar possuem uma grande quantidade de material de estudo que descrevem com precisão o comportamento esperado nesse regime, quais correlações podem ser utilizadas e o quão próxima é a descrição que elas conseguem fazer para uma situação real, principalmente quando avalia-se casos mais simples. Para o escoamento turbulento, por sua vez, não existem soluções analíticas e com isso, variáveis de interesse são obtidas a partir de relações empírica, restringindo o seu estudo a casos específicos e para uma faixa limitada de operação. Devido à gama de possibilidades de correlações para se abordar uma situação, tem-se o problema de definir qual das correlações é a mais confiável, qual delas melhor se aplica à situação trabalhada e o quão divergentes são as correlações entre si.

Com tantas variáveis a serem exploradas em diversas condições de contorno possíveis, a fluidodinâmica computacional tem se mostrado uma ferramenta poderosa ao ser capaz de utilizar a ciência da computação para solucionar as equações matemáticas que descrevem situações de escoamento de fluidos. Tal capacidade permite um processo de modelagem e experimentação mais rápidos e menos custosos, garantindo que a ferramenta seja utilizada em diferentes áreas, como engenharia aeroespacial, indústrias química, energética, metalúrgica, nuclear, automotiva, biomédica e até em esportes de alto rendimento. Neste trabalho se utilizou da capacidade dessa ferramenta de maneira a possibilitar o estudo de diferentes condições de escoamento.

Mesmo que a abordagem do trabalho não contemple os efeitos que as trocas térmicas podem trazer para as variáveis analisadas, principalmente as relacionadas com a viscosidade, a ideia desse estudo é abordar, por meio de um software de CFD, o comportamento de diferentes regimes de escoamento com fluidos pouco ou muito viscosos e avaliar se a abordagem disponível na literatura funciona para esses casos.

1.1. Objetivos

O objetivo deste trabalho consiste em avaliar, por meio das simulações realizadas no Software Ansys Student 2020 R2, as correlações da literatura para diferentes parâmetros em diferentes regimes de escoamento. Para atingir este objetivo, este trabalho foi dividido nas seguintes etapas:

- Avaliar o comprimento de entrada em um tubo circular e como as correlações e as simulações se comportam nos diferentes tipos de regimes de escoamento;
- Observar os perfis de velocidade obtidos para os diferentes escoamentos e o quanto as simulações ficam próximas dos perfis teóricos;
- Determinar, também, a queda de pressão ao longo do tubo e o quanto as simulações se aproximam dos valores teóricos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Comprimento de entrada

Quando um fluido viscoso escoar em um tubo, o atrito entre parede e fluido faz com que o escoamento tenha menor velocidade nas proximidades com a parede e maior velocidade conforme se afasta dela. Essa interação entre parede e fluido é o que dá origem ao perfil de velocidade do escoamento, que foi abordado no tópico seguinte. Esse perfil vai ganhando forma desde a entrada do tubo até o momento em que o seu formato não sofra mais alterações. Quando se atinge esse ponto, tem-se o que é chamado de escoamento completamente desenvolvido. A distância entre a entrada do tubo até esse ponto é o que se chama de comprimento de entrada. (Tongpun et al., 2014) (Morrison, 2013).

As correlações utilizadas para a predição do comprimento de entrada, em sua maioria, foram formuladas ao longo do tempo seguindo um modelo dependente do número de Reynolds no formato trazido pela Equação 2.1 , onde L_E é o comprimento de entrada D é o diâmetro do tubo, Re refere-se ao número de Reynolds e C_0 e C_1 são constantes (Sahu et al., 2012).

$$\frac{L_E}{D} = C_0 + C_1 Re \quad (2.1)$$

O número de Reynolds por sua vez, é calculado conforme a Equação 2.2, onde ρ e μ são a densidade e a viscosidade cinemática do fluido respectivamente, D é o diâmetro do tubo por onde o fluido escoar e V_{med} é a velocidade média do escoamento. Considera-se que um escoamento em tubo com valor de Reynolds menor do que 2300 é um escoamento laminar. Para valores de Reynolds em tubo acima de 4000, tem-se um escoamento turbulento. A faixa entre esses dois valores é considerada a faixa de regime de transição (Çengel e Cimbala, 2015).

$$Re = \frac{\rho V_{med} D}{\mu} \quad (2.2)$$

Na Tabela 1 tem-se algumas das correlações encontradas na literatura para a predição do comprimento de entrada em um tubo para o escoamento em regime laminar e que foram utilizadas como parâmetros de comparação com os valores obtidos em simulação.

Tabela 1 - Equações de predição do comprimento de entrada em um tubo com escoamento laminar.

Equação	Autor
$\frac{L_e}{D} = 0,05 \cdot Re$ (2.3)	(Kays, Crawford e Weigand, 2004)
$\frac{L_e}{D} = 0,065 \cdot Re$ (2.4)	(Potter e Wiggert, 2010)
$\frac{L_e}{D} = 0,06 \cdot Re$ (2.5)	(Schlichting, 1968)
$\frac{L_e}{D} = 0,59 + 0,056 \cdot Re$ (2.6)	(Atkinson et al., 1969)
$\frac{L_e}{D} = \frac{0,72}{0,04 \cdot Re + 1} + 0,061 \cdot Re$ (2.7)	(Chen, 1973)
$\frac{L_e}{D} = \frac{0,60}{0,035 \cdot Re + 1} + 0,056 \cdot Re$ (2.8)	(Friedmann et al., 1968)

Apesar de ser mais comum na indústria que o escoamento laminar, o escoamento em regime turbulento apresenta uma menor quantidade de estudos descrevendo correlações para o comprimento de entrada na literatura (Lien et al., 2004).

Além disso, tais correlações, por vezes, são simplificadas em termos do diâmetro do tubo, ou seja, o comprimento de entrada em um escoamento turbulento é n vezes o diâmetro do tubo.

Para comparação com as simulações realizadas, foram utilizadas as equações apresentadas na Tabela 2

Tabela 2 - Equações de predição do comprimento de entrada em um tubo com escoamento turbulento.

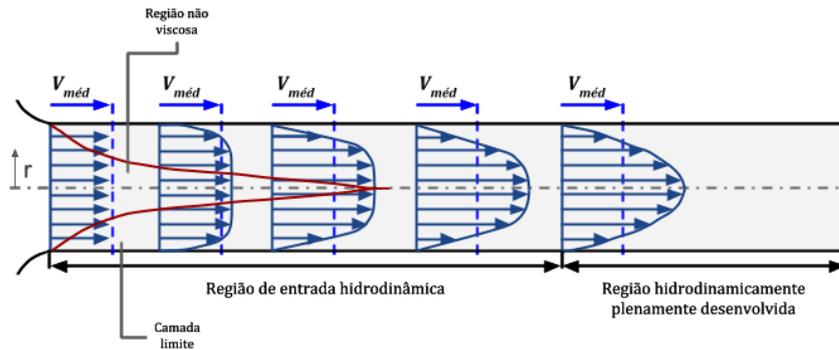
Equação	Autor
$L_e = 1,359.D.Re^{\frac{1}{4}}$ (2.9)	(Bhatti e Shah, 1987)
$L_e = 4,4.D.Re^{\frac{1}{6}}$ (2.10)	(Potter e Wiggert, 2010)
$L_e = 10D$ (2.11)	(Çengel e Cimbala, 2015)

2.2. Perfis de velocidade

Quando um fluido escoar por um tubo, o atrito entre o fluido e a parede do tubo faz com que as partículas da interface não tenham movimento, o que é chamado de condição de não escorregamento. Essas partículas fazem com que as camadas de fluido adjacente também tenham seu movimento prejudicado por conta do atrito. Esse efeito se propaga da parede do tubo e vai minimizando até chegar ao centro do tubo onde esse efeito é o menor possível dentro daquele escoamento. Quando observada a Figura 2.1 a seguir, percebe-se o efeito do atrito do fluido com a parede e o formato que o escoamento vai adquirindo, com velocidades maiores à medida que se afasta das paredes do tubo. Esse formato adquirido no escoamento do tubo é o que se chama de perfil de velocidade. No início do tubo esse perfil vai se alterando até que atinge a região hidrodinâmica plenamente desenvolvida e seu formato não sofre mais alterações (Çengel e Cimbala, 2015).

O perfil de velocidade se forma quando um fluido escoar por dentro de um tubo e a velocidade do fluido no centro do tubo torna-se diferente de sua velocidade nas regiões próximas das paredes por conta da sua viscosidade e consequente atrito do fluido com a parede do tubo.

Figura 2.1 - Desenvolvimento da camada limite em um tubo.



Fonte: Elaborado pelo autor

Estando em um escoamento laminar completamente desenvolvido, onde o fluido apresenta velocidade axial constante e velocidade radial nula e sem aceleração em qualquer direção, considerando um elemento de volume na direção do escoamento e realizando o balanço de forças nesse elemento é possível se chegar na Equação 2.12 para o perfil de velocidade parabólico.

$$V(y) = \frac{y^2}{4\mu} \left(\frac{dP}{dx} \right) + C_1 \ln(y) + C_2 \quad (2.12)$$

Considerando-se que no centro do tubo a velocidade é máxima e que nas paredes a velocidade é zero por conta da condição de não escorregamento, tem-se o que é exposto na Equação 2.13.

$$V(y) = -\frac{R^2}{4\mu} \left(\frac{dP}{dx} \right) \left(1 - \frac{y^2}{R^2} \right) \quad (2.13)$$

Quando se realiza o cálculo da integral, é possível determinar o perfil de velocidade parabólico de acordo com o valor da velocidade média, conforme a Equação 2.14, onde y é a distância da parede pro centro do tubo, V é a velocidade na posição y , $V_{\text{máx}}$ é a velocidade máxima no centro do tubo e R é o raio do tubo em questão (Çengel e Cimbala, 2015).

$$\frac{V}{V_{m\acute{a}x}} = \left[1 - \left(\frac{y}{R} \right)^2 \right] \quad (2.14)$$

Para o escoamento turbulento, os perfis teóricos de velocidade podem ser obtidos por meio da lei de potência ou do perfil universal. Em ambos os casos, as variáveis de tensão de cisalhamento e fator de atrito são necessárias para a realização dos cálculos, além do fator de atrito ser utilizado posteriormente também para o cálculo da queda de pressão no tubo (Çengel e Cimbala, 2015).

O fator de atrito é definido como na Equação 2.15

$$f = \frac{8 \cdot \tau_w}{\rho \cdot V_{med}^2} \quad (2.15)$$

É possível perceber uma relação inversamente proporcional entre o valor do fator de atrito e número de Reynolds, mostrando que quanto maior o número de Reynolds, ou seja, quanto mais turbulento o regime de escoamento, menor é a influência do fator de atrito. Já na situação contrária, um regime de escoamento laminar tende a sofrer mais com o fator de atrito e conseqüente queda de pressão (Baquero et al., 2017).

O fator de atrito, quando numa situação de escoamento laminar em tubo liso circular, pode ser simplificada utilizando-se a equação de Hagen-Poiseuille como mostrado na Equação 2.16.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.16)$$

Para Reynolds turbulento, o fator de atrito é comumente calculado pela equação de Colebrook-White, conforme mostrado Equação 2.17. Para Colebrook-White, a relação de rugosidade relativa (ε/D) deve estar contida no intervalo de $0 \leq \varepsilon/D \leq 0,05$ (Moran, 2018).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\frac{\varepsilon}{D}}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (2.17)$$

Por se tratar de uma equação implícita em f , a relação de Colebrook-White pode ser aproximada pela relação de Haaland com diferenças menores do que a ordem de 2%, ficando conforme a Equação 2.18. Dessa maneira não é necessário que o cálculo iterativo seja realizado (Çengel e Cimbala, 2015).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 \cdot \log \left[\frac{6,9}{Re} + \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} \right)^{1,11} \right] \quad (2.18)$$

Uma terceira maneira de se obter o fator de atrito para os casos em que se trabalha o escoamento em tubo liso, considera que não se pode simplesmente zerar o termo da rugosidade relativa por conta da condição de não escorregamento na parede. Dessa forma a equação de Colebrook-White pode ser reduzida à equação de Prandtl, que também é uma equação implícita em f e é expressa conforme a Equação 2.19 (Çengel e Cimbala, 2015).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log(Re \sqrt{f}) - 0,8 \quad (2.19)$$

Definidos fator de atrito e tensão de cisalhamento é possível determinar o perfil de velocidade do escoamento por meio da lei de potência.

A representação do perfil de velocidade por meio da lei de potência é dada pela Equação 2.20 (Çengel e Cimbala, 2015).

$$\frac{V}{V_{m\acute{a}x}} = \left[1 - \left(\frac{y}{R} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \quad (2.20)$$

Embora a literatura recomende a aproximação do valor de n para 7, para este trabalho decidiu-se por calcular n por meio da relação exibida na Equação 2.21 (Cheng, 2007).

$$n = \frac{1}{\sqrt{f}} \quad (2.21)$$

Para cálculo de $V_{m\acute{a}x}$ utiliza-se a relação dada pela Equação 2.22

$$V_{m\acute{a}x} = \frac{V_{m\acute{e}d} \cdot (n + 1)(2n + 1)}{2n^2} \quad (2.22)$$

O perfil universal de velocidade leva em consideração que o escoamento turbulento no tubo pode ser dividido em três sub-regiões, sendo a primeira região a mais próxima da parede e com alta influência do atrito com a parede, chamada de subcamada laminar. Uma terceira região mais ao centro do tubo chamada de camada turbulenta, onde os efeitos viscosos da interação do fluido com a parede perdem sua influência e a segunda região que é a transição entre esses dois estados e que é chamada de camada de transição (Çengel e Cimbala, 2015).

Para essa abordagem, após o cálculo da tensão de cisalhamento, calcula-se a velocidade de atrito, uma medida adimensional expressa pela Equação 2.23.

$$V^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (2.23)$$

Por meio do cálculo do comprimento viscoso, representado por y^+ , define-se em qual região se está localizado e a partir dessa informação define-se qual a relação utilizada para o cálculo da velocidade de escoamento do fluido naquele ponto. O y^+ é calculado por meio da Equação 2.24.

$$y^+ = \frac{(R - r)V^*}{\mu/\rho} \quad (2.24)$$

e de acordo com o valor de y^+ é possível definir o valor de V^+ , por meio das relações definidas nas equações 2.25, 2.26 e 2.27.

$$\begin{cases} V^+ = y^+ & \text{se } y^+ < 5 \\ V^+ = 5 \cdot \ln(y^+) - 3,05 & \text{se } 5 < y^+ < 30 \\ V^+ = 2,5 \cdot \ln(y^+) + 5,5 & \text{se } y^+ > 30 \end{cases} \quad \begin{matrix} (2.25) \\ (2.26) \\ (2.27) \end{matrix}$$

Por último, o valor da velocidade é obtido por meio da multiplicação de V^+ e V^* , conforme a Equação 2.28.

$$V = V^+ V^* \quad (2.28)$$

2.3. Queda de pressão

A queda de pressão é um parâmetro importante para se calcular uma vez que está ligada diretamente com as necessidades de potência das bombas ou ventiladores que podem ser necessários no processo (Çengel e Cimbala, 2015).

Devido ao atrito que ocorre entre fluido e parede do tubo, existe uma perda de energia do escoamento na forma de energia térmica, essa perda é chamada de queda de pressão e é irreversível dentro do processo. Essa perda de carga se inicia de forma intensa na entrada do tubo, por conta das forças viscosas terem maior influência na entrada do tubo, mas vai tendo sua intensidade diminuída ao longo do comprimento do tubo, até que na região com escoamento hidrodinamicamente plenamente desenvolvido a queda de pressão passa a ser linear com o comprimento do tubo.

Aplicando-se a conservação de energia entre dois pontos de um duto, em um regime permanente e com fluido com densidade constante, a energia dispendida devido ao atrito do fluido com a parede do tubo (perda de carga) pode ser representada pela Equação 2.29.

$$\Delta P_L = f \frac{L}{D} \frac{\rho \cdot V_{med}^2}{2} \quad (2.29)$$

2.4. Fluidodinâmica Computacional

A Fluidodinâmica Computacional ou CFD, do inglês *Computational Fluid Dynamics*, teve início nos anos de 70, junto com a evolução do processamento dos computadores e o desenvolvimento de técnicas de aceleração da convergência de métodos numéricos. Com isso tornou-se possível o cálculo e a simulação do comportamento de fluidos imiscíveis, aeronaves ou do interior de turbomáquinas. Por conta do constante aumento do uso dessa ferramenta computacional e para situações cada vez mais complexas, a CFD se tornou cada vez mais abrangente (Blazek, 2005). A CFD é uma ferramenta capaz de oferecer soluções para aplicações onde a solução analítica não é possível ou em outras situações em que uma análise experimental seria difícil ou muito custosa (Horner et al., 2017).

A CFD é uma ferramenta que reúne as leis físicas que governam fenômenos como o escoamento de fluidos e de partículas, transferências de energia, de calor e/ou de massa, além da cinética de reações (Reynolds, 2009). Todos os avanços na área permitem que hoje em dia a CFD seja utilizada auxiliando o desenvolvimento de áreas como meteorologia, oceanografia, astrofísica, arquitetura, além das mencionadas anteriormente (Blazek, 2005).

2.5. Método dos volumes finitos

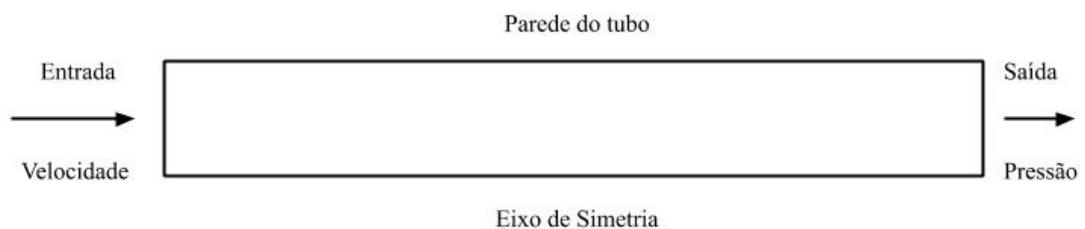
Para que a CFD possa funcionar é necessário que as equações que governam os fenômenos simulados e as condições de contorno sejam discretizadas. Para o escoamento de fluidos, o método mais utilizado é o de volumes finitos. Este método discretiza a forma integral das equações de conservação subdividindo o domínio computacional do problema em finitos volumes de controle, onde se calculam as diferentes variáveis trabalhadas nos centros destes volumes de controle, formando um sistema de equações para cada uma das variáveis e para cada um dos volumes de controle trabalhados (Tu et al., 2007)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Geometria simulada

Para a realização da simulação, construiu-se por meio do *software* SpaceClaim um tubo circular de diâmetro e comprimento variável de acordo com a simulação conforme Figura 3.1. A velocidade de entrada foi determinada em cada simulação, porém a pressão de saída sempre foi mantida para ser igual a pressão atmosférica.

Figura 3.1 - Geometria simulada.



Fonte: Elaborada pelo autor

As dimensões do tubo utilizadas foram definidas de maneira que fosse possível a obtenção de uma ampla faixa de valores de Reynolds, dessa forma tanto o escoamento laminar quanto o turbulento poderiam ser explorados sem grandes variações nas configurações utilizadas, permitindo que um maior número de comparações fosse realizado entre os casos simulados. Com o diâmetro e a velocidade de escoamento definidos de maneira a ser possível explorar as faixas de Reynolds, utilizou-se a equação de determinação do comprimento de entrada desenvolvidas por Potter e Wiggert para o escoamento laminar e a relação de Bhatti e Shah para o escoamento turbulento, de maneira que o comprimento do tubo fosse maior do que o comprimento de entrada, permitindo assim a identificação dos resultados na região de escoamento desenvolvido. Seguindo esse critério e, com o intuito de explorar diferentes configurações para cada um dos regimes (laminar, turbulento e de transição), foram simuladas as configurações descritas nas Tabela 3 e Tabela 4 (Potter e Wiggert, 2010; Bhatti e Shah, 1987).

Tabela 3 - Condições de contorno para a simulação da água em escoamento laminar.

Simulação	R (m)	v_E (m/s)	Reynolds (-)	$L_{Tubo\ Simulado}$ (m)
Laminar 1	0,005	0,01	100	0,1
Laminar 2	0,005	0,05	498	0,4
Laminar 3	0,005	0,10	995	0,7

Tabela 4 - Condições de contorno para a simulação da água em escoamento turbulento.

Simulação	R (m)	v_E (m/s)	Reynolds (-)	$L_{Tubo\ Simulado}$ (m)
Turbulento 1	0,005	0,50	4.976	0,2
Turbulento 2	0,005	0,70	6.967	0,2
Turbulento 3	0,005	1,00	9.952	0,2

Para o regime de transição, principalmente por conta da dificuldade em se definir relações específicas para tal regime, foram realizadas simulações com abordagem laminar e simulações com abordagem turbulenta para um mesmo número de Reynolds. Dessa forma, os casos foram simulados conforme os valores exibidos na Tabela 5. Selecionou-se um comprimento de tubo maior do que o comprimento de entrada fornecido pela equação de Potter para o escoamento laminar, uma vez que este é maior que o comprimento de entrada previsto dentre as correlações avaliadas para o escoamento em regime laminar.

Tabela 5 - Condições de contorno para a simulação da água em escoamento de transição.

Simulação	R (m)	v_E (m/s)	Reynolds (-)	$L_{Tubo\ Simulado}$ (m)
Transição 1	0,005	0,25	2.488	1,50
Transição 2	0,005	0,30	2.986	1,75
Transição 3	0,005	0,35	3.483	2,00

Após as simulações com água foram feitas outras simulações com glicerina de maneira a simular um escoamento com uma viscosidade maior e verificar todos os efeitos que isso traria para as correlações utilizadas. Os dados da mistura foram retirados do estudo realizado por Bessa (2013) e sua escolha foi realizada não só pela presença de um fluido com alta viscosidade, mas também por se tratar de um sistema experimental de dimensões parecidas com as que foram simuladas neste trabalho. As configurações utilizadas na simulação estão descritas na Tabela 6.

Tabela 6 - Condições de contorno para a simulação com Glicerina.

Simulação	R (m)	v_E (m/s)	Reynolds (-)	$L_{Tubo\ Simulado}$ (m)
Glicerina - Laminar	0,006	3,6	1032	1,2
Glicerina - Turbulenta	0,006	36	10322	1,2
Glicerina - Transição	0,006	11	3154	2,4

As propriedades físicas dos fluidos utilizados na simulados foram dispostas na Tabela 7.

Tabela 7 - Propriedade dos fluidos simulados

Fluido	Água	Glicerina
Densidade (kg.m ³)	998,2	1221
Viscosidade (kg/m.s)	0,001003	0,0511

3.2. Setup das simulações

As simulações foram realizadas em regime permanente com configuração 2D axissimétrica, utilizando-se o modelo laminar para as simulações com escoamento laminar e transição com abordagem laminar. Para os escoamentos turbulentos e de transição com abordagem turbulenta, utilizou-se o modelo de turbulência $k - \varepsilon$.

Para os escoamentos laminares e de transição laminar, o método de solução para o acoplamento pressão velocidade utilizado foi o método SIMPLE. Para as simulações com escoamentos turbulentos ou transição com abordagem turbulenta, o método utilizado foi alterado para o Coupled.

Utilizou-se como critério de convergência resíduos que fossem menores que 1.10^{-10} nas simulações com escoamento laminar e transição com abordagem laminar e nos escoamentos turbulentos ou de transição com abordagem turbulenta, o valor de resíduo utilizado foi de 1.10^{-6} .

3.3. Modelo matemático para abordagem do problema

Para a simulação de uma situação de fluido incompressível escoando por um tubo sem considerar as trocas de calor que poderiam estar envolvidas no sistema, a simulação é governada por duas equações, a conservação de massa e a conservação de momento.

A forma genérica para a equação de conservação de massa ou equação da continuidade é dada pela Equação 3.1.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (3.1)$$

No sistema de coordenadas cilíndricas para geometria 2D com simetria axial, a Equação 2.29 pode ser expressa como na Equação 3.2, onde x é a coordenada axial, r é a coordenada radial e v_x e v_r são as componentes da velocidade nos respectivos eixos.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_r)}{\partial r} + \frac{\rho v_r}{r} = 0 \quad (3.2)$$

A conservação da quantidade de movimento, por sua vez, é dada pela Equação 3.3, onde p é a pressão estática, $\bar{\tau}$ é a tensão de cisalhamento, $\rho \cdot \vec{g}$ é a força gravitacional agindo no corpo e \vec{F} representa a soma de todas as forças externas agindo no corpo.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \cdot \vec{g} + \vec{F} \quad (3.3)$$

Com a abordagem 2D com simetria axial, a Equação 3.4 pode ser reescrita como na Equação 3.4 e Equação 3.5.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_x) \\ = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x} \right) \right] + F_x \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_r) \\ = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(\frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] - 2\mu \frac{v_r}{r^2} \\ + \frac{2\mu}{3r} (\nabla \cdot \vec{v}) + \rho \frac{v_z^2}{r} + F_r \end{aligned} \quad (3.5)$$

3.4. Modelo de turbulência

Escoamentos em regime laminar podem ser bem descritos pelas equações de continuidade e momento, porém, escoamentos em regime turbulento tornam-se complexos e

mais equações são adicionadas ao caso para que se possa ter uma precisão melhor das simulações realizadas (Tu et al., 2007).

Uma das maneiras de se abordar o escoamento turbulento seria por meio da simulação numérica direta (DNS), porém, o esforço computacional requerido por esse método, mesmo com a evolução de processamento dos dias atuais, ainda é muito grande. Como maneira de contornar esse problema, é possível trabalhar com valores médios das variáveis no tempo, abordagem chamada de *Reynolds-averaged Navier Stokes* (RANS), uma vez que as informações com essa abordagem, mesmo que com menor detalhamento, ainda serão suficientes para suprir as necessidades na resolução dos problemas em engenharia (Tu et al., 2007).

Nessa abordagem, substitui-se o termo exato de velocidade pela soma do componente da média e o componente da flutuação como mostrado na Equação 3.6. Essa consideração pode ser realizada para qualquer variável em análise.

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (3.6)$$

Substituindo essa expressão nas equações de conservação, tem-se o que é apresentado nas equações 3.7 e 3.8. Essas equações são as denominadas RANS e os termos adicionais que aparecem são os que representam os efeitos da turbulência.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) \\ = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \end{aligned} \quad (3.8)$$

3.5. Hipótese de Boussinesq

Para que a resolução seja possível, é necessário que o termo $-\rho\overline{u'_i u'_j}$, conhecido como tensores de Reynolds, seja modelado. Para isso a hipótese de Boussinesq é comumente utilizada devido a seu baixo custo computacional, principalmente para casos em que sua simplificação de que a viscosidade turbulenta (μ_t) é isotrópica, o que pode não ser verdadeiro para casos em que se tem uma presença muito grande de redemoinhos no escoamento. A relação é fornecida pela Equação 3.9.

$$-\rho\overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (3.9)$$

3.6. Modelo $k - \varepsilon$

Para o escoamento turbulento, o modelo $k - \varepsilon$ foi adotado por conta de ser o mais comum e eficiente para essas situações. Este modelo acrescenta duas equações à resolução do problema de maneira a representar os efeitos da turbulência. Uma delas é a equação de transporte da energia cinética turbulenta (k) e a outra é a equação de transporte da taxa de dissipação da energia cinética turbulenta. A forma geral dessas equações pode ser representada pelas equações 3.10 e 3.11, onde G_k representa a geração de energia cinética por conta dos gradientes de velocidade média, G_b é a geração de energia cinética por conta da flutuação, $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ e $C_{3\varepsilon}$ são constantes, σ_k e σ_ε são números de Prandtl turbulentos para k e ε respectivamente (Tongpun et al., 2014).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.11)$$

A viscosidade turbulenta μ_t , por sua vez, combina k e ε , sendo calculada conforme mostrado na Equação 3.12.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.12)$$

As constantes do modelo $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$, C_μ , σ_k e σ_ε foram mantidos nos valores padrões do programa. São eles $C_{1\varepsilon} = 1,44$, $C_{2\varepsilon} = 1,92$, $C_{3\varepsilon} = 0,09$, $C_\mu = 0,09$, $\sigma_k = 1,0$ e $\sigma_\varepsilon = 1,3$.

3.7. Teste de independência de malha

Para cada uma das simulações foi realizado um teste de independência de malha, ou seja, fazia-se um refinamento da malha de maneira a definir se os resultados obtidos apresentavam variação pequena indicando que o resultado era independente da malha utilizada.

Para o teste foi utilizado o método do *Grid Convergence Index* (GCI). Durante uma simulação numérica pode-se encontrar diferentes fontes de erros numéricos, entre elas, erros de truncamento, iteração e arredondamento. Esses erros possuem magnitudes diferentes entre si e quando o erro de truncamento é único ou os outros erros têm magnitude desprezível em relação a este, tem-se o que é chamado de erro de discretização (Joeckel, 2010).

Quando é realizado o refinamento de uma malha, o que é feito na prática é diminuir o tamanho do elemento de malha, fazendo com que os pontos de simulação representem um percentual maior do espaço simulado. Fazendo uma extrapolação, se o tamanho do elemento de malha fosse zero, o erro de discretização se tornaria zero também, uma vez que teriasse uma malha representando fielmente a área simulada. O que o método GCI faz é avaliar se com o refino da malha ($h \rightarrow 0$) o erro torna-se constante ao chegar no que é chamada região assintótica (De Bortoli et al., 2015).

O cálculo do GCI é realizado por meio da Equação 3.13, onde F_s é um fator de segurança que deve ter valor de 3 quando são comparadas duas malhas ou 1,25 quando se trabalha com 3 ou mais malhas (Morais, 2004).

$$GCI = \frac{F_s |\epsilon|}{r^p - 1} \quad (3.13)$$

Já o valor de ϵ é obtido da diferença entre duas simulações consecutivas e o valor de p é chamado de ordem aparente e é calculado por meio da Equação 3.14, onde f é a variável a ser analisada e os subíndices 1, 2 e 3 representam as malhas, fina, grossa e super grossa respectivamente que forneceram os valores da variável f simulada (De Bortoli et al, 2015).

$$p = \frac{\log\left(\frac{f_3 - f_2}{f_2 - f_1}\right)}{\log(r)} \quad (3.14)$$

O valor de r é a razão de refino e deve ser constante para que essa avaliação possa ser feita e será obtido pela Equação 3.15.

$$r = \frac{h_3}{h_2} = \frac{h_2}{h_1} \quad (3.15)$$

Para verificar se o refinamento da malha é aceitável calcula-se a relação da Equação 3.16 de maneira que se o valor obtido estiver próximo de 1, então o refinamento encontra-se na região assintótica de convergência.

$$\frac{GCI_{23}}{r^p GCI_{12}} \sim 1 \quad (3.16)$$

As malhas testadas para cada uma das simulações com água foram expostas na Tabela 8 assim como o número de divisões em cada uma. Por se tratar de uma geometria simples, utilizou-se uma divisão de malhas estruturada e uniforme, ou seja, onde todos os seus elementos possuíam o mesmo formato quadrado, e sendo assim, o refinamento era definido por meio do número de divisões ao longo do comprimento e da altura do tubo.

As informações (número de divisões na direção axial \times número de divisões na direção radial) das malhas testadas em cada uma das simulações com glicerina são apresentadas na Tabela 9.

Importante ressaltar que da maneira como foi feito, o tamanho do elemento de malha sempre se alterava pela mesma razão de refino em todos os casos, garantindo assim a utilização do método GCI. Para respeitar a razão de refino da malha, algumas simulações utilizaram-se apenas de 3 ou 4 configurações devido ao limite de células que a versão utilizada do programa suportava.

Em todas as simulações, as condições iniciais eram definidas como a velocidade de entrada igual a sua correspondente nas tabelas. Na saída do tubo a pressão era definida como sendo igual a pressão atmosférica.

Para todos os casos, o procedimento para a avaliação do refino da malha consistia em realizar a simulação com as malhas indicadas nas tabelas anteriores e avaliar como primeira variável a queda de pressão ao longo do eixo do tubo.

A avaliação realizada para cada uma das malhas é apresentada na sessão de resultados e discussões.

Tabela 8 - Relação das malhas utilizadas para escoamento de água.

Simulação	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malha 5
Laminar 1	200x10	400x20	800x40	1600x80	3200x160
Laminar 2	800x10	1600x20	3200x40	6400x80	-
Laminar 3	1400x10	2800x20	5600x40	-	-
Turbulento	400x10	800x20	1600x40	3200x80	-
Transição 1	1500x5	3000x10	6000x20	12000x40	-

Transição 2	1750x5	3500x10	7000x20	-	-
Transição 3	2000x5	4000x10	8000x20	-	-

Tabela 9 - Relação das malhas utilizadas para a simulação com glicerina.

Simulação	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4
Glicerina – Laminar e Turbulenta	1000x5	2000x10	4000x20	8000x40
Glicerina - Transição	2000x5	4000x10	8000x20	-

3.8. Pós-processamento dos dados simulados

Para a obtenção de todos os parâmetros que foram avaliados, uma sequência de passos foi realizada, iniciando-se pela avaliação da queda de pressão ao longo do eixo do tubo.

A queda de pressão ao longo do eixo do tubo foi selecionada por ser a variável utilizada para indicar o ponto onde se encontrava o comprimento de entrada do tubo. Definido qual é o comprimento de entrada, é possível localizar uma região para se avaliar os valores de velocidade máxima do escoamento, além de possibilitar uma análise mais precisa do perfil de velocidade em cada um dos escoamentos analisados. Como mencionado anteriormente, o comprimento de entrada marca o ponto onde se tem o escoamento totalmente desenvolvido, ou seja, todo o escoamento no tubo a partir daquele ponto não sofre alterações no perfil de velocidade e a queda de pressão que acontece nessa parte da tubulação acontece linearmente ao longo do seu comprimento.

Também foi avaliada a queda de pressão ao longo do raio do tubo e concluiu-se que para uma mesma posição axial, a diferença de pressão no sentido radial é ínfima e por isso é possível considerar a queda de pressão só em uma reta ao longo do comprimento, uma vez que esta reta representa bem os valores de pressão em qualquer posição axial.

Com os valores de pressão ao longo do eixo de simetria da geometria simulada foi necessário se determinar em que ponto a queda de pressão tornava-se linear de maneira que fosse possível determinar, com isso, qual o ponto de comprimento de entrada. Para tal, foi realizado o cálculo da segunda derivada do conjunto de pontos da pressão ao longo do eixo. A primeira derivada desse conjunto de pontos indica qual a inclinação da reta formada caso sejam colocados num gráfico da pressão ao longo de x . Ao se calcular a derivada segunda desse mesmo conjunto de pontos, obtém-se em que momento a derivada se torna 0, indicando que a primeira derivada atingiu o seu valor linear, uma vez que a derivada de uma constante tem resultado zero. Quando o conjunto de pontos adquire valores lineares, a segunda derivada é zero e isso indica que para aquele valor de x , encontra-se no ponto de escoamento totalmente desenvolvido e, portanto, da entrada do tubo até aquele ponto tem-se o valor do comprimento de entrada do sistema.

Definido os valores de comprimento de entrada para cada uma das simulações, utilizou-se o GCI para definir se o refinamento realizado para a malha se encontrava na região assintótica de convergência.

Com o comprimento de entrada definido para a malha com o refinamento satisfatório de acordo com o GCI, selecionou-se um comprimento de tubo que fosse maior que o comprimento de entrada e naquele ponto foi traçada uma reta perpendicular à direção do escoamento. Nessa reta foram extraídos os valores de velocidade em função da posição radial permitindo que o perfil de velocidade do escoamento fosse traçado naquele posicionamento.

Os valores de velocidade no centro do tubo correspondem aos valores de velocidade máxima por estarem no local mais longe da parede e dessa forma sofrerem menos com o atrito entre o fluido e a parede. Esses valores também foram utilizados numa avaliação de GCI com o intuito de testar o método e reavaliar se o resultado obtido para o GCI com o comprimento de entrada era mantido quando se avaliava por meio dos valores de velocidade máxima do escoamento.

Algumas correlações teóricas foram utilizadas como referência de comparação tanto para os perfis de velocidades obtidos quanto para os valores de velocidade máxima no escoamento.

Vale ressaltar que durante o trabalho, o cálculo do coeficiente de atrito para a determinação do perfil de velocidade por meio da equação da lei de potência (2.20) foi realizado

por meio da Equação de Colebrook-White (2.17), da Equação de Haaland (2.18) e por meio da Equação de Prandtl (2.19) e nas três abordagens a diferença nos resultados obtidos por cada um dos métodos foi pequena e difícil de ser percebida nos gráficos de perfil de velocidade. Com isso optou-se por utilizar o fator de atrito obtido por meio da relação de Prandtl.

Após a definição da velocidade máxima e do perfil de velocidade, avaliou-se os valores de queda de pressão, ou seja, a diferença de pressão entre a entrada e a saída do tubo. A utilização dessa variável foi realizada com o intuito de se fazer uma avaliação global além das variáveis locais calculadas até então.

Para cada uma das simulações com glicerina, as comparações de comprimento de entrada, perfil de velocidade, velocidade máxima e queda de pressão ao longo do tubo com suas respectivas correlações também foram realizadas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Escoamento laminar

4.1.1. Laminar 1

Para a simulação Laminar 1 utilizou-se um tubo com comprimento de 0,1m, com velocidade de entrada da água de 0,01m/s e 5 configurações de malhas conforme demonstrado na Tabela 8

Com os valores de comprimento de entrada da Tabela 10, determinou-se a relação entre os GCIs dos refinamentos, indicando que a malha 3200x160 se encontrava na região assintótica apresentando um erro de 5,4%. Esses valores são apresentados na Tabela 11.

Tabela 10 - Comprimento de entrada em cada malha simulada do escoamento laminar 1.

Malha	L_{entrada} (m)
200x10	0,0905
400x20	0,0835
800x40	0,0613
1600x80	0,0516
3200x160	0,0488

Tabela 11 - Avaliação do GCI no escoamento laminar 1.

Malha	L_{entrada} (m)	GCI_g/GCI_f	Malha	L_{entrada} (m)	GCI_g/GCI_f	Malha	L_{entrada} (m)	GCI_g/GCI_f
200x10	0,0905		400x20	0,0835		800x40	0,0613	
400x20	0,0835	0,693	800x40	0,0613	0,891	1600x80	0,0516	0,946
800x40	0,0613		1600x80	0,0516		3200x160	0,0488	

Determinado o comprimento de entrada, comparou-se esse valor com os valores obtidos pelas correlações disponíveis na literatura e apresentados na Tabela 12.

A partir do resultado da simulação e dos valores obtidos por meio do cálculo teórico do perfil parabólico obteve-se o gráfico apresentado na Figura 4.1 onde foi possível perceber que o comportamento tanto da simulação quanto do perfil teórico são muito próximos para uma distância do centro do tubo maior que 0,003m. Entretanto, ao se avaliar para os valores de raios mais próximos do centro do tubo observou-se que a simulação trouxe menores valores de velocidade em relação ao perfil teórico.

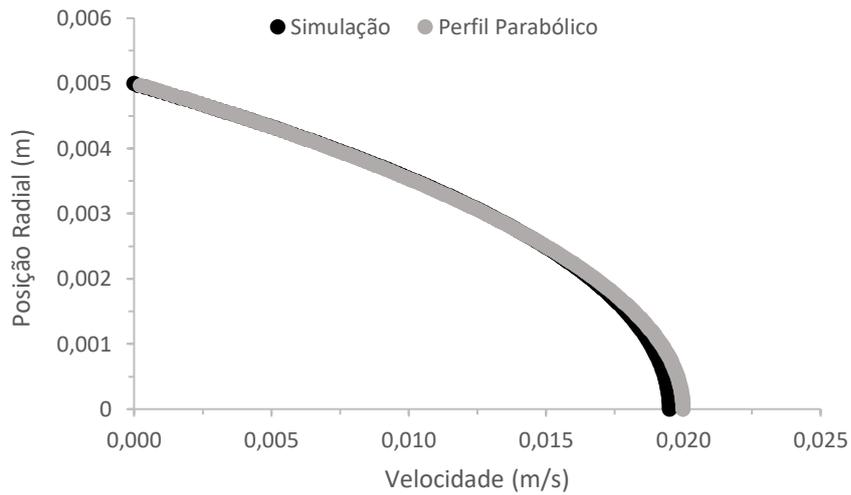
Tabela 12 - Comparação das correlações para comprimento de entrada no escoamento laminar 1.

Método de obtenção	L_{entrada} (m)
Simulação	0,0488
Kays	0,0500
Potter	0,0650
Schlichting	0,0600
Atkinson	0,0619
Chen	0,0624
Friedmann	0,0573

Comparando-se o valor de velocidade máxima obtida no centro do tubo por meio do perfil de velocidade parabólico com o valor obtido pela simulação foi possível perceber que há uma pequena diferença de apenas 2,45% entre eles conforme a Tabela 13 mostra.

Por último calculou-se a queda de pressão ao longo do tubo e os resultados obtidos foram apresentados na Tabela 14.

Figura 4.1 - Perfis de velocidade do escoamento laminar 1.



Fonte: Acervo pessoal

Tabela 13 - Valores de velocidade máxima obtidos para o escoamento laminar 1.

Método	Velocidade Máx (m/s)
Simulação	0,0195
Perfil Parabólico	0,0200
Erro relativo	2,45%

Tabela 14 - Queda de pressão no tubo para escoamento laminar 1.

Método	ΔP (Pa)
Teórico	0,37087
Simulação	0,36884
Erro relativo	-0,55%

4.1.2. Laminar 2

Para a simulação Laminar 2 utilizou-se um tubo com comprimento de 0,4m, com velocidade de entrada da água de 0,05m/s e obteve-se os comprimentos de entrada para cada uma das 4 configurações de malhas como detalhado na Tabela 15.

Tabela 15 - Comprimento de entrada em cada malha simulada do escoamento laminar 2.

Malha	L_{entrada} (m)
800x10	0,3004
1600x20	0,2679
3200x40	0,2633
6400x80	0,2490

Com os valores de comprimento de entrada, determinou-se a relação entre os GCIs dos refinamentos realizados, indicando que a malha 3200x40 se encontrava na região assintótica apresentando um erro de apenas 1,7%, enquanto a malha mais refinada (6400x80) apresentou um erro de 5,4%. Dados apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Avaliação do GCI no escoamento laminar 2.

Malha	L_{entrada} (m)	GCI_g / GCI_f	Malha	L_{entrada} (m)	GCI_g / GCI_f
800x10	0,3004		1600x20	0,2679	
1600x20	0,2679	0,983	3200x40	0,2633	0,946
3200x40	0,2633		6400x80	0,2490	

Determinado o comprimento de entrada, comparou-se esse valor com os valores indicados pelas correlações na literatura, conforme a Tabela 17.

Tabela 17 - Comparação das correlações para comprimento de entrada no escoamento laminar 2.

Método de obtenção	L_{entrada} (m)
Simulação	0,2633
Kays	0,2490
Potter	0,3237
Schlichting	0,2988
Atkinson	0,2848
Chen	0,3041
Friedmann	0,2792

É possível notar que o valor obtido na simulação foi maior do que o indicado pela correlação de Kays, diferentemente do que foi observado na simulação anterior (Laminar 1), onde o valor da simulação foi menor do que todas as correlações avaliadas.

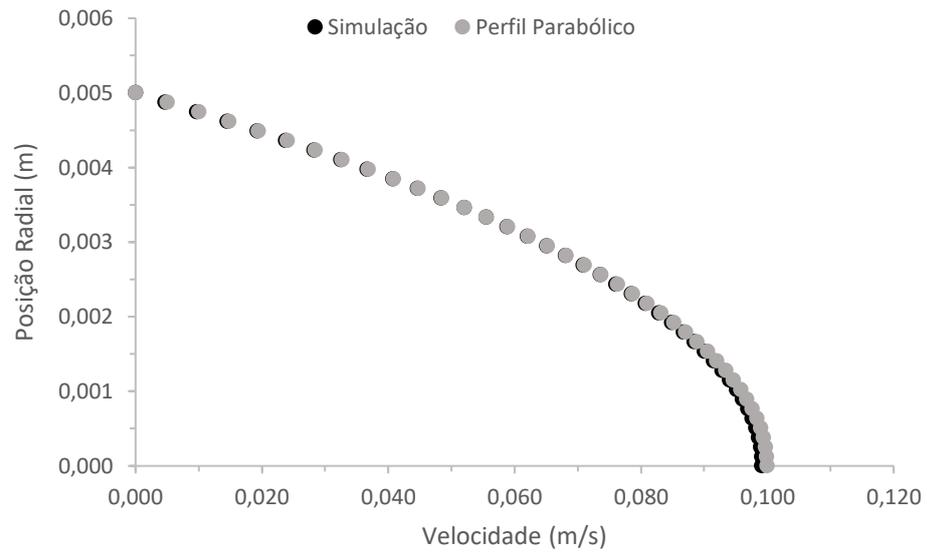
A comparação entre os resultados de velocidade obtidos da simulação e os valores obtidos por meio do cálculo teórico do perfil parabólico foi exposta na Figura 4.2.

Observou-se que a diferenciação entre os pontos teóricos e os pontos da simulação pode ser realizada para um intervalo de posição radial muito parecido com a simulação anterior, entretanto o destacamento observado em termos de velocidade em cada ponto foi menor.

Comparou-se o valor de velocidade máxima obtida no centro do tubo por meio do perfil de velocidade parabólico com o valor obtido pela simulação. O erro relativo nesse caso diminuiu para apenas 1,55%, conforme pode ser observado na Tabela 18.

Por último calculou-se a queda de pressão ao longo do tubo e os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 19 a seguir.

Figura 4.2 - Perfis de velocidade do escoamento laminar 2.



Fonte: Acervo pessoal

Tabela 18 - Valores de velocidade máxima obtidos para o escoamento laminar 2.

Método	Velocidade Máx (m/s)
Simulação	0,1969
Perfil Parabólico	0,2000
Erro relativo	1,55%

Tabela 19 - Queda de pressão no tubo para escoamento laminar 2.

Método	ΔP (Pa)
Teórico	7,6669
Simulação	7,8029
Erro relativo	1,77 %

4.1.3. Laminar 3

Para a simulação Laminar 3 utilizou-se um tubo com comprimento de 0,7m, com velocidade de entrada da água de 0,1m/s e obteve-se os comprimentos de entrada para cada uma das 3 configurações de malhas como detalhado na Tabela 20.

Tabela 20 - Comprimento de entrada em cada malha simulada do escoamento laminar 3.

Malha	L_{entrada} (m)
1400x10	0,4884
2800x20	0,5045
5600x40	0,5185

Mesmo com apenas 3 malhas, utilizou-se o GCI para verificar se a proximidade com o valor de 1 existia. Mais opções de malhas não foram testadas por conta de excederem o limite de elementos suportados pela versão utilizada do programa.

Com os valores de comprimento de entrada da tabela, a relação entre os GCIs dos refinamentos foi determinada, indicando que a malha 5600x40 encontrava-se na região assintótica apresentando um erro de apenas 2,8% conforme visto na Tabela 21.

Tendo determinado o comprimento de entrada, comparou-se esse valor com os valores indicados pelas correlações apresentadas na literatura, cujos dados foram disponibilizados na Tabela 22.

Através da comparação entre o resultado da simulação e os valores obtidos por meio do cálculo teórico do perfil parabólico, foi possível obter o gráfico apresentado na Figura 4.3.

Tabela 21 - Avaliação do GCI no escoamento laminar 3.

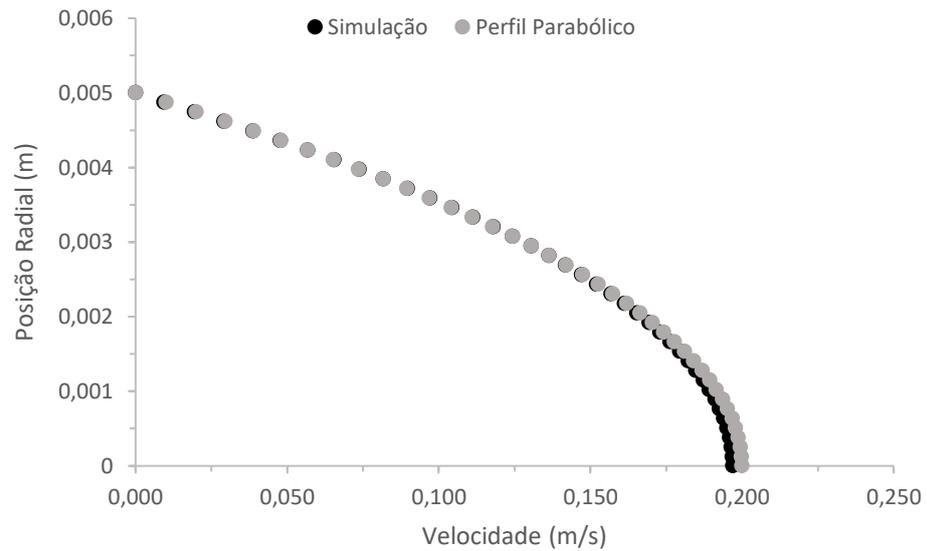
Malha	L_{entrada} (m)	GCI_g / GCI_f
1400x10	0,4884	
2800x20	0,5045	1,028
5600x40	0,5185	

Tabela 22 - Comparação das correlações para comprimento de entrada no escoamento laminar 3.

Método de obtenção	L_{entrada} (m)
Simulação	0,5185
Kays	0,4975
Potter	0,6468
Schlichting	0,5970
Atkinson	0,5631
Chen	0,6071
Friedmann	0,5574

Comparou-se o valor de velocidade máxima obtida no centro do tubo por meio do perfil de velocidade parabólico e comparou-se com o valor obtido pela simulação. O erro tornou-se menor do que o obtido na simulação laminar 2, sendo de 0,85%, conforme observou-se na Tabela 23.

Figura 4.3 - Perfis de velocidade do escoamento laminar 3.



Fonte: Acervo pessoal

Tabela 23 - Valores de velocidade máxima obtidos para o escoamento laminar 3.

Método	Velocidade Máx (m/s)
Simulação	0,0992
Perfil Parabólico	0,1000
Erro relativo	0,85%

Por último calculou-se a queda de pressão ao longo do tubo e os resultados obtidos foram colocados na Tabela 24.

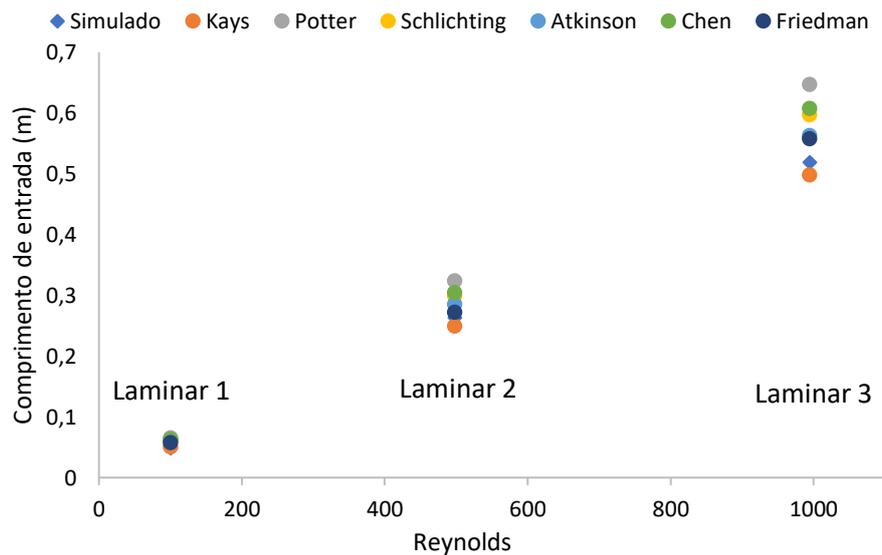
Após avaliação dos resultados de comprimento de entrada para as 3 simulações para escoamento laminar observou-se que as correlações fizeram previsões do comprimento de entrada muito próximas entre si, principalmente para as situações com menor Reynolds (simulação 1) e que quando ocorre aumento no número de Reynolds, tem-se valores com maiores diferenças entre si, mas de maneira geral, a relação proposta por Kays é a que mais se aproximou dos valores de comprimento de entrada obtidos por simulação. O gráfico

apresentado na Figura 4.4 resume este comportamento, sendo possível observar o acúmulo de pontos em um mesmo local ($y=0,05m$) para a primeira simulação e como eles tornam se mais espaçados ao serem comparados com a segunda ($0,25m < y < 0,32m$) e terceira simulação ($0,5m < y < 0,65m$).

Tabela 24 - Queda de pressão no tubo para escoamento laminar 3.

Método	ΔP (Pa)
Teórico	27,458
Simulação	28,186
Erro relativo	2,65%

Figura 4.4 - Comparação entre as correlações para comprimento de entrada no escoamento laminar.



Fonte: Acervo pessoal

Além disso, analisando as Tabelas 13, 18 e 23, percebeu-se que os erros relativos com relação aos valores de velocidade máxima foram diminuindo com o aumento do número de

Reynolds, mostrando uma eficácia maior das correlações para Reynolds maiores e que ainda permanecem dentro do escoamento laminar.

4.2. Escoamento turbulento

4.2.1. Turbulento 1

Para a simulação de escoamento Turbulento 1 utilizou-se um tubo com comprimento de 0,2m, com velocidade de entrada da água de 0,5m/s e obteve-se os comprimentos de entrada para cada uma das 4 configurações de malhas conforme disposto na Tabela 25.

Tabela 25 - Comprimento de entrada em cada malha simulada do escoamento turbulento 1.

Malha	L_{entrada} (m)
400x10	0,1634
800x20	0,1304
1600x40	0,1209
3200x80	0,1125

Com os valores de comprimento de entrada da Tabela 25 se determinou a relação entre os GCIs dos refinamentos, indicando que a malha 3200x80 se encontrava na região assintótica apresentando um erro de 6,9%. Estes dados podem ser observados na Tabela 26.

Tabela 26 - Avaliação do GCI no escoamento turbulento 1.

Malha	L_{entrada} (m)	GCI_g/GCI_f	Malha	L_{entrada} (m)	GCI_g/GCI_f
400x10	0,1634		800x20	0,1304	
800x20	0,1304	0,927	1600x40	0,1209	0,931
1600x40	0,1209		3200x80	0,1125	

Determinado o comprimento de entrada, comparou-se esse valor com os valores obtidos pelas correlações na literatura e foram apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 - Comparação das correlações para comprimento de entrada no escoamento turbulento 1.

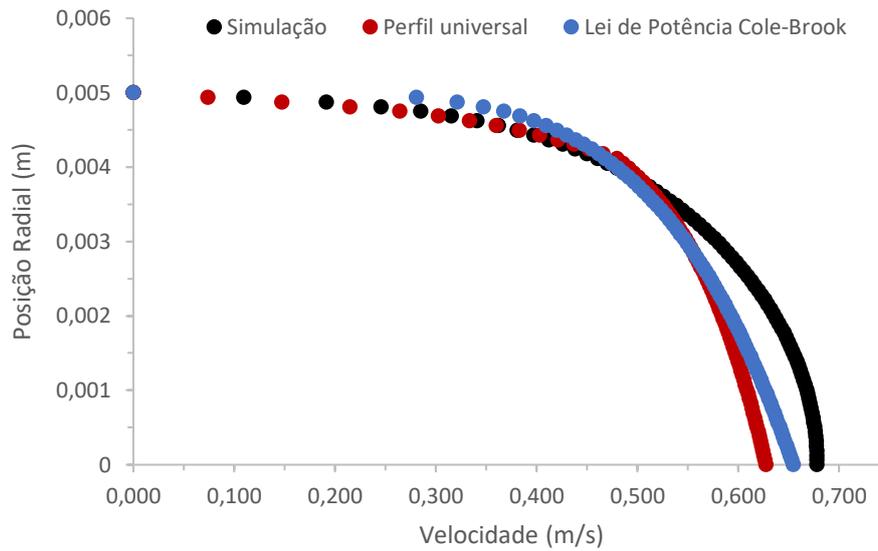
Método de obtenção	L_{entrada} (m)
Simulação	0,1125
Bhatti	0,1141
Potter	0,1859
10 Diâmetro	0,1000

Observou-se que o dado de comprimento de entrada da simulação ficou mais próxima da relação de Bhatti, com uma diferença de apenas 1,6mm.

Os dados de velocidade da simulação e os valores obtidos por meio do cálculo teórico do perfil universal e da lei de potência foram dispostos na Figura 4.5. Foi possível observar que, partindo da parede do tubo, o comportamento dos dados simulados foi muito próximo ao comportamento do perfil universal. A partir da posição 0,004m em direção ao centro do tubo, o perfil universal e o perfil da lei de potência assumiram comportamentos mais próximos e com uma variação menor da velocidade do que quando comparados com o perfil simulado, que tiveram variações maiores da velocidade e seu perfil adquiriu um formato com arco mais definido. Para os valores de raio 0 até 0,0015m foi possível perceber que o comportamento do perfil universal e do perfil da lei de potência começam a se diferenciar novamente, sendo que o universal apresenta menores valores de velocidade. Os valores simulados continuaram de maneira que o formato da curva é menos achatado do que o fornecido pelas duas outras equações.

Comparando o valor de velocidade máxima obtida no centro do tubo por meio do perfil universal e por meio da lei de potência, observou-se que esta última apresenta uma aproximação maior com o valor obtido por meio da simulação conforme é possível observar na Tabela 28.

Figura 4.5 - Perfis de velocidade do escoamento turbulento 1.



Fonte: Acervo pessoal

Tabela 28 - Valores de velocidade máxima obtidos para o escoamento turbulento 1.

Método	Velocidade Máx (m/s)	Erro Relativo
Simulação	0,6783	-
Perfil Universal	0,6278	-8,04%
Lei de Potência	0,6546	-3,62%

Por último calculou-se a queda de pressão ao longo do tubo, cujos resultados obtidos foram apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 - Queda de pressão no tubo para escoamento turbulento 1.

Método	ΔP (Pa)
Teórico	218,238
Simulação	239,21
Erro relativo	9,61%

4.2.2. Turbulento 2

Para a simulação de escoamento Turbulento 2 utilizou-se um tubo com comprimento de 0,2m, com velocidade de entrada da água de 0,7m/s e obteve-se os comprimentos de entrada para cada uma das 4 configurações de malhas como detalhado na Tabela 30.

Tabela 30 - Comprimento de entrada em cada malha simulada do escoamento turbulento 2.

Malha	L_{entrada} (m)
400x10	0,1895
800x20	0,1875
1600x40	0,1269
3200x80	0,1125

Com os valores de comprimento de entrada da Tabela 30 se determinou a relação entre os GCIs dos refinamentos, indicando que a malha 3200x80 se encontrava na região assintótica apresentando um erro de 11,3% como pode ser visto na Tabela 31.

Determinado o comprimento de entrada, comparou-se esse valor com os valores indicados pelas correlações na literatura e os resultados são expostos na Tabela 32.

Tabela 31 - Avaliação do GCI no escoamento turbulento 2.

Malha	$L_{entrada}$ (m)	GCI_g/GCI_f	Malha	$L_{entrada}$ (m)	GCI_g/GCI_f
400x10	0,1895		800x20	0,1875	
800x20	0,1875	0,677	1600x40	0,1269	0,887
1600x40	0,1269		3200x80	0,1125	

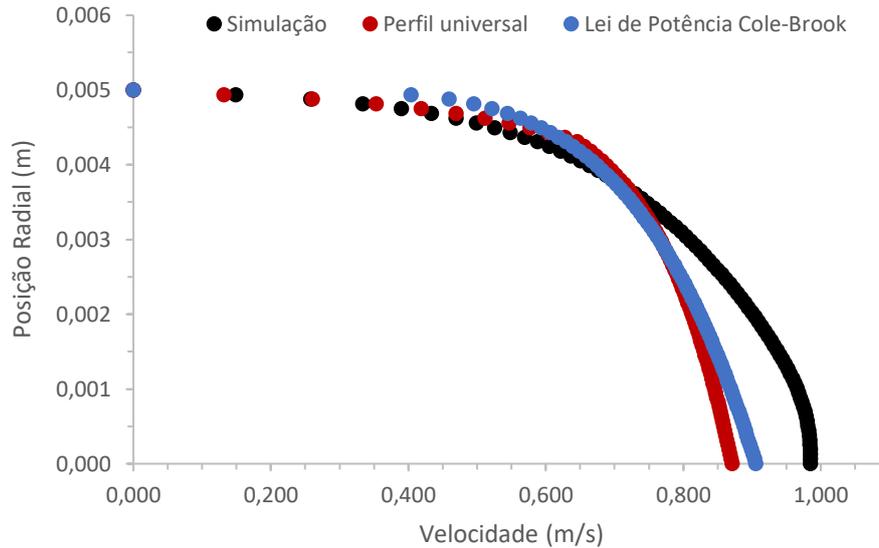
Tabela 32 - Comparação das correlações para comprimento de entrada no escoamento turbulento 2.

Método de obtenção	$L_{entrada}$ (m)
Simulação	0,1125
Bhatti	0,1263
Potter	0,1989
10 Diâmetro	0,1000

Observou-se que assim como na simulação anterior, o valor de comprimento de entrada ficou muito mais próximo da previsão fornecida por Kays enquanto a relação apresentada por Potter ficou bem mais distante dos outros dois.

Plotou-se o resultado da simulação e os valores obtidos por meio do cálculo teórico do perfil universal e da lei de potência. A comparação pode ser verificada na Figura 4.6 a seguir.

Figura 4.6 - Perfis de velocidade do escoamento turbulento 2.



Fonte: Acervo pessoal

Neste gráfico os valores simulados e os obtidos pelo perfil universal começaram a se distanciar já na posição radial de valor 0,0045m. Também é nesse ponto que o perfil universal e a lei de potência passaram a ter um comportamento de velocidade muito próximos até o valor de raio igual à 0,0035m. Desse ponto em diante percebeu-se que o achatamento da curva é mais acentuado para a relação do perfil universal do que para as outras curvas. Além disso, observou-se que a curva com os pontos experimentais teve um achatamento mais acentuado que na simulação anterior.

Comparou-se o valor de velocidade máxima obtida no centro do tubo obtida por meio das três simulações e observou-se que a lei de potência continua sendo a que mais se aproxima do valor obtido na simulação, porém, em ambas as curvas o erro entre o valor simulado e o predito pela equação aumentaram em relação à simulação anterior, como observou-se na Tabela 33.

Tabela 33 - Valores de velocidade máxima obtidos para o escoamento turbulento 2.

Método	Velocidade Máx (m/s)	Erro Relativo
Simulação	0,9855	-
Perfil Universal	0,8712	-13,12%
Lei de Potência	0,9057	-8,81%

Por último calculou-se a queda de pressão ao longo do tubo e os resultados obtidos foram colocados na Tabela 34.

Tabela 34 - Queda de pressão no tubo para escoamento turbulento 2.

Método	ΔP (Pa)
Teórico	411,16
Simulação	355,52
Erro relativo	-13,53%

4.2.3. Turbulento 3

Para a simulação de escoamento Turbulento 3 utilizou-se um tubo com comprimento de 0,2m, com velocidade de entrada da água de 1,0m/s e 4 configurações de malhas que podem ser observadas na Tabela 35, juntamente com o comprimento de entrada obtido em cada uma de suas simulações.

Não foi possível encontrar um valor para o comprimento de entrada no caso da malha mais grosseira por não haver um resultado que diante dos critérios se apresentasse como característico de que a curva de queda de pressão pelo comprimento tenha ficado linear. Uma justificativa para isso é o fato de malhas com poucas divisões apresentarem uma diferença entre os valores em cada um de seus nós em que a diferença seja maior do que a esperada para se dizer que a derivada segunda é constante.

Tabela 35 - Comprimento de entrada em cada malha simulada do escoamento turbulento 3.

Malha	L_{entrada} (m)
400x10	-
800x20	0,1875
1600x40	0,1618
3200x80	0,1333

Com os valores de comprimento de entrada da Tabela 35 se determinou a relação entre os GCIs dos refinamentos, indicando que a malha 3200x80 se encontrava na região assintótica apresentando um erro de 17,6% conforme mostre a Tabela 36

Tabela 36 - Avaliação do GCI no escoamento turbulento 3.

Malha	L_{entrada} (m)	GCI_g / GCI_f
800x20	0,1875	
1600x40	0,1618	0,824
3200x80	0,1333	

Determinado o comprimento de entrada, comparou-se esse valor com os valores indicados pelas correlações na literatura conforme a Tabela 37.

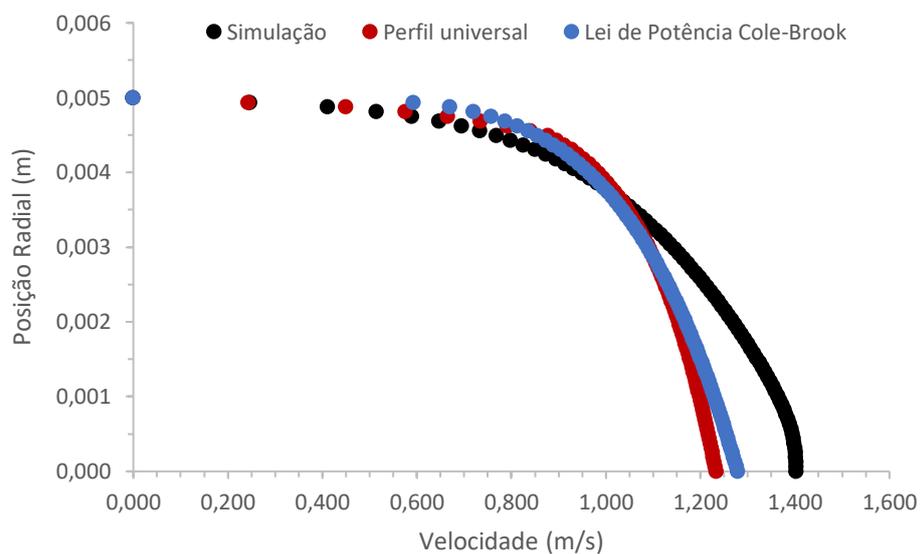
Observou-se que, mais uma vez, o resultado da simulação fica mais próximo da correlação de Bhatti do que da correlação proposta por Potter.

Tabela 37 - Comparação das correlações para comprimento de entrada no escoamento turbulento 3.

Método de obtenção	L_{entrada} (m)
Simulação	0,1333
Bhatti	0,1357
Potter	0,2087
10 Diâmetro	0,1000

Plotou-se o resultado da simulação e os valores obtidos por meio do cálculo teórico do perfil universal e da lei de potência. A comparação pode ser verificada na Figura 4.7.

Figura 4.7 - Perfis de velocidade do escoamento turbulento 3.



Fonte: Acervo pessoal

Notou-se que a diferenciação entre os valores simulados e os valores do perfil universal também começaram a acontecer por volta da posição radial 0,0045m assim como na simulação anterior. Neste caso os valores de perfil universal e lei de potência se comportaram de maneira muito próxima por um comprimento maior do que na simulação anterior, tendo esse

comportamento sido observado até a posição de raio 0,002m. O perfil universal continuou apresentando o achatamento de curva mais brusco enquanto os pontos da simulação o perfil menos brusco e com formato muito mais próximo da simulação 2 do que da simulação 1.

Comparou-se o valor de velocidade máxima obtida no centro do tubo por meio do perfil de velocidade parabólico e comparou-se com o valor obtido pela simulação na Tabela 38.

Tabela 38 - Valores de velocidade máxima obtidos para o escoamento turbulento 3.

Método	Velocidade Máx (m/s)	Erro Relativo
Simulação	1,4030	-
Perfil Universal	1,2336	-13,73%
Lei de potência	1,2794	-9,66%

Observou-se que o valor de velocidade máxima obtido por meio da lei de potência ainda foi o mais próximo do obtido por meio da simulação. Olhando para a simulação anterior, ainda foi possível perceber que o valor de erro relativo se alterou pouco em relação à simulação anterior, diferentemente do que aconteceu quando observou-se um salto maior nessa métrica ao comparar-se a mudança da simulação 1 para a 2.

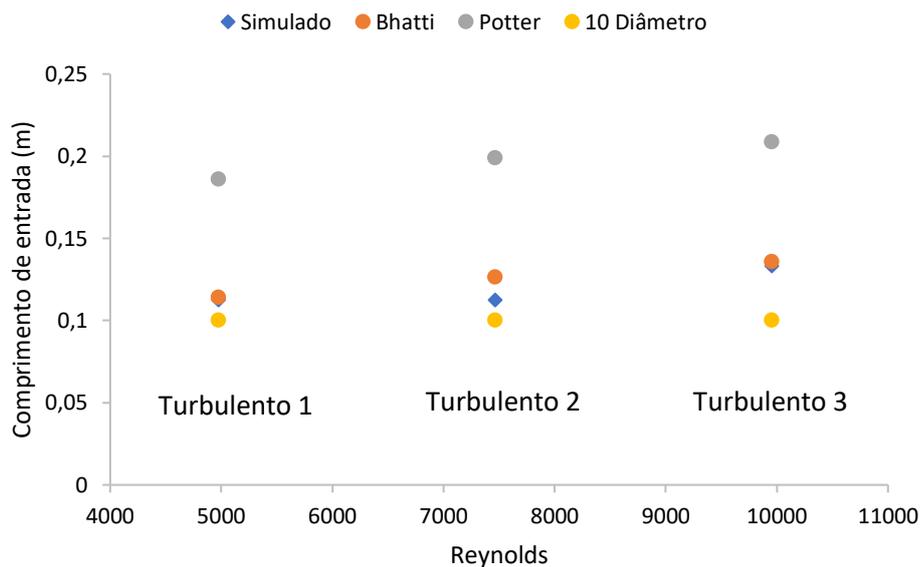
Por último calculou-se a queda de pressão ao longo do tubo e os resultados obtidos foram colocados na Tabela 39.

Tabela 39 - Queda de pressão no tubo para escoamento turbulento 3.

Método	ΔP (Pa)
Teórico	807,83
Simulação	618,01
Erro relativo	-23,50%

Após avaliação dos resultados de comprimento de entrada para as 3 simulações observou-se na Figura 4.8 que a simulação ficou muito próxima do valor obtido por meio da relação proposta por Bhatti, principalmente no primeiro e terceiro caso. No segundo caso, o valor da simulação ficou entre o valor obtido pela correlação de Bhatti e a aproximação de $L = 10D$, não seguindo a tendência de crescimento que foi vista nos valores das simulações 1 e 3.

Figura 4.8 - Comparação entre as correlações para comprimento de entrada no escoamento turbulento



Fonte: Acervo pessoal

Diferentemente do observado no escoamento laminar, o aumento do número de Reynolds para cada uma das simulações não levou a uma redução do erro relativo para os valores de velocidade máxima obtidos. No caso turbulento os erros aumentaram, porém, sem grandes saltos nos valores quando se avalia as simulações 2 e 3 que são as que apresentaram maiores números de Reynolds.

4.3. Escoamento transição

4.3.1. Transição 1

Para a simulação Transição 1 utilizou-se um tubo com comprimento de 1,5m, com velocidade de entrada da água de 0,25m/s e obteve-se os comprimentos de entrada para cada

uma das 4 configurações de malhas, tanto na abordagem laminar quanto na abordagem turbulenta, conforme foi apresentado na Tabela 40

Tabela 40 - Comprimento de entrada em cada malha simulada do escoamento de transição 1.

Malha	L _{entrada} (m) - Laminar	L _{entrada} (m) - Turbulento
1500x5	-	0,3183
3000x10	0,979	0,2252
6000x20	1,027	0,2027
12000x40	1,0781	0,1967

Com os valores de comprimento de entrada da tabela se determinou a relação entre os GCIs dos refinamentos, indicando que a malha 12000x40 se encontrava na região assintótica em ambos os casos e apresentando erro de 5,0% no caso com abordagem laminar e 3,0% na abordagem turbulenta conforme foi exposto nas Tabela 41 e Tabela 42.

Tabela 41 - Avaliação do GCI no escoamento de transição com abordagem laminar 1.

Malha	L _{entrada} (m)	GCI_g / GCI_f
3000x10	0,9790	
6000x20	1,0270	1,050
12000x40	1,0781	

Tabela 42 - Avaliação do GCI no escoamento de transição com abordagem turbulenta 1.

Malha	$L_{entrada}$ (m)	GCI_g/GCI_f	Malha	$L_{entrada}$ (m)	GCI_g/GCI_f
1500x5	0,3183		3000x10	0,2252	
3000x10	0,2252	0,900	6000x20	0,2027	0,970
6000x20	0,2027		12000x40	0,1967	

Determinado o comprimento de entrada, comparou-se esse valor com os valores indicados pelas correlações na literatura tanto para a abordagem laminar quanto para a abordagem turbulenta, conforme ilustrado na Tabela 43

Tabela 43 -Comparação das correlações para comprimento de entrada no escoamento de transição 1.

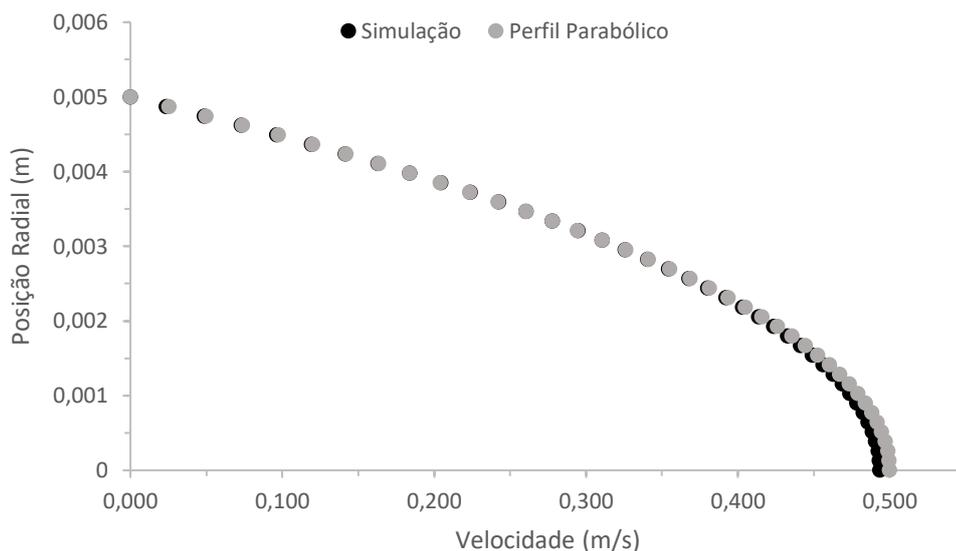
Método de obtenção	$L_{entrada}$ (m) - Laminar	Método de obtenção	$L_{entrada}$ (m) - Turbulento
Simulação	1,0781	Simulação	0,1967
Kays	1,2440	Bhatti	0,0960
Potter	1,6172	Potter	0,1656
Schlichting	1,4928	10 Diâmetro	0,1000
Atkinson	1,3992		
Chen	1,5178		
Friedmann	1,3933		

Observou-se que na abordagem laminar, o valor simulado fica abaixo dos valores preditos pelas correlações avaliadas. Já na abordagem turbulenta, a simulação fica acima dos valores da literatura. Outra constatação foi que a diferença entre o resultado obtido na simulação laminar e o valor de correlação mais próximo (Bhatti) apresentou uma diferença de 0,1659 m/s

(13,34%), enquanto na abordagem turbulenta, a diferença entre a simulação e a correlação de Potter foi de 0,0311 m/s (18,78%).

Plotou-se o resultado da simulação e os valores obtidos por meio do cálculo teórico do perfil parabólico para a abordagem laminar e o cálculo teórico do perfil universal e da lei de potência para a abordagem turbulenta. As comparações podem ser verificadas nas Figuras 4.9 e 4.10.

Figura 4.9 - Perfis de velocidade do escoamento de transição com abordagem laminar 1.

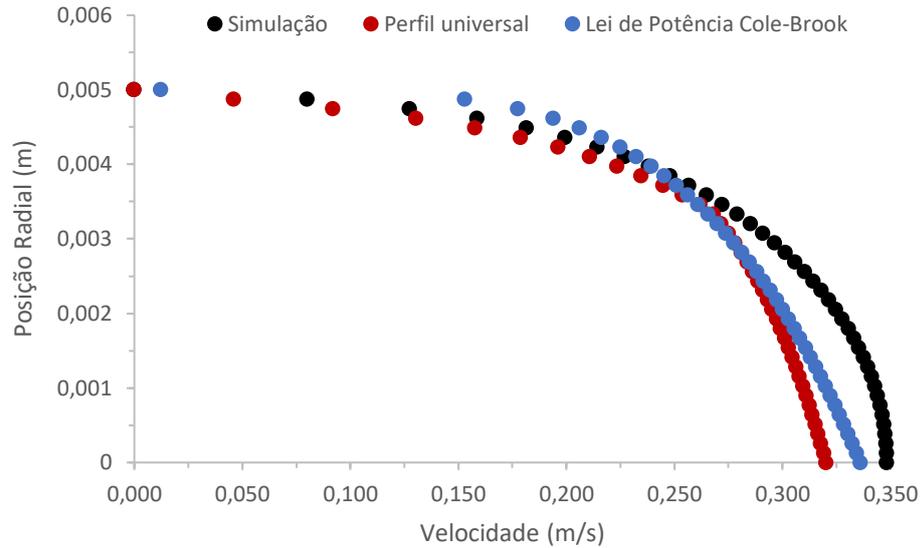


Fonte: Acervo pessoal

O perfil de velocidade simulado com a abordagem laminar foi muito próximo quando se compara com os valores obtidos para o perfil parabólico, sendo possível observar diferenciação apenas para posição radial $< 0,002\text{m}$.

Já na abordagem turbulenta, parte do que foi visto para as simulações com Reynolds turbulento voltou a acontecer. Os valores de velocidade obtidos pelo perfil universal e pela lei de potência se mantiveram muito próximos para casos em que $0,025\text{m} < y < 0,035\text{m}$. O achatamento do perfil de velocidade foi menos intenso para o perfil obtido pela simulação do que para os perfis obtidos pela lei de potência e perfil universal, além de que o perfil da simulação se aproximou bastante do perfil obtido para a simulação 1 do escoamento turbulento.

Figura 4.10 - Perfis de velocidade do escoamento de transição com abordagem turbulenta 1.



Fonte: Acervo pessoal

Comparou-se o valor de velocidade máxima obtida no centro do tubo por meio da simulação com o perfil parabólico para o caso da abordagem laminar (Tabela 44) e com o perfil universal e a lei de potência para o caso da abordagem turbulenta (Tabela 45).

Tabela 44 - Valores de velocidade máxima obtidos para o escoamento de transição com abordagem laminar 1.

Método	Velocidade Máx (m/s)
Simulação	0,4934
Perfil Parabólico	0,5
Erro relativo	1,32%

Tabela 45 - Valores de velocidade máxima obtidos para o escoamento de transição com abordagem turbulenta 1.

Método	Velocidade Máx (m/s)	Erro Relativo
Simulação	0,3484	-
Perfil Universal	0,3204	-8,04%
Lei de Potência	0,3363	-3,62%

Foi possível verificar que a abordagem laminar trouxe valores de velocidade máxima mais próximos dos valores simulados do que os obtidos na abordagem turbulenta.

Outra observação interessante foi que na abordagem laminar, a simulação apresenta valores inferiores do proposto na literatura, já na abordagem turbulenta, acontece o contrário, tendo os valores da literatura menores do que o valores obtidos pela simulação.

Por último calculou-se a queda de pressão ao longo do tubo e os resultados obtidos foram colocados na Tabela 46.

Tabela 46 - Queda de pressão no tubo para escoamento de transição 1.

Método	ΔP – Laminar (Pa)	ΔP – Turbulento (Pa)
Teórico	151,55	247,05
Simulação	157,01	565,35
Erro relativo	3,60%	128,84%

4.3.2. Transição 2

Para a simulação Transição 2 utilizou-se um tubo com comprimento de 1,75m, com velocidade de entrada da água de 0,30m/s e obteve-se os comprimentos de entrada para cada uma das 3 configurações de malhas, tanto na abordagem laminar quanto na abordagem turbulenta conforme apresentado na Tabela 47

Tabela 47 - Comprimento de entrada em cada malha simulada do escoamento de transição 2.

Malha	L_{entrada} (m) - Laminar	L_{entrada} (m) - Turbulento
1750x5	1,6887	0,2960
3500x10	1,6852	0,2452
7000x20	1,6835	0,2277

Com os valores de comprimento de entrada da Tabela 47 se determinou a relação entre os GCIs dos refinamentos, indicando que a malha 7000x20 se encontrava na região assintótica em ambos os casos e apresentando erro de 0,1% no caso com abordagem laminar e 7,1% na abordagem turbulenta conforme apresentado nas Tabela 48 e Tabela 49

Tabela 48 - Avaliação do GCI no escoamento de transição com abordagem laminar 2.

Malha	L_{entrada} (m)	GCI_g / GCI_f
1750x5	1,6887	
3500x10	1,6852	0,999
7000x20	1,6835	

Tabela 49 - Avaliação do GCI no escoamento de transição com abordagem turbulenta 2.

Malha	L_{entrada} (m)	GCI_g / GCI_f
1750x5	0,2960	
3500x10	0,2452	0,929
7000x20	0,2277	

Determinado o comprimento de entrada, comparou-se esse valor com os valores indicados pelas correlações na literatura para a abordagem laminar e turbulenta, conforme Tabela 50.

Tabela 50 - Comparação das correlações para comprimento de entrada no escoamento de transição 2.

Método de obtenção	L_{entrada} (m) - Laminar	Método de obtenção	L_{entrada} (m) - Turbulento
Simulação	1,6835	Simulação	0,2277
Kays	1,4930	Bhatti	0,1055
Potter	1,9409	Potter	0,1708
Schlichting	1,7916	10 Diâmetro	0,1000
Atkinson	1,6781		
Chen	1,8215		
Friedmann	1,6722		

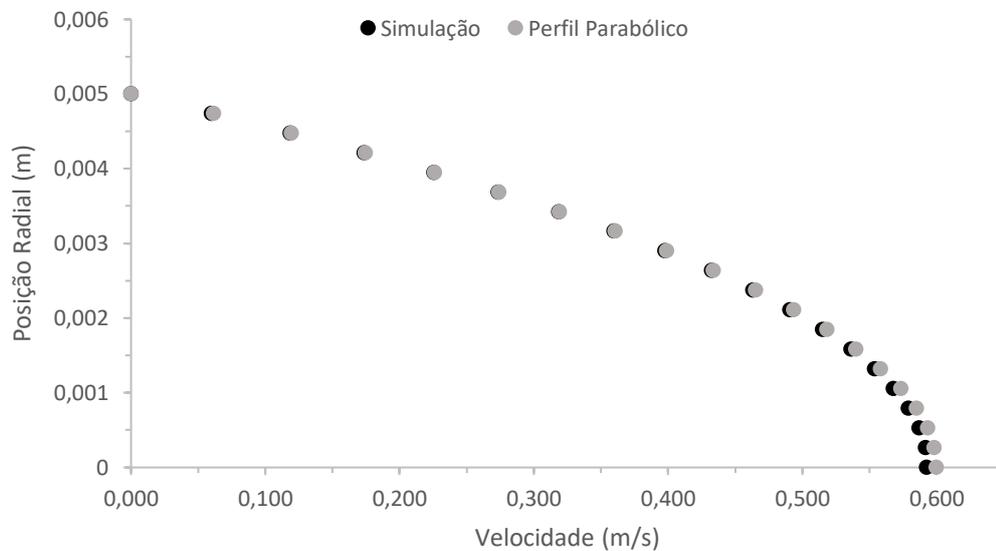
Diferente do que foi observado para a simulação anterior, o valor simulado na abordagem laminar não apresentou um valor inferior do que o resultado obtido pelas correlações. Neste caso o valor simulado foi superior a três das correlações propostas (Kays,

Fridmann e Atkinson) e inferior à outras três (Schlichting, Chen e Potter), sendo mais próximo da correlação apresentada por Atkinson.

Já na abordagem turbulenta a simulação continuou apresentando valores maiores do que os obtidos nas correlações propostas, além de ter uma diferença tanto absoluta quanto relativa maiores do que as obtidas na simulação anterior.

Plotou-se o resultado da simulação e os valores obtidos por meio do cálculo teórico do perfil parabólico para a abordagem laminar e o cálculo teórico do perfil universal e da lei de Potência para a abordagem turbulenta. A comparação pode ser verificada nas Figuras 11 e 12 a seguir.

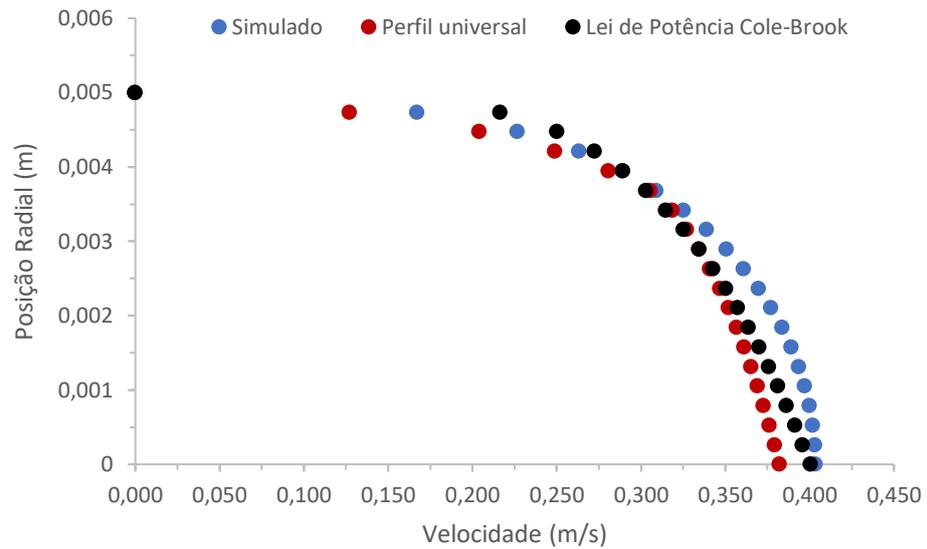
Figura 4.11 - Perfis de velocidade do escoamento de transição com abordagem laminar 2.



Fonte: Acervo pessoal

No caso do perfil obtido para a abordagem laminar, a diferenciação entre valores teóricos e valores simulados começou a ficar evidente com uma posição radial de 0,0025m, ou seja, um pouco antes do observado para a simulação anterior.

Figura 4.12 - Perfis de velocidade do escoamento de transição com abordagem turbulenta 2.



Fonte: Acervo pessoal

Já na abordagem turbulenta, observou-se que a diferença entre os valores de velocidade para a simulação e os valores obtidos pelo perfil universal e lei de potência ficaram menos distantes entre si, embora o achatamento da curva ainda fosse menos intenso nos valores simulados.

Realizou-se a comparação dos valores de velocidade máxima tanto para a abordagem laminar (Tabela 51) quanto para a abordagem turbulenta (Tabela 52) de acordo com os valores de referência na literatura em cada um dos casos.

Tabela 51 - Valores de velocidade máxima obtidos para o escoamento de transição com abordagem laminar 2.

Método	Velocidade Máx (m/s)
Simulação	0,5929
Perfil Parabólico	0,6
Erro relativo	1,18%

Tabela 52 - Valores de velocidade máxima obtidos para o escoamento de transição com abordagem turbulenta 2.

Método	Velocidade Máx (m/s)	Erro Relativo
Simulação	0,4033	-
Perfil Universal	0,3823	-5,49%
Lei de Potência	0,4005	-0,70%

Foi possível notar que nesse caso, tanto a abordagem laminar quanto a abordagem turbulenta apresentaram menores diferenças entre os valores simulados e os valores de referência. Além de que, assim como o caso anterior, a abordagem laminar trouxe simulações com valores inferiores aos valores propostos na literatura e na abordagem turbulenta esses valores foram superiores aos de referência.

Por último calculou-se a queda de pressão ao longo do tubo e os resultados obtidos foram colocados na Tabela 53.

Tabela 53 - Queda de pressão no tubo para escoamento de transição 2.

Método	ΔP – Laminar (Pa)	ΔP – Turbulento (Pa)
Teórico	213,42	387,60
Simulação	221,67	729,61
Erro relativo	3,87%	88,24%

4.3.3. Transição 3

Para a simulação Transição 3 utilizou-se um tubo com comprimento de 2m, com velocidade de entrada da água de 0,35m/s e foram obtidos os comprimentos de entrada para cada uma das 3 configurações de malhas, tanto na abordagem laminar quanto na abordagem turbulenta conforme apresentado na Tabela 54.

Tabela 54 - Comprimento de entrada em cada malha simulada do escoamento de transição 3.

Malha	L_{entrada} (m) - Laminar	L_{entrada} (m) - Turbulento
2000x5	1,6917	0,3143
4000x10	1,6496	0,2683
8000x20	1,5556	0,2342

Com os valores de comprimento de entrada da tabela se determinou a relação entre os GCI's dos refinamentos, indicando que a malha 8000x20 se encontrava na região assintótica em ambos os casos e apresentando erro de 5,7% no caso com abordagem laminar e 12,7% na abordagem turbulenta conforme ilustrados nas Tabela 55 e Tabela 56.

Tabela 55 - Avaliação do GCI no escoamento de transição com abordagem laminar 3.

Malha	L_{entrada} (m)	GCI_g / GCI_f
2000x5	1,6887	
4000x10	1,6852	0,943
8000x20	1,6835	

Tabela 56 - Avaliação do GCI no escoamento de transição com abordagem turbulenta 3.

Malha	L_{entrada} (m)	GCI_g / GCI_f
2000x5	0,2960	
4000x10	0,2452	0,873
8000x20	0,2277	

Com o comprimento de entrada definido, comparou-se esse valor com os valores indicados pelas correlações na literatura e o resultado obtido foi exposto na Tabela 57.

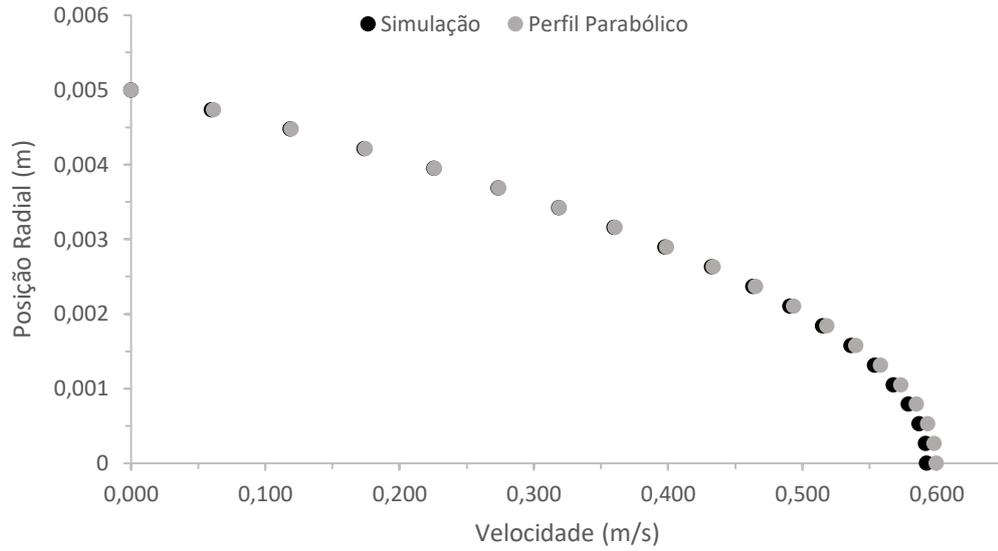
Tabela 57 - Comparação das correlações para comprimento de entrada no escoamento de transição 3.

Método de obtenção	$L_{entrada}$ (m) - Laminar	Método de obtenção	$L_{entrada}$ (m) - Turbulento
Simulação	1,5556	Simulação	0,2342
Kays	1,7415	Bhatti	0,1044
Potter	2,2640	Potter	0,1752
Schlichting	2,0898	10 Diâmetro	0,1000
Atkinson	1,9564		
Chen	2,1247		
Friedmann	1,9505		

Para esta simulação ocorreu o mesmo que observado na simulação 1, onde, no caso da abordagem laminar, a simulação apresentou valores inferiores aos previstos na literatura e no caso da abordagem turbulenta, esses valores foram superiores aos previstos pelas correlações.

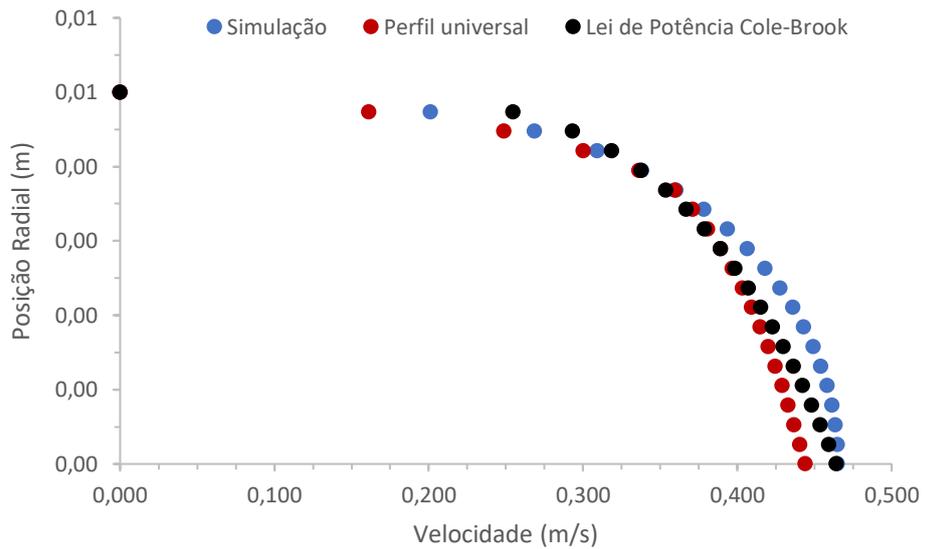
Plotou-se o resultado da simulação e os valores obtidos por meio do cálculo teórico do perfil parabólico para a abordagem laminar e o cálculo teórico do perfil universal e da lei de potência para a abordagem turbulenta. A comparação foi realizada nas Figuras 4.13 e 4.14.

Figura 4.13 - Perfis de velocidade do escoamento de transição com abordagem laminar 3.



Fonte: Acervo pessoal

Figura 4.14 - Perfis de velocidade do escoamento de transição com abordagem turbulenta 3.



Fonte: Acervo pessoal

Nesta simulação, o perfil obtido para a abordagem laminar apresentou divergência do perfil parabólico apenas para posições menores que 0,0025m, enquanto na simulação anterior essa diferença poderia ser observada em pontos mais afastados do centro do tubo. Já na

abordagem turbulenta o comportamento das curvas é muito parecido com o comportamento obtido na simulação anterior.

Na Tabela 58 observou-se a comparação entre as velocidades máximas obtidas pela simulação e no perfil parabólico para a simulação com abordagem laminar. Já na Tabela 59 foram colocados os resultados obtidos na simulação com abordagem turbulenta.

Tabela 58 - Valores de velocidade máxima obtidos para o escoamento de transição com abordagem laminar 3.

Método	Velocidade Máx (m/s)
Simulação	0,6873
Perfil Parabólico	0,7
Erro relativo	1,81%

Tabela 59 - Valores de velocidade máxima obtidos para o escoamento de transição com abordagem turbulenta 3.

Método	Velocidade Máx (m/s)	Erro Relativo
Simulação	0,4651	-
Perfil Universal	0,4439	-4,78%
Lei de Potência	0,4643	-0,17%

Notou-se que os valores de velocidade máxima para a abordagem laminar se distanciam enquanto na abordagem turbulenta os valores de velocidade máxima se aproximaram.

Como nos casos anteriores, o valor de velocidade máxima simulado foi inferior ao obtido por meio do perfil parabólico na abordagem laminar e foi superior aos valores de velocidade máxima do perfil universal e da lei de potência.

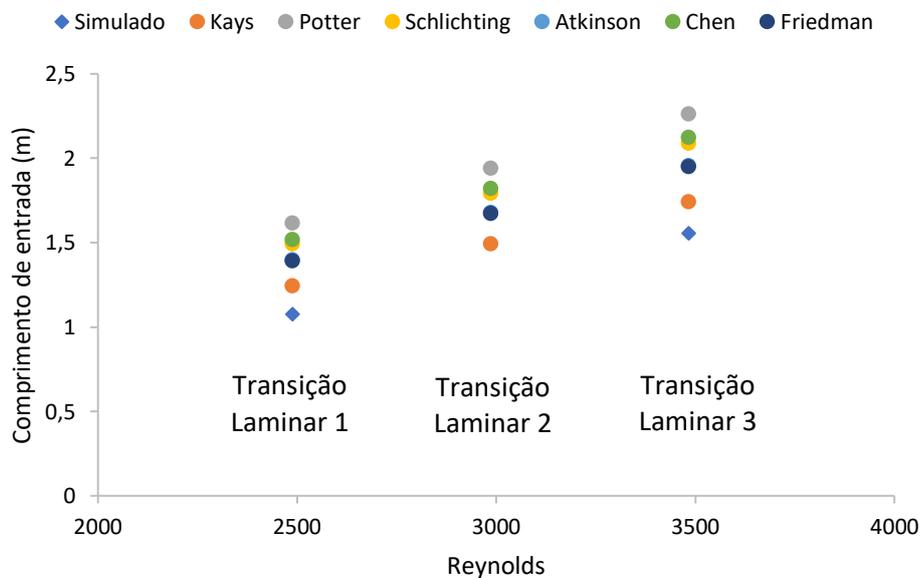
Por último calculou-se a queda de pressão ao longo do tubo e os resultados obtidos foram colocados na Tabela 60.

Tabela 60 - Queda de pressão no tubo para escoamento de transição 3.

Método	ΔP – Laminar (Pa)	ΔP – Turbulento (Pa)
Teórico	285,81	569,79
Simulação	297,25	1018,9
Erro relativo	4,00%	78,82%

Após avaliação dos resultados de comprimento de entrada para as 3 simulações com abordagem laminar observou-se que os pontos mais espaçados entre si se mantêm, semelhante ao que havia sido observado na última simulação do escoamento laminar, porém o aumento de espaçamento entre os pontos não ocorre quando foi comparada a simulação 1 com a 3, como havia sido observado anteriormente e conforme ilustrado na Figura 4.15. Percebeu-se também que os valores obtidos por meio da simulação ficaram abaixo dos valores propostos pelas correlações, com exceção da segunda simulação onde o valor obtido na simulação foi superior ao obtido tanto pela correlação de Frieddman quanto na proposta por Kays.

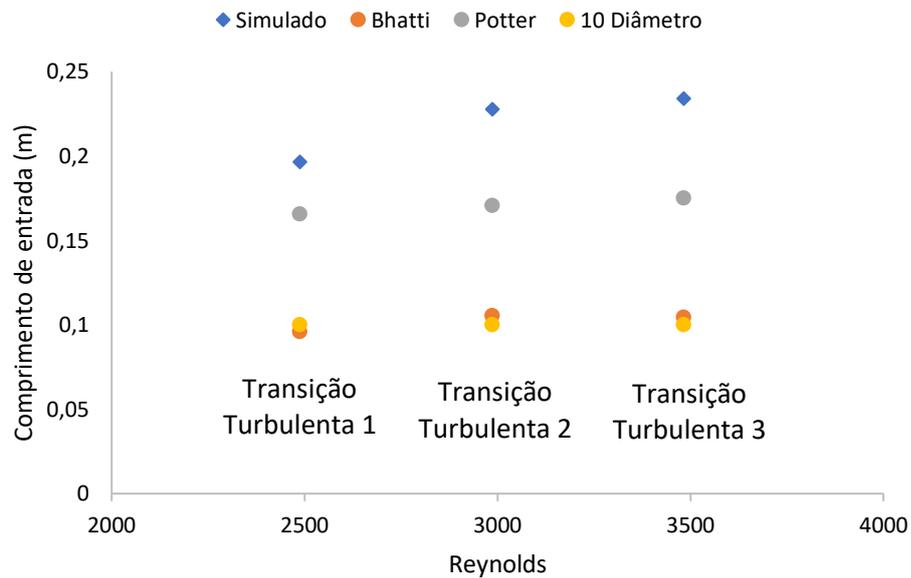
Figura 4.15 - Comparação entre as correlações para comprimento de entrada no escoamento de transição com abordagem laminar.



Fonte: Acervo pessoal

Já nas simulações com abordagem turbulenta, percebeu-se que nos três casos a correlação de Potter se aproxima muito melhor dos valores simulados do que a correlação de Kays como mostrada na Figura 4.16.

Figura 4.16 - Comparação entre as correlações para comprimento de entrada no escoamento de transição com abordagem turbulenta.



Fonte: Acervo pessoal

4.4. Glicerina

4.4.1. Glicerina Laminar

Para a simulação Laminar utilizou-se um tubo com comprimento de 1,2m, com velocidade de entrada da água de 3,6m/s e obteve-se os comprimentos de entrada para cada uma das 4 configurações de malhas conforme detalhado na Tabela 61.

Tabela 61 - Comprimento de entrada em cada malha simulada do escoamento laminar para a glicerina.

Malha	L_{entrada} (m)
1000x5	0,9586
2000x10	0,7303
4000x20	0,8817
8000x40	0,9526

Com os valores de comprimento de entrada da tabela se determinou a relação entre os GCIs dos refinamentos, indicando que a malha 8000x40 se encontrava na região assintótica apresentando um erro de 8% conforme exposto na Tabela 62

Tabela 62 - Avaliação do GCI no escoamento laminar de Glicerina.

Malha	L_{entrada} (m)	GCI_g / GCI_f
2000x10	0,7303	
4000x20	0,8817	1,080
8000x40	0,9526	

Determinado o comprimento de entrada, comparou-se esse valor com os valores indicados pelas correlações na literatura conforme mostrado na Tabela 63.

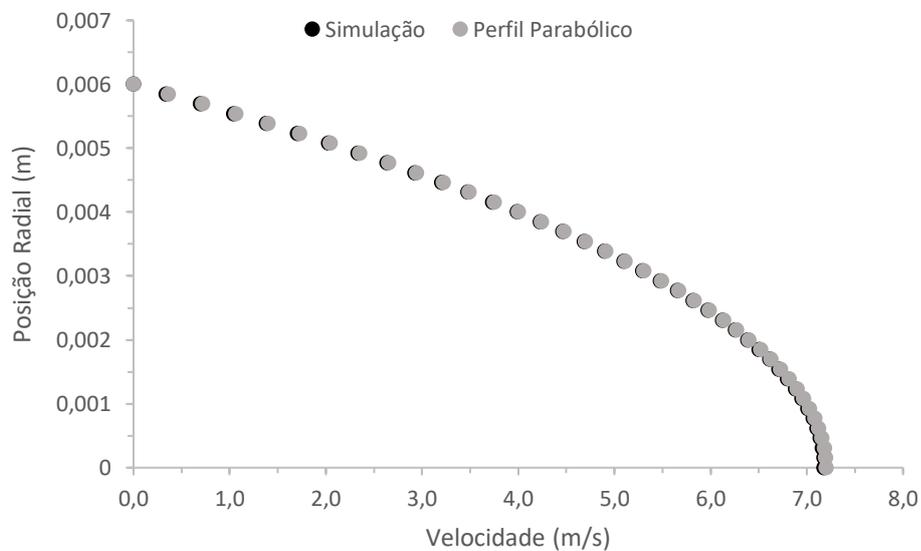
Tabela 63 - Comparação das correlações para comprimento de entrada no escoamento laminar de glicerina.

Método de obtenção	L_{entrada} (m)
Simulação	0,9526
Kays	0,6192
Potter	0,8050
Schlichting	0,7430
Atkinson	0,7006
Chen	0,7556
Friedmann	0,6937

Diferente do que foi observado anteriormente, o comprimento de entrada simulado fica maior que o comprimento de entrada previsto com a utilização das correlações.

Plotou-se o resultado da simulação e os valores obtidos por meio do cálculo teórico do perfil parabólico. A comparação foi verificada na Figura 4.17.

Figura 4.17 - Perfis de velocidade do escoamento laminar para a Glicerina.



Fonte: Acervo pessoal

Neste caso foi indistinguível a diferença entre o perfil obtido pela simulação e o perfil parabólico, mostrando uma adequação muito boa entre os perfis teórico e simulado.

Comparou-se o valor de velocidade máxima obtida no centro do tubo por meio do perfil de velocidade parabólico e comparou-se com o valor obtido pela simulação conforme demonstrado na Tabela 64.

Tabela 64 - Valores de velocidade máxima obtidos para o escoamento laminar de glicerina.

Método	Velocidade Máx (m/s)
Simulação	7,181
Perfil Parabólico	7,2
Erro relativo	0,27%

Foi possível observar que a adequação entre os valores de velocidade máxima, teórico e simulado apresentaram a menor diferença relativa entre todas as simulações realizadas.

Por último calculou-se a queda de pressão ao longo do tubo e os resultados obtidos foram colocados na Tabela 65.

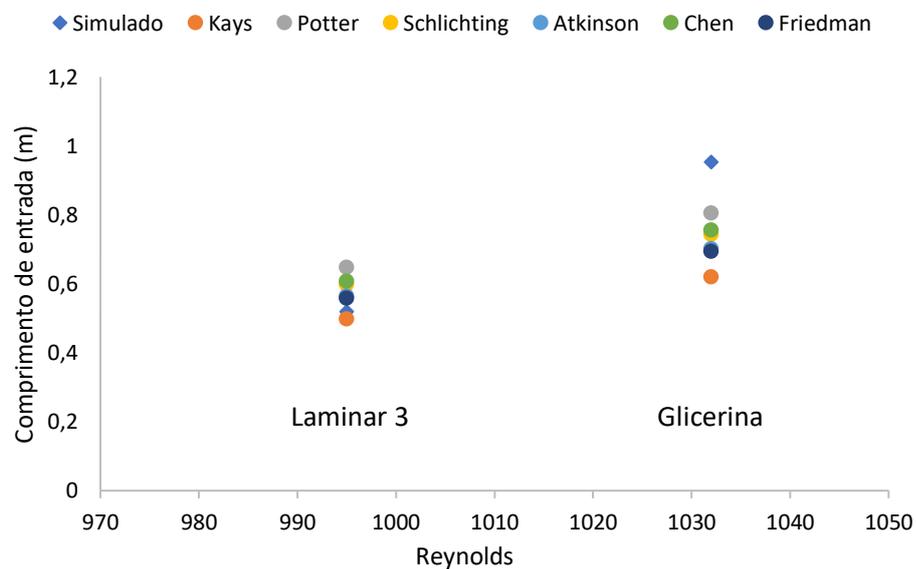
Tabela 65 - Queda de pressão no tubo para glicerina em regime laminar.

Método	ΔP (Pa)
Teórico	56968
Simulação	58171
Erro relativo	2,11%

Após avaliação dos resultados de comprimento de entrada para a simulação com glicerina e comparando-a com as simulações anteriormente feitas com água, observou-se que o valor da simulação foi superior aos valores de comprimento de entrada obtidos pelas correlações. Além disso, pela Figura 4.18 foi possível perceber que os valores das correlações

ficaram com maiores diferenças entre si quando se avaliou o escoamento com glicerina, porém o resultado do comprimento de entrada obtido para a simulação com glicerina tem um aumento maior do que o esperado quando avaliado com o aumento que ocorreu no número de Reynolds.

Figura 4.18 - Comparação entre as correlações para comprimento de entrada no escoamento laminar para água e glicerina



Fonte: Acervo pessoal

4.4.2. Glicerina turbulenta

Para a simulação Turbulenta utilizou-se um tubo com comprimento de 1,2m, com velocidade de entrada da água de 36m/s e obteve-se os comprimentos de entrada para cada uma das 4 configurações de malhas conforme apresentado na Tabela 66.

Tabela 66 - Comprimento de entrada em cada malha simulada do escoamento turbulento para a glicerina.

Malha	L_{entrada} (m)
1000x5	0,4084
2000x10	0,5886
4000x20	0,4913
8000x40	0,4408

Com os valores de comprimento de entrada da tabela se determinou a relação entre os GCIs dos refinamentos, indicando que a malha 8000x40 se encontrava na região assintótica apresentando um erro de 10,3%, conforme a Tabela 67 mostrou.

Tabela 67 - Avaliação do GCI no escoamento turbulento de Glicerina.

Malha	L_{entrada} (m)	GCI_g / GCI_f
2000x10	0,5886	
4000x20	0,4913	0,897
8000x40	0,4408	

Determinado o comprimento de entrada, comparou-se esse valor com os valores indicados pelas correlações na literatura conforme exposto na Tabela 68.

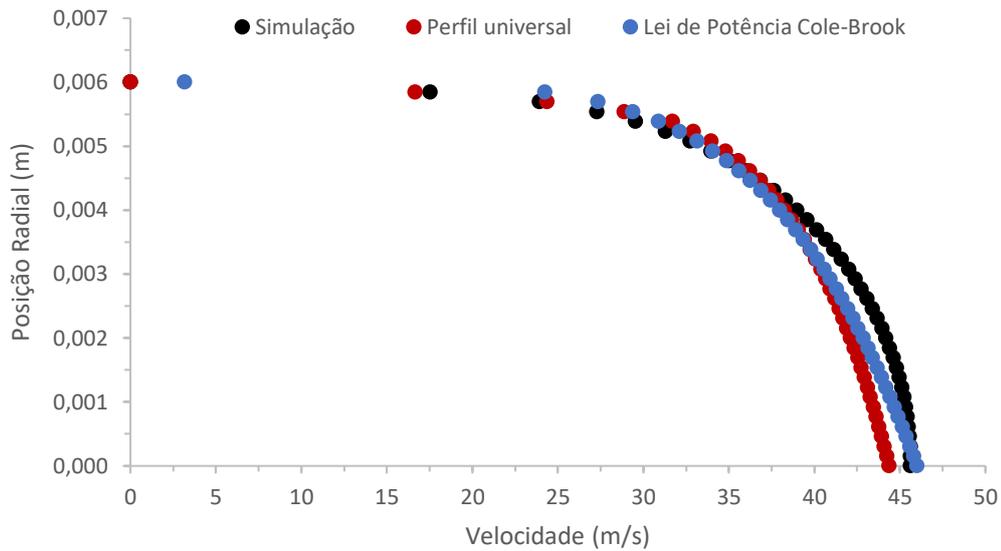
Tabela 68 - Comparação das correlações para comprimento de entrada no escoamento turbulento de glicerina.

Método de obtenção	L_{entrada} (m)
Simulação	0,4408
Bhatti	0,1644
Potter	0,2520
10 Diâmetro	0,1000

Neste caso o comprimento de entrada obtido pela simulação também foi superior aos valores teóricos esperados.

Plotou-se o resultado da simulação e os valores obtidos por meio do cálculo teórico do perfil universal e da lei de potência. A comparação pode ser verificada na Figura 4.19.

Figura 4.19 - Perfis de velocidade do escoamento turbulento para a Glicerina.



Fonte: Acervo pessoal

Foi possível notar que os valores de velocidade ficaram bem próximos entre si neste caso, semelhante ao que havia sido notado no escoamento de transição com abordagem turbulenta, porém com maior intensidade. Além disso, diferente do que aconteceu nas outras simulação, nesse caso o perfil da lei de potência cruzou o gráfico com os valores da simulação de maneira que o valor da velocidade máxima superou o que foi obtido na simulação.

Comparou-se o valor de velocidade máxima obtida no centro do tubo por meio do perfil de velocidade parabólico e comparou-se com o valor obtido pela simulação conforme a Tabela 69.

Tabela 69 - Valores de velocidade máxima obtidos para o escoamento turbulento de glicerina.

Método	Velocidade Máx (m/s)	Erro Relativo
Simulação	45,63	-
Perfil Universal	44,38	-2,82%
Lei de Potência	46,00	0,80%

Conforme foi observado na análise do gráfico, a Tabela 69 reforçou que a velocidade máxima predita pela lei de potência foi superior ao valor obtido com a simulação. Percebeu-se que o erro relativo para a velocidade máxima foi bem baixo para os dois casos.

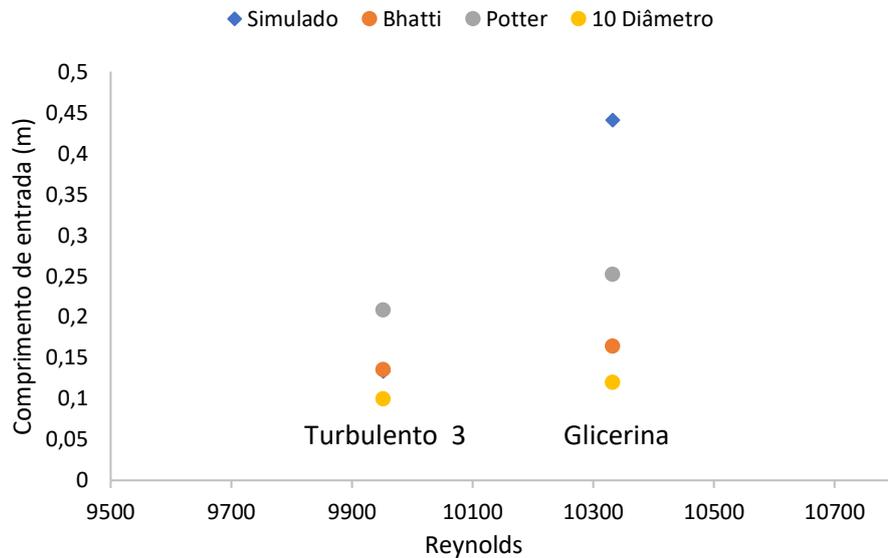
Por último, calculou-se a queda de pressão ao longo do tubo e os resultados obtidos foram colocados na Tabela 70

Tabela 70 - Queda de pressão no tubo para glicerina em regime turbulento.

Método	ΔP (Pa)
Teórico	$3,21 \cdot 10^6$
Simulação	$4,16 \cdot 10^6$
Erro relativo	29,55%

Após avaliação dos resultados de comprimento de entrada para a simulação com glicerina e comparando-a com as simulações anteriormente feitas com água para o regime turbulento, observou-se a mesma relação comentada anteriormente, onde mesmo com um ligeiro aumento no número de Reynolds as correlações têm acréscimos na previsão do comprimento de entrada, porém o valor obtido na simulação é bastante superior ao previsto pelas correlações, conforme foi possível visualizar na Figura 4.20.

Figura 4.20 - Comparação entre as correlações para comprimento de entrada no escoamento turbulento para água e glicerina.



Fonte: Acervo pessoal

4.4.3. Glicerina Transição

Para a simulação Glicerina Transição utilizou-se um tubo com comprimento de 2,4m, com velocidade de entrada da água de 11m/s e obteve-se os comprimentos de entrada para cada uma das 3 configurações de malhas, tanto na abordagem laminar quanto na abordagem turbulenta, conforme organizado na Tabela 71

Tabela 71 - Comprimento de entrada em cada malha simulada do escoamento de transição para a glicerina.

Malha	L _{entrada} (m) - Laminar	L _{entrada} (m) - Turbulento
2000x5	2,2054	0,3459
4000x10	2,2126	0,3483
8000x20	2,2151	0,3604

Com os valores de comprimento de entrada da tabela se determinou a relação entre os GCI's dos refinamentos, indicando que a malha 8000x20 se encontrava na região assintótica em ambos os casos e apresentando erro de 0,1% (Tabela 72) no caso com abordagem laminar e 3,5% (Tabela 73) na abordagem turbulenta.

Tabela 72 - Avaliação do GCI no escoamento de transição com abordagem laminar para a Glicerina.

Malha	$L_{entrada}$ (m)	GCI_g/GCI_f
2000x5	2,2054	
4000x10	2,2126	1,001
8000x20	2,2151	

Tabela 73 - Avaliação do GCI no escoamento de transição com abordagem turbulenta para a Glicerina.

Malha	$L_{entrada}$ (m)	GCI_g/GCI_f
2000x5	0,3459	
4000x10	0,3483	1,035
8000x20	0,3604	

Determinado o comprimento de entrada, comparou-se esse valor com os valores indicados pelas correlações na literatura conforme a Tabela 74.

Tabela 74 - Comparação das correlações para comprimento de entrada no escoamento de transição da glicerina.

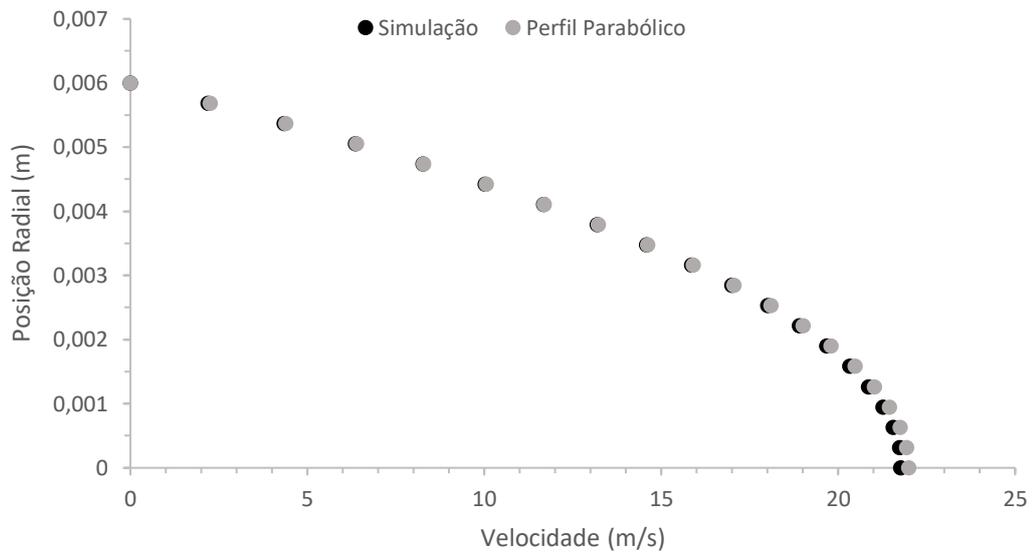
Método de obtenção	L_{entrada} (m) - Laminar	Método de obtenção	L_{entrada} (m) - Turbulento
Simulação	2,2151	Simulação	0,3604
Kays	1,8924	Bhatti	0,1222
Potter	2,4601	Potter	0,2068
Schlichting	2,2709	10 Diâmetro	0,1000
Atkinson	2,1266		
Chen	2,3088		
Friedmann	2,1196		

Diferente da simulação com escoamento laminar, o valor de comprimento de entrada obtido na simulação não foi superior a todas as correlações da literatura. Já para a abordagem turbulenta, isso voltou a acontecer, sendo o comprimento de entrada maior que o valor predito pelas correlações selecionadas.

Plotou-se o resultado da simulação e os valores obtidos por meio do cálculo teórico do perfil parabólico para a abordagem laminar conforme ilustrado na Figura 4.21.

Diferentemente do resultado obtido para o escoamento laminar, foi possível observar pelo gráfico a diferença de velocidades para os pontos localizados em posição radial menor que 0,0025m.

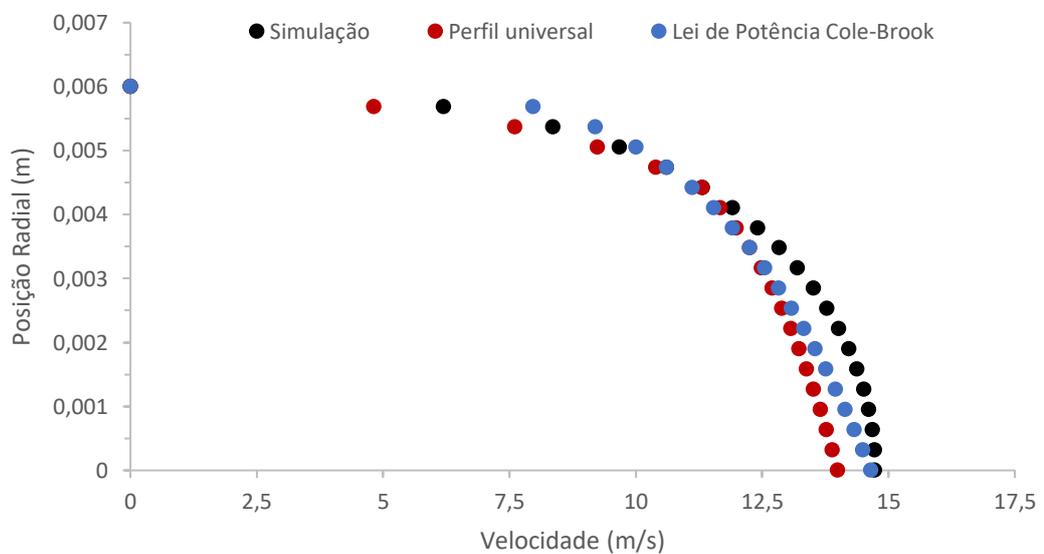
Figura 4.21 - Perfis de velocidade do escoamento de transição com abordagem laminar para a glicerina.



Fonte: Acervo pessoal

Para a abordagem turbulenta, os dados obtidos da simulação, da lei de potência e do perfil universal, foram representados na Figura 4.22

Figura 4.22 - Perfis de velocidade do escoamento de transição com abordagem turbulenta para a Glicerina.



Fonte: Acervo pessoal

Foi possível observar que o comportamento é muito parecido com o que foi obtido na simulação turbulenta, exceto pelo espaçamento um pouco maior entre as curvas e o fato de que embora a aproximação entre os valores da simulação e os valores do perfil da lei de potência tenha ocorrido, não ocorreu um cruzamento entre eles como aconteceu na simulação anterior.

Comparou-se os valores obtidos pela simulação tanto na abordagem laminar (Tabela 75) quanto na abordagem turbulenta (Tabela 76) e comparou-se com os valor de velocidade máxima obtida no centro do tubo por meio do perfil de velocidade parabólico, lei de potência e perfil universal.

Tabela 75 - Valores de velocidade máxima obtidos para o escoamento de transição com abordagem laminar para glicerina.

Método	Velocidade Máx (m/s)
Simulação	21,77
Perfil Parabólico	22
Erro relativo	1,05%

Tabela 76 - Valores de velocidade máxima obtidos para o escoamento de transição com abordagem turbulenta para glicerina.

Método	Velocidade Máx (m/s)	Erro Relativo
Simulação	14,73	-
Perfil Universal	13,99	-5,29%
Lei de Potência	14,65	-0,55%

Observou-se que a lei de potência é a que mais teve aproximação com o valor obtido pela simulação, entretanto, a abordagem laminar também trouxe uma resposta muito próxima entre valor teórico e valor simulado.

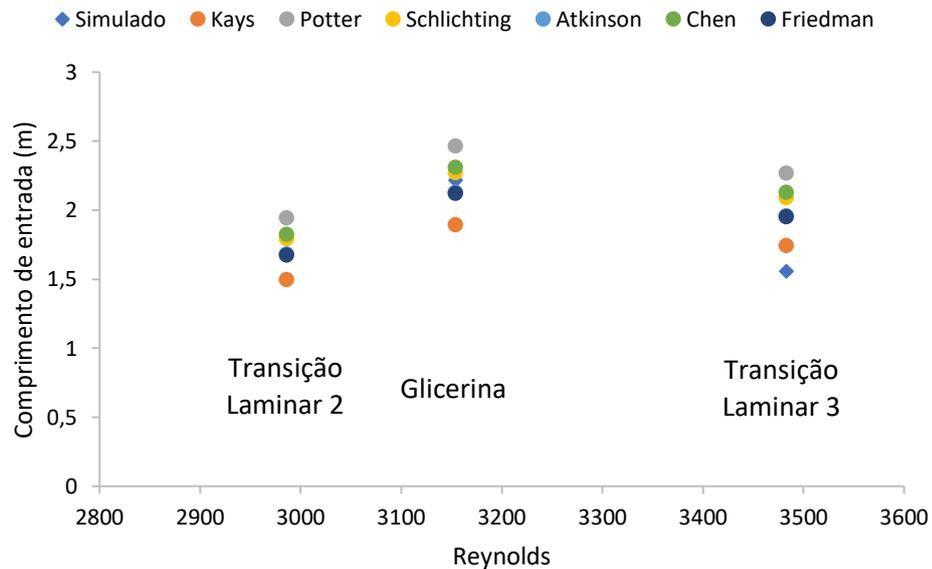
Por último calculou-se a queda de pressão ao longo do tubo e os resultados obtidos foram colocados na Tabela 77.

Tabela 77 - Queda de pressão no tubo para glicerina em regime de transição.

Método	ΔP – Laminar (Pa)	ΔP – Turbulento (Pa)
Teórico	$3,74 \cdot 10^5$	$7,04 \cdot 10^5$
Simulação	$3,88 \cdot 10^5$	$1,32 \cdot 10^6$
Erro relativo	3,78%	87,53%

Para a simulação do escoamento da glicerina com a abordagem laminar observou-se que o valor ficou dentro da faixa de valores obtidos pelas correlações propostas, conforme ilustra a Figura 4.23.

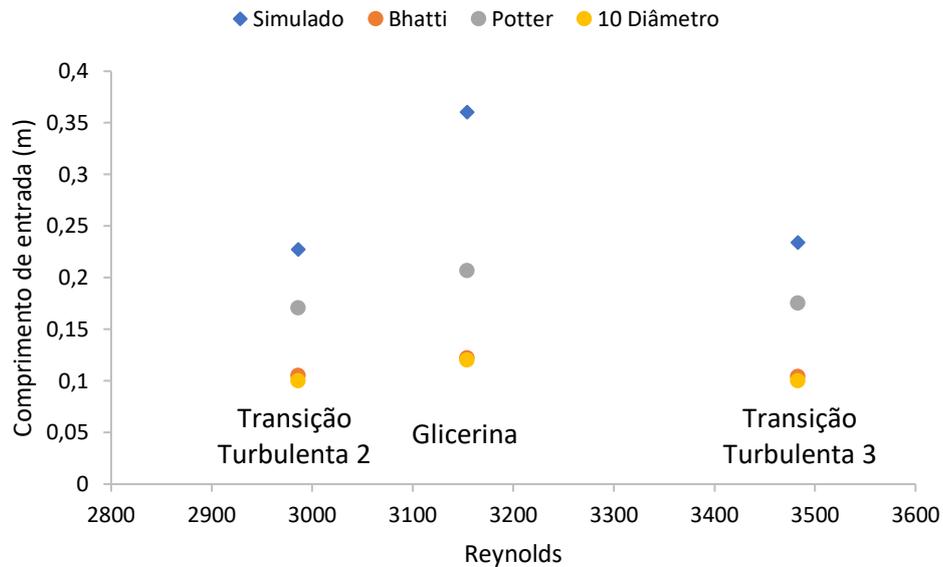
Figura 4.23 - Comparação entre as correlações para comprimento de entrada no escoamento de transição com abordagem laminar para água e glicerina.



Fonte: Acervo pessoal

Já nas simulações com abordagem turbulenta, assim como o ocorrido no escoamento turbulento, os valores obtidos para a simulação com glicerina ficaram acima das correlações propostas, como é possível observar na Figura 4.24

Figura 4.24 - Comparação entre as correlações para comprimento de entrada no escoamento de transição com abordagem turbulenta para água e glicerina.



Fonte: Acervo pessoal

Tanto na Figura 4.23 quanto na Figura 4.24 foi possível notar que os comprimentos de entrada previstos pelas correlações e o obtido na simulação são maiores quando avaliando-se a glicerina do que quando avaliadas as situações com água, mesmo que os números de Reynolds para os escoamentos com glicerina sejam intermediários nos escoamentos com água.

5. Conclusões

Foi possível concluir que a utilização do GCI para a definição de qual malha deve ser utilizada é válido tanto para os casos laminares quanto para os casos turbulentos, independentemente de o fluido utilizado ser água ou glicerina.

Nas três simulações de água em escoamento laminar, o comprimento de entrada ficou sempre mais próximo da correlação proposta por Kays, porém quando o fluido foi substituído por glicerina, o comprimento de entrada foi superior à correlação de Potter, que sempre apresentava os maiores valores de comprimento de entrada. Já nas simulações em regime de transição com abordagem laminar o comprimento de entrada manteve-se menor que as outras correlações propostas, porém com um distanciamento maior para a correlação de Kays, com exceção da simulação 2 onde o valor simulado fica mais próximo das correlações propostas por Atkinson e Friedmann.

No escoamento turbulento com água, os valores simulados de comprimento de entrada são sempre inferiores as correlações avaliadas, porém com uma proximidade muito grande com o valor proposto pela relação de Bhatti. Na simulação turbulento 2, a distância entre o valor simulado e o proposto por Bhatti é um pouco maior, porém ainda continuam mais próximos do que quando se avalia o valor simulado com a correlação de Potter.

Na simulação em regime de transição com água em abordagem turbulenta e nas simulações com glicerina, tanto no escoamento turbulento quanto no escoamento de transição com abordagem turbulenta os valores de comprimento de entrada obtidos para a simulação eram superiores e se distanciavam razoavelmente dos valores obtidos pela correlação de Potter.

O perfil de velocidade parabólico para o escoamento laminar ficou muito próximo dos valores simulados obtidos nos escoamentos laminares e nos de transição com abordagem laminar. É possível notar que o erro relativo do valor da velocidade máxima vai diminuindo conforme se aumenta o Reynolds nas simulações com escoamento laminar e também diminui da primeira para a segunda simulação no escoamento de transição, porém o erro aumenta na terceira simulação, o que pode indicar que a abordagem laminar não fosse a mais adequada para o Reynolds trabalhado, podendo mostrar que naquela faixa a abordagem turbulenta seria a mais indicada.

Na simulação com a glicerina, a simulação laminar e o perfil parabólico ficam quase que justapostos e nessa situação foi a simulação em que se obteve o menor erro relativo entre o valor simulado e o valor obtido pelas correlações indicadas. No escoamento de transição com abordagem laminar o perfil obtido não ficou tão bem aproximado quanto a situação descrita anteriormente, mas ainda assim os valores ficaram bem próximos e a velocidade máxima apresentou pouco mais de 1% de diferença.

Para o escoamento turbulento, a simulação 1 foi o que apresentou maior proximidade dos valores de velocidade simulado e obtidos por meio de correlações da literatura, além de que o perfil de velocidade simulado apresentou um achatamento mais intenso que o apresentado nas outras simulação.

No escoamento de transição com abordagem turbulenta, percebeu-se que as simulações 2 e 3 apresentaram perfis mais próximos entre si do que a simulação 1, indicando que para essa variável, as aproximações com o perfil turbulento eram melhores para os dois casos com os Reynolds maiores.

No escoamento com glicerina, é possível perceber que tanto o escoamento de transição com abordagem turbulenta e o escoamento turbulento apresentam um comportamento parecido, mas é evidente também que para o escoamento turbulento os perfis ficam muito mais próximos entre si.

6. Sugestões

Como boa parte das análises surgem a partir da determinação do comprimento de entrada e que esse fator pode enviesar as análises que surgem posteriormente, uma indicação para trabalhos futuros é a avaliação dos métodos de definição do comprimento de entrada e verificação se de fato analisar a derivada segunda dos pontos simulados é o melhor método ou se outros métodos numéricos mais sofisticados podem trazer maior precisão para esse valor.

Outro fator que pode ser avaliado é a questão de se utilizar uma geometria que permita uma melhor avaliação do comportamento radial, permitindo que ainda se trabalhe com valores de Reynolds baixos, ou seja, tubos menos compridos e com maiores diâmetros.

Uma possibilidade interessante é a de um trabalho que proponha e explore mais correlações para o escoamento turbulento, avaliando sua eficácia para escoamentos em fluidos pouco ou muito viscosos.

Acredita-se que para a avaliação com fluidos viscosos, pode-se pensar num trabalho que contemple também as trocas de calor envolvidas num processo ou então os efeitos de dissipação por conta do atrito do fluido com a parede e o quanto esse provável aumento de temperatura altera os parâmetros de escoamento que estão sendo trabalhados.

Referências Bibliográficas

- Atkinson, Bernard, M P Brocklebank, C C H Card, and J M Smith. 1969. “Low Reynolds Number Developing Flows.” *AICHE Journal* 15 (4): 548–53.
<https://doi.org/10.1002/aic.690150414>.
- Baquero, H Aya, and L H Camargo Casallas. 2017. “Numerical Simulation of Flow Pressure Drop and Friction Factor of Water in 2D Channel.” *Journal of Physics: Conference Series* 792: 12053. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/792/1/012053>.
- Bhatti, M. S., and R. K. Shah. 1987. “Turbulent and Transition Flow Convective Heat Transfer in Ducts.” In *Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer*. Nova Iorque: Wiley Interscience.
- Blazek, J. 2005. “Chapter 1 - Introduction.” In , edited by J B T - Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications (Second Edition) Blazek, 1–4. Oxford: Elsevier Science. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-008044506-9/50003-5>.
- Bortoli, Álvaro L De, Greice S L Andreis, and Felipe N Pereira. 2015. “Chapter 6 - Numerical Methods for Reactive Flows.” In , edited by Álvaro L De Bortoli, Greice S L Andreis, and Felipe N B T - Modeling and Simulation of Reactive Flows Pereira, 123–69. Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802974-9.00006-4>.
- Çengel, Y A, and J M Cimbala. 2015. *Mecânica Dos Fluidos - 3.Ed.* AMGH Editora. <https://books.google.com.br/books?id=aP3OBgAAQBAJ>.
- Chen, R.-Y. 1973. “Flow in the Entrance Region at Low Reynolds Numbers.” *Journal of Fluids Engineering* 95 (1): 153–58. <https://doi.org/10.1115/1.3446948>.
- Cheng, Nian-Sheng. 2007. “Power-Law Index for Velocity Profiles in Open Channel Flows.” *Advances in Water Resources* 30 (8): 1775–84.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2007.02.001>.
- Friedmann, M, J Gillis, and N Liron. 1968. “Laminar Flow in a Pipe at Low and Moderate Reynolds Numbers.” *Applied Scientific Research* 19 (1): 426–38.
<https://doi.org/10.1007/BF00383937>.
- Horner, M, S Joshi, and Y Waghmare. 2017. “14 - Process Modeling in the

- Biopharmaceutical Industry.” In , edited by Preetanshu Pandey and Rahul B T - Predictive Modeling of Pharmaceutical Unit Operations Bharadwaj, 383–425. Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100154-7.00014-4>.
- Joeckel, Rayana Dal’Negro. 2010. “Efeito Da Precisão Dos Cálculos Em CFD Com Múltiplas Extrapolações de Richardson.” UFPR.
- Kays, W. M., M. E. Crawford, and B. Weigand. 2004. *Convective Heat and Mass Transfer*. 4a ed. Nova York: McGrawHill.
- Lien, Kim, Jason Monty, Michelle Chong, and Andrew Ooi. 2004. “The Entrance Length for Fully Developed Turbulent Channel Flow,” January.
- Morais, Emerson Luiz de. 2004. “Verificação de Soluções Numéricas de Escoamentos Laminares Obtidas Com o Método Dos Volumes Finitos e Malhas Nao-Estruturadas.” UFPR.
- Moran, S. 2018. *An Applied Guide to Water and Effluent Treatment Plant Design*. Elsevier Science. <https://books.google.com.br/books?id=waRBDwAAQBAJ>.
- Morrison, Faith A. 2013. *An Introduction to Fluid Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/DOI:10.1017/CBO9781139047463>.
- Potter, Merle C., and David C. Wiggert. 2010. “Escoamentos Internos.” In *Mecânica Dos Fluidos*, 3a ed. Cengage Learning.
- Reynolds, Scott D. 2009. “Chapter 35 - Using Computational Fluid Dynamics (CFD) in Laboratory Animal Facilities.” In *American College of Laboratory Animal Medicine*, edited by Jack R Hessler and Noel D M B T - Planning and Designing Research Animal Facilities Lehner, 479–88. London: Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-369517-8.00035-9>.
- Sahu, Mrutyunjaya, Prashant Singh, S S Mahapatra, and K K Khatua. 2012. “Prediction of Entrance Length for Low Reynolds Number Flow in Pipe Using Neuro-Fuzzy Inference System.” *Expert Systems with Applications* 39 (4): 4545–57. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.09.132>.
- Schlichting, Hermann. 1968. *Boundary Layer Theory*. Vol. 960. Springer.

Tongpun, Pimpun, Eakarach Bumrunghthaichaichan, and Santi Wattananusorn. 2014.

“Investigation of Entrance Length in Circular and Noncircular Conduits by Computational Fluid Dynamics Simulation.” *Songklanakarin Journal of Science and Technology* 36 (July): 471–75.

Tu, J, G H Yeoh, and C Liu. 2007. *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach*.

Elsevier Science. <https://books.google.com.br/books?id=BJwuMQOhM0sC>.