

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Jamille Késsia Araújo Martins

**MODELAGEM MATEMÁTICA E  
COMPUTACIONAL DO ESCOAMENTO  
TURBULENTO DE UMA TUBULAÇÃO DE  
UFCC**

**Uberlândia, Brasil**

**2021**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Jamille Késsia Araújo Martins

**MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL  
DO ESCOAMENTO TURBULENTO DE UMA  
TUBULAÇÃO DE UFCC**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Aeronáutica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de BACHAREL em ENGENHARIA AERONAÚTICA.

Orientador: Prof. Dr. João Marcelo Vedovotto

Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Faculdade de Engenharia Mecânica

Bacharelado em Engenharia Aeronáutica

Uberlândia, Brasil

2021

Jamille Késsia Araújo Martins

# **MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL DO ESCOAMENTO TURBULENTO DE UMA TUBULAÇÃO DE UFCC**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Aeronáutica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de BACHAREL em ENGENHARIA AERONAÚTICA.

Trabalho aprovado. Uberlândia, Brasil, 10 de novembro de 2021:

---

**Prof. Dr. João Marcelo Vedovotto**  
Orientador

---

**Prof. Dra. Karina Mayumi Tsuruta**

---

**Prof. Dr. Aldemir Aparecido Cavallini  
Junior**

Uberlândia, Brasil  
2021

# Resumo

O escoamento turbulento através de acessórios como válvulas, curvaturas, e tês estão presentes em diversas aplicações industriais. O fluxo através destas estruturas é caracterizado por significativa dissipação de energia ou perda de momento, no qual provoca ao escoamento efeitos tais como instabilidades, recirculação, escoamento secundário e separação da camada limite. Logo para as indústrias, obter informações detalhadas em trechos com a presença de tais acessórios torna-se extremamente necessário.

Este trabalho tem como objetivo o estudo e a análise do escoamento interno de uma tubulação de UFCC, sendo este trabalho limitado na construção de malhas, capazes de descrever o escoamento ao longo de um trecho de tubulação, para diferentes ângulos de abertura da válvula inserida, em prioridade na região ao longo da curvatura até a zona de entrada do fluido por tal, no qual é caracterizado por efeitos tais como recirculação, separação da camada limite e escoamento secundário. Além disso também é avaliado resultados preliminares de uma malha teste de baixa qualidade mas capaz de gerar resultados aceitáveis, como meio de análise superficial destes efeitos.

Na etapa de elaboração das malhas para diferentes ângulos de abertura, ainda com limitação computacional, estas se demonstraram capazes de gerar resultados aceitáveis segundo os parâmetros de qualidade Skewness e Orthogonality Quality analisados, entretanto no presente estudo é salientado a importância de procedimentos que não puderam ser realizados como o teste de independência de malha e verificação e ou ajuste do ( $y^+$ ) da parede.

Já para os resultados preliminares da malha teste foi possível identificar mesmo que levemente efeitos esperados segundo a literatura decorrentes de acessórios de tubulação, como válvulas e curvaturas, uma vez que, se tratam de regiões de significativa dissipação de energia ou perda de momento.

**Palavras-chave:** escoamento.válvula.curvatura.turbulência.velocidade.recirculação.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Desenvolvimento escoamento laminar . . . . .	8
Figura 2 – Desenvolvimento escoamento turbulento . . . . .	9
Figura 3 – Escoamento Secundário . . . . .	10
Figura 4 – Separação da Camada Limite . . . . .	10
Figura 5 – Trecho de tubulação de UFCC . . . . .	11
Figura 6 – Ângulos de Fechamento da Válvula . . . . .	12
Figura 7 – Regiões da malha gerada com elementos do tipo hexaedrais . . . . .	17
Figura 8 – Região central da malha gerada com elementos do tipo tetraedrais . . . . .	18
Figura 9 – Distribuição da velocidade na secção longitudinal do tubo. . . . .	23
Figura 10 – Distribuição da pressão na secção longitudinal do tubo. . . . .	24
Figura 11 – Secções seleccionadas para representação da distribuição da velocidade. . . . .	24
Figura 12 – Distribuição da velocidade em diferentes secções transversais do tubo. . . . .	25
Figura 13 – Perfil de velocidade para secções seleccionadas . . . . .	26

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Propriedades físicas constantes da mistura . . . . .	12
Tabela 2 – Propriedades físicas medidas da mistura . . . . .	13
Tabela 3 – Propriedades físicas medidas da mistura . . . . .	13
Tabela 4 – Numero de nós e elementos de cada malha gerada . . . . .	19
Tabela 5 – Escala de classificação Skewness . . . . .	19
Tabela 6 – Parâmetro Skewness para cada malha gerada . . . . .	20
Tabela 7 – Escala de classificação Orthogonal Quality . . . . .	20
Tabela 8 – Parâmetro Orthogonal Quality para cada malha gerada . . . . .	21
Tabela 9 – Parâmetro Skewness da malha teste. . . . .	21
Tabela 10 – Parâmetro Orthogonal quality da malha teste. . . . .	21
Tabela 11 – Condições de contorno para os diferentes ângulos de abertura . . . . .	22
Tabela 12 – Condições de contorno caso teste . . . . .	22

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>8</b>
<b>2.1</b>	<b>Escoamentos em tubulações</b>	<b>8</b>
<b>2.2</b>	<b>Escoamentos em tubulações ao longo de curvaturas</b>	<b>9</b>
2.2.1	Escoamento secundário	9
2.2.2	Separação da camada limite	10
<b>3</b>	<b>MODELO FÍSICO</b>	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>MODELO MATEMÁTICO</b>	<b>14</b>
<b>4.1</b>	<b>Equações de Governo</b>	<b>14</b>
4.1.1	Equação da continuidade	14
4.1.2	Equação da quantidade de movimento	14
4.1.3	Escoamentos monofásicos incompressíveis	14
<b>5</b>	<b>MÉTODO NUMÉRICO</b>	<b>16</b>
<b>5.1</b>	<b>Modelo de Turbulência</b>	<b>16</b>
<b>5.2</b>	<b>Grade Numérica</b>	<b>16</b>
<b>5.3</b>	<b>Condições de contorno</b>	<b>21</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS PRELIMINARES</b>	<b>23</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>27</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>28</b>

# 1 Introdução

Devido a sua versatilidade tubos circulares são extremamente frequentes no ramo industrial, em priore na distribuição de gases, óleos, vapores, lubrificantes e líquidos. Estão presentes em diferentes tipos de indústrias tais como alimentícia, de processamento, farmacêutica, química e petroquímica.

Atualmente simulações computacionais de tais estruturas são extremamente conduzidas pois além de permitir uma maior economia de recursos, fornece resultados extremamente úteis para seu entendimento e análise.

Em tubos o escoamento interno do tipo viscoso e incompressível recebe forte influência da parede, dissipando energia devido ao atrito. Isso ocorre uma vez que, no contato entre o fluido e a parede as partículas adquirem a velocidade nula da mesma, o que por vez influi nas partículas vizinhas, por meio da viscosidade e turbulência. A inserção de acessórios de canalização como válvulas, curvas e reduções são largamente empregados seja para montagem da tubulação como também para controle de fluxo do escoamento. Entretanto tais atribuições agravam a perda de energia nos pontos em que estão situados. (BOLLELI, 2021)

Logo as condições de entrada de um escoamento interno deste tipo em um tubo após uma curvatura é categorizado por efeitos tais como separação da camada limite, escoamento secundário e instabilidades. Efeitos tais que somados são responsáveis pela a formação de uma região com alta dissipação de energia caracterizado por um perfil de velocidade assimétrico e alta zona de recirculação. (DUTTA; NANDI, 2019)

Nesse contexto, o objetivo principal do presente trabalho é estudar e analisar o escoamento interno em um trecho de tubulação da Unidade de Craqueamento Catalítico UFCC. Verificando o comportamento do fluido posterior à passagem em uma curvatura.



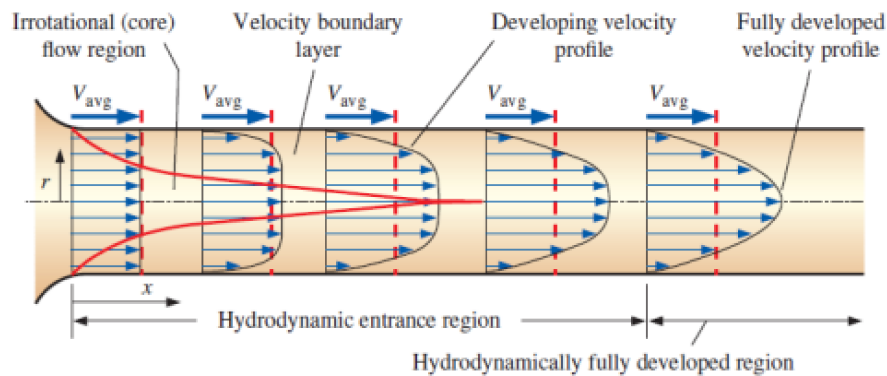
## 2 Revisão Bibliográfica

Nesta seção será apresentado um pequeno resumo teórico, sobre o desenvolvimento do escoamento ao longo de uma tubulação, para algumas diferentes configurações e alguns trabalhos relevantes na área.

### 2.1 Escoamentos em tubulações

Para o escoamento de um fluido com velocidade constante em um tubo circular, Fig. 1, as partículas do fluido em contato com a superfície do tubo param por completo devido a condição de não escorregamento, o que provoca nas partículas das camadas adjacentes uma diminuição gradual da velocidade em razão do atrito. Devido à tal fenômeno a velocidade da seção do média do tubo aumenta como forma de manter a vazão de massa através do tubo constante. Como resultado um gradiente de velocidade é formado ao longo do tubo.(CENGEL; CIMBALA, 2015)

Figura 1 – Desenvolvimento do escoamento laminar ao longo de uma tubulação.

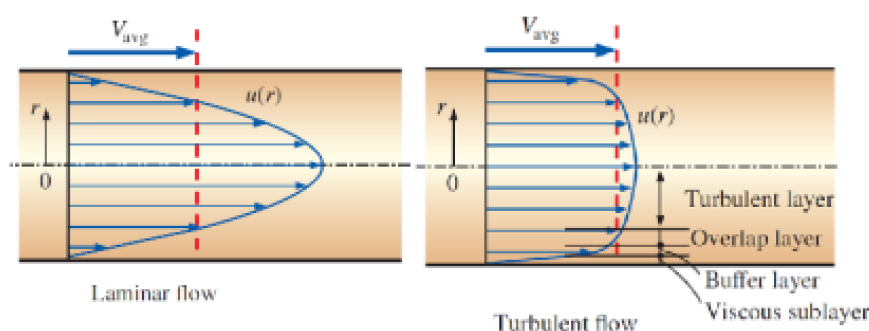


Fonte: (CENGEL; CIMBALA, 2015).

A camada limite compreende a região do escoamento no qual as forças de cisalhamento viscosas ocasionadas pela viscosidade do fluido são sentidas, no qual atribuindo uma fronteira hipotética divide o escoamento dentro do tubo em duas regiões. Uma delas formada pela região da camada limite no qual as variações de velocidade e efeitos viscosos são significativos e a outra pela região de escoamento irrotacional em que a velocidade permanece constante essencialmente na direção radial e os efeitos viscosos são desprezíveis. A camada limite se estende aumentando sua espessura até atingir o centro do tubo. Quando isso acontece o escoamento torna-se inteiramente viscoso e o perfil de velocidade não se altera com o avanço do escoamento, onde a partir daí diz se que o mesmo se encontra completamente desenvolvido.(CENGEL; CIMBALA, 2015)

Em um escoamento laminar, fluxo altamente ordenado e suave, o perfil de velocidade na região completamente desenvolvida apresenta comportamento parabólico, enquanto que para o turbulento, escoamento caótico, se demonstra um pouco mais plano (ou mais cheio) em razão do movimento de redemoinho e à mistura mais vigorosa na direção radial como representado em Fig. 2.

Figura 2 – Desenvolvimento do escoamento turbulento ao longo de uma tubulação.



Fonte: (CENGEL; CIMBALA, 2015).

## 2.2 Escoamentos em tubulações ao longo de curvaturas

A vantagem de flexibilidade de roteamento tornam as curvas dos tubos os trechos mais importantes de qualquer rede de dutos.(DUTTA et al., 2016)

Vários são os estudos teóricos, experimentais e numéricos conduzidos para análise e compreensão de escoamentos turbulentos durante curvaturas em dutos.(DUTTA; NANDI, 2015; KALPAKLI; ÖRLÜ, 2013; SUDO; SUMIDA; HIBARA, 1998; CRAWFORD et al., 2009; NAPHON; WONGWISES, 2006; SPEDDING; BÉNARD; MCNALLY, 2004)

Conhecer a dinâmica do escoamento do tipo viscoso e incompressível nas curvas das tubulações são de extrema importância em priore na minimização de perdas, uma vez que se tratam de regiões onde ocorre brusca dissipação de energia por atrito, no qual estas são derivadas de um conjunto de efeitos tais como escoamento secundário, separação da camada limite e instabilidades.

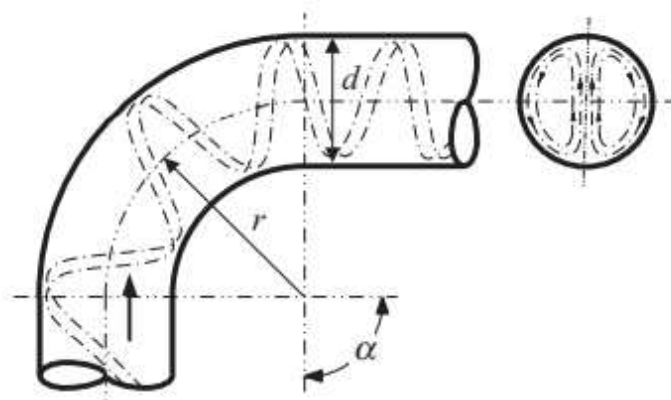
### 2.2.1 Escoamento secundário

Durante a curvatura de um tubo, o comportamento típico do escoamento é a formação de um fluxo secundário, representado na Fig. 3, caracterizado pelo surgimento de células de recirculação na seção transversal do duto (VIANA; CHAVES, 2014)

A primeira análise teórica do escoamento secundário foi feita por (DEAN; HURST, 1959) no qual mostrou que tal efeito é gerado devido à um gradiente de pressão radial provocado pela força centrífuga atuante sobre o fluido. O gradiente provoca ao escoamento

axial que este se desloque em direção ao lado mais externo do tubo e depois retorne ao longo da parede. No qual tal acontecimento provoca como consequência a movimentação do escoamento do lado mais interno do tubo em direção à região de pressão inferior, ou seja, mais perto do centro de curvatura da dobra. Tendo como resultado na seção transversal do tubo um campo de fluxo em espiral duplo e um par de vórtices helicoidais contra rotativos na curvatura do escoamento.(DUTTA et al., 2016; TAIBI, 2021)

Figura 3 – Escoamento Secundário

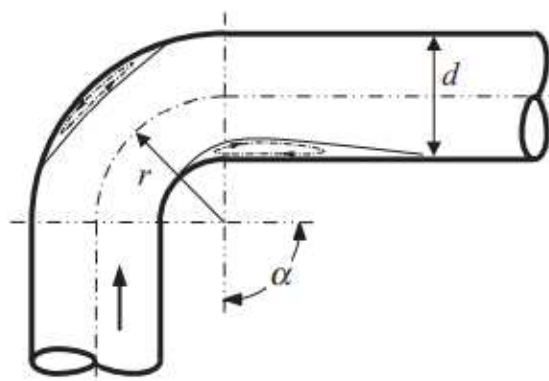


Fonte: (RENNELS; HUDSON, 2012).

### 2.2.2 Separação da camada limite

Para tubulações com pequeno raio de curvatura, também é observado o descolamento da camada limite do escoamento principal, representado na Fig. 4, tanto no raio externo como no interno da dobra, promovendo posteriormente a expansão do fluido contraído. Tal comportamento provoca ao escoamento significativa perda de pressão.(KIM; YADAV; KIM, 2014; TAKAMURA et al., 2012; HELLSTRÖM; SINHA; SMITS, 2011)

Figura 4 – Separação da Camada Limite



Fonte: (RENNELS; HUDSON, 2012).

### 3 MODELO FÍSICO

No presente trabalho é avaliado o escoamento interno em um trecho de tubulação da Unidade de Craqueamento Fluido Catalítico (UFCC) conforme visualizado na Fig. 5, tal trecho conecta o terceiro estágio de ciclones à câmara de orifício, sendo também responsável pelo transporte de gases de combustão, subproduto de carvão mineral. Neste trecho a região do escoamento correspondente a entrada na válvula é analisada para diferentes ângulos de fechamento da mesma especificados em Fig. 6. Alguns trabalhos anteriores visando a simplificação do problema consideraram esta região com perfil de velocidade completamente desenvolvido. Entretanto em tal região é esperado uma perfil de velocidade assimétrico e com alta zona de recirculação. (ÁVILA et al., 2021)

Figura 5 – Trecho de tubulação da Unidade de Craqueamento Fluido Catalítico (UFCC).

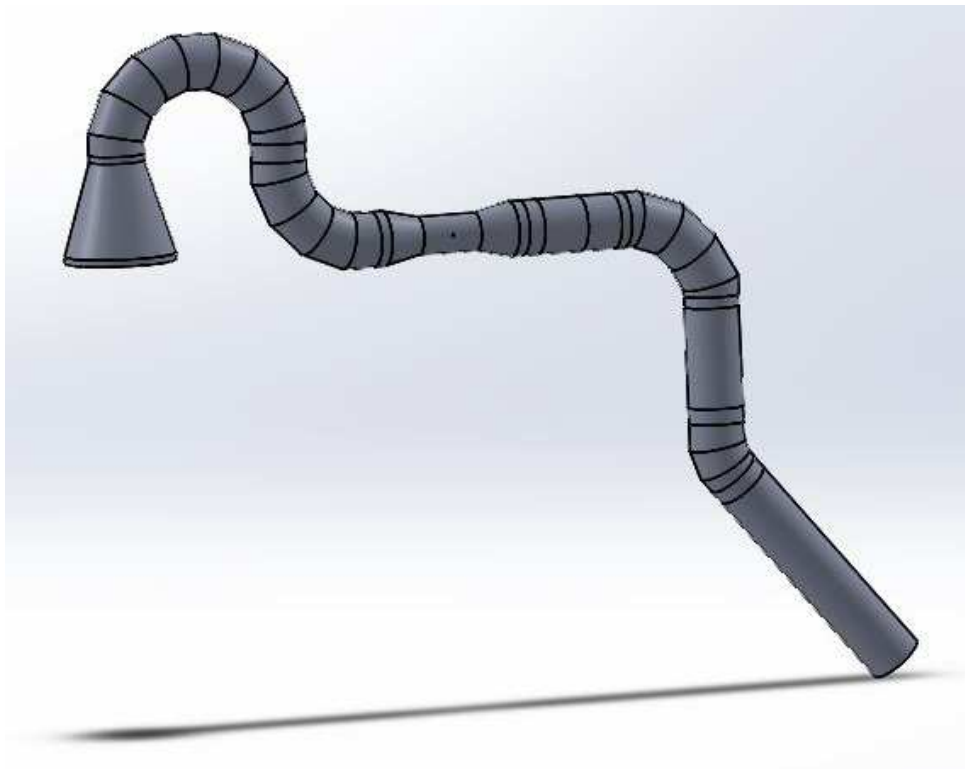
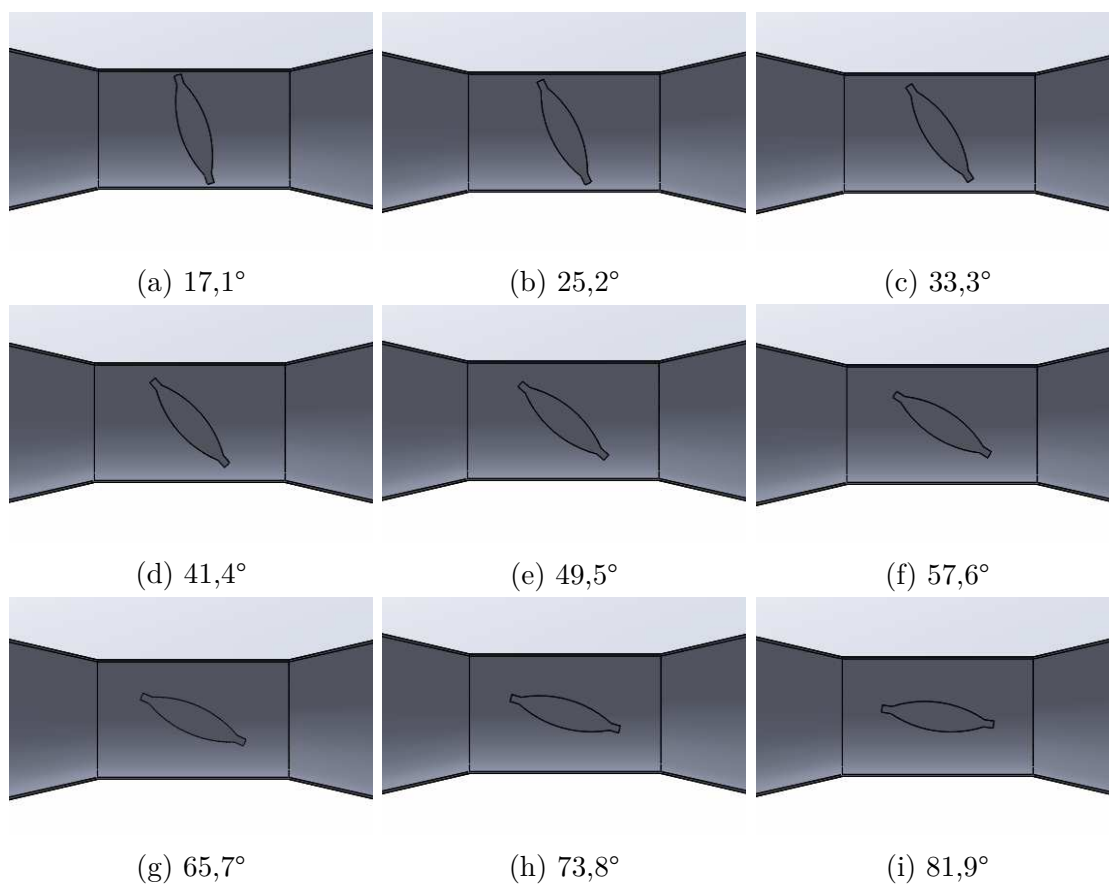


Figura 6 – Ângulos de Fechamento da Válvula



Elaborado pelo autor.

Tal trecho é responsável pelo transporte de gases de combustão, no qual algumas propriedades físicas consideradas constantes da mistura são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades físicas constantes da mistura

Propriedade	Valor	Unidade
$\rho_g$	$7,818 \cdot 10^{-1}$	$kg/m^3$
$T_g$	944,15	$K$
$\mu_g$	$3,8425 \cdot 10^{-5}$	$Pa.s$

No presente estudo a válvula é analisada em diferentes ângulos de fechamento, para tais algumas propriedades físicas são dadas em Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades físicas medidas da mistura

Ângulo de Fechamento [ ° ]	$U_o$ [ m/s ]	$P_g$ [ Pa ]
17,1	$7,740 \cdot 10^0$	$3,072 \cdot 10^5$
25,2	$1,531 \cdot 10^1$	$3,072 \cdot 10^5$
33,3	$2,751 \cdot 10^1$	$3,069 \cdot 10^5$
41,4	$4,525 \cdot 10^1$	$3,059 \cdot 10^5$
49,5	$6,339 \cdot 10^1$	$3,032 \cdot 10^5$
57,6	$6,958 \cdot 10^1$	$2,965 \cdot 10^5$
65,7	$4,120 \cdot 10^1$	$2,965 \cdot 10^5$
73,8	$4,120 \cdot 10^1$	$2,965 \cdot 10^5$
81,9	$4,120 \cdot 10^1$	$2,965 \cdot 10^5$

As propriedades iniciais para o caso teste é dado em Tab. 3.

Tabela 3 – Propriedades físicas medidas da mistura

Ângulo de Fechamento [ ° ]	$U_o$ [ m/s ]	$P_g$ [ Pa ]
51,86	$18,3169 \cdot 10^0$	$2,581 \cdot 10^5$

## 4 MODELO MATEMÁTICO

### 4.1 Equações de Governo

O escoamento do presente estudo é considerado como sendo do tipo monofásico, incompressível, turbulento e em regime permanente. Neste tópico serão apresentadas as equações governantes que serve de base para a realização das simulações computacionais deste trabalho.

#### 4.1.1 Equação da continuidade

A equação da continuidade é a equação representativa da condição de conservação de massa aplicado ao sistema em questão. Sendo dada pela relação 4.1.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) = 0 \quad (4.1)$$

Onde  $\nabla$  é definido conforme 4.2.

$$\nabla = \frac{\partial i}{\partial x} + \frac{\partial j}{\partial y} + \frac{\partial k}{\partial z} \quad (4.2)$$

#### 4.1.2 Equação da quantidade de movimento

A equação da quantidade de movimento advém da segunda Lei de Newton, no qual afirma que, a resultante das forças atuando em um sistema é igual a taxa de variação de momento do sistema. Tal relação é dada em 4.3.

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \nabla(\rho V V) = g + \nabla p + \mu \nabla^2 V + f \quad (4.3)$$

Onde  $f$  se refere como sendo a força superficial de interação fluido-sólido .

#### 4.1.3 Escoamentos monofásicos incompressíveis

Para escoamentos do tipo monofásico as equações de governo anteriores podem ser simplificadas conforme dado em 4.4 e 4.5. Uma vez que para tais tipos de escoamentos, a dinâmica dos fluidos são modeladas conjuntamente pelas equações da continuidade, quantidade de movimento e de energia. Entretanto para o presente estudo efeitos relacionados à categoria térmica são considerados por terem pequeno impacto sobre o escoamento.

$$\nabla V = 0 \tag{4.4}$$

$$\rho \left[ \frac{\partial(V)}{\partial t} + (V \nabla) V \right] = g - \nabla p + \mu \nabla^2 V + f \tag{4.5}$$



## 5 MÉTODO NUMÉRICO

### 5.1 Modelo de Turbulência

O modelo de turbulência usado foi o k- $\varepsilon$  que é derivado do método equações médias de Reynolds (RANS). Esse modelo resolve duas equações diferenciais de transporte, sendo uma para energia cinética turbulenta k e a outra para a taxa de dissipação  $\varepsilon$  relacionada. No fluent tais equações apresentam algumas modificações do trabalho original proposto por (SPALDING et al., 1974), no qual visando melhorar o desempenho do modelo propuseram conforme dado em 5.1 e 5.2.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]}{\partial x_j} + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right]}{\partial x_j} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (5.2)$$

Onde  $G_k$  retrata a geração de energia cinética devido ao gradiente de velocidade média,  $G_b$  a geração de energia cinética de turbulência devido a flutuabilidade,  $Y_M$  a contribuição da dilatação flutuante na turbulência compressível para a taxa de dissipação global,  $\sigma_k$  e  $\sigma_\varepsilon$  são os números de Prandtl turbulentos,  $S_k$  e  $S_\varepsilon$  termos de fonte definidos pelo usuário e por fim  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$  e  $C_{3\varepsilon}$  são constantes.

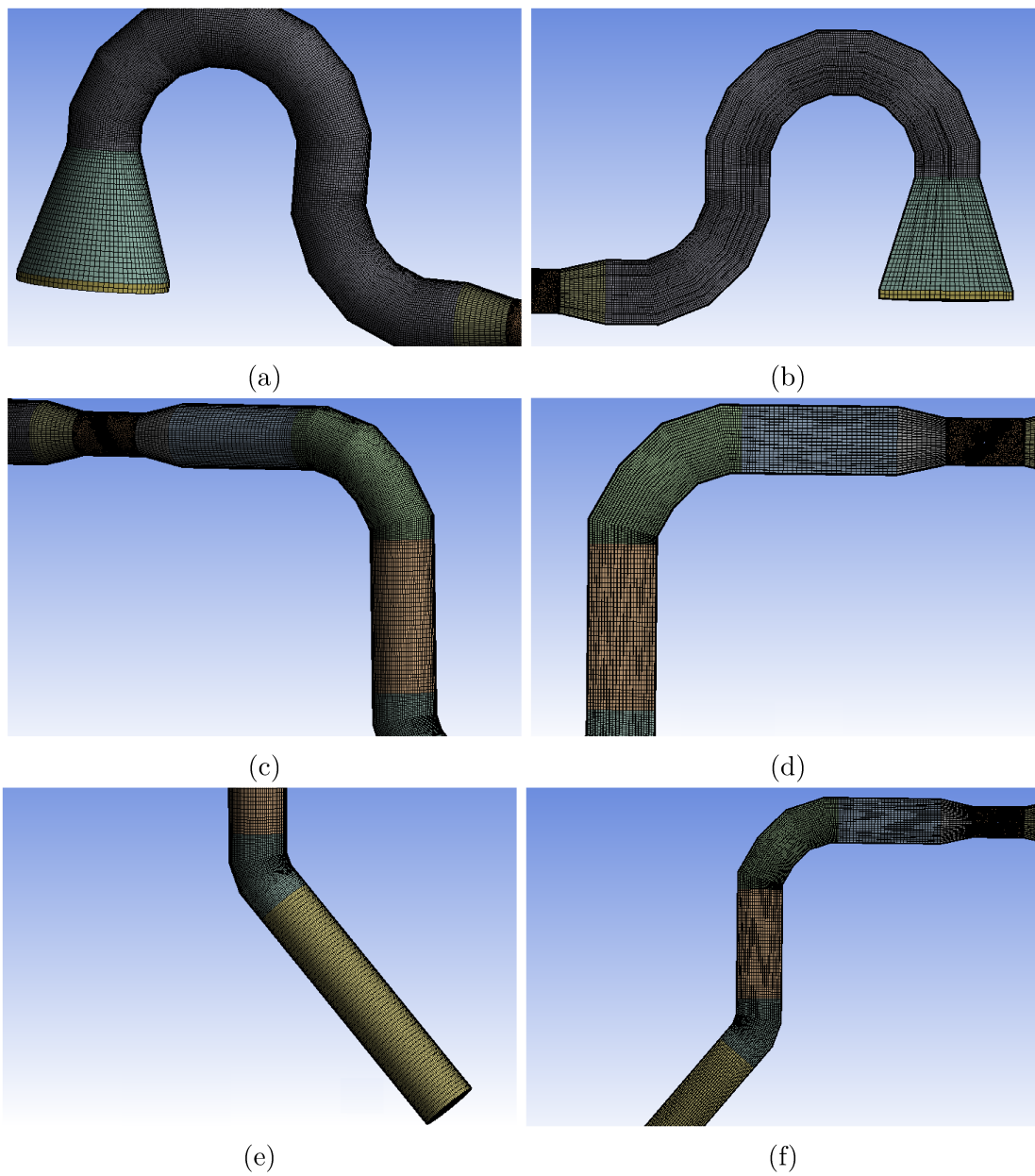
No fluent as equações foram computadas em um solucionador implícito Pressure-Based. O acoplamento pressão-velocidade escolhido foi o SIMPLE, enquanto o método de interpolação foi o upwind de segunda ordem. Este último foi escolhido principalmente devido a uma maior precisão em comparação com o de primeira ordem.

O critério de convergência empregado foi para resíduos da ordem de  $10^{-5}$  ao final da simulação

### 5.2 Grade Numérica

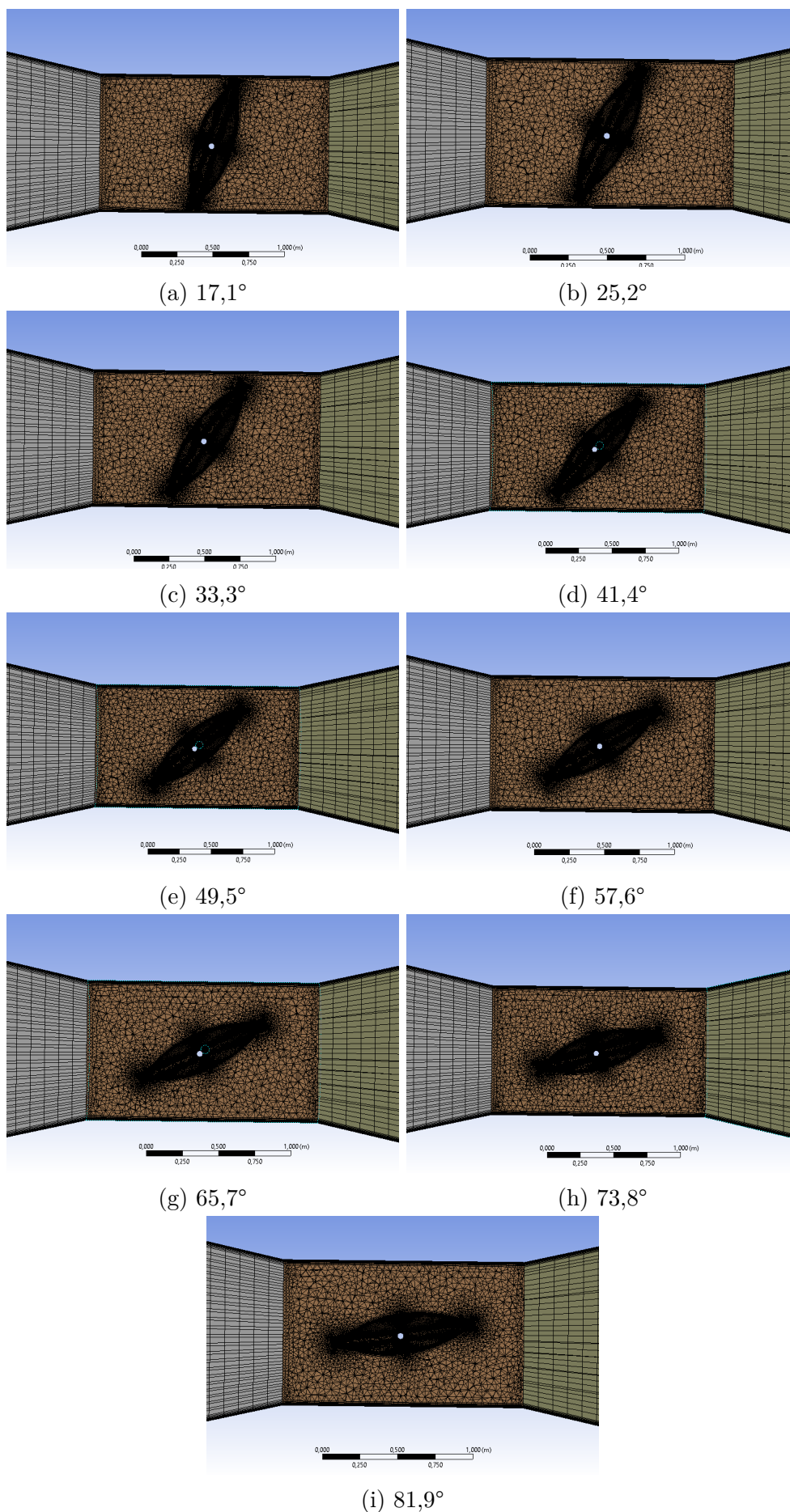
Para o presente estudo foi usado uma malha tridimensional com elementos do tipo hexaedrais em quase toda a estrutura conforme em Fig. 7, e do tipo tetraedrais apenas na região central em contato com a válvula como dado em Fig. 8.

Figura 7 – Regiões da malha gerada com elementos do tipo hexaedrais



Elaborado pelo autor.

Figura 8 – Região central da malha gerada com elementos do tipo tetraedrais



Elaborado pelo autor.

As regiões próximas à parede foram reparticionadas em camadas, de forma a garantir maior resolução numérica para a subcamada laminar. A contabilização do número de nós e elementos de cada célula é dado em Tab. 4

Tabela 4 – Numero de nós e elementos de cada malha gerada

Ângulo de Fechamento [ ° ]	Número de nós	Número de elementos
17,1	1667847	2552751
25,2	1651633	2517876
33,3	1633766	2490680
41,4	1632979	2489346
49,5	1628854	2487013
57,6	1623492	2480704
65,7	1620393	2476603
73,8	1620323	2478288
81,9	1681230	2474606

Elaborado pelo autor.

Um dos parâmetros utilizados para verificação da qualidade das malhas geradas foi o Skewness, tal medidor avalia o quão próximo do ideal uma célula se encontra, sendo 0 representado como ideal.(ZANUTTO, 2015). A escala de classificação Skewness é dado em Tab. 5.

Tabela 5 – Escala de classificação Skewness

Excelente	Muito bom	Bom	Aceitável	Ruim	Inaceitável
0 - 0,25	0,25 - 0,50	0,50 - 0,80	0,80 - 0,94	0,95 - 0,97	0,98 - 1,00

Fonte: (ANSYS, 2013).

Em Tab. 6 é apresentado o valor de Skewness obtido para cada malha gerada.

Tabela 6 – Parâmetro Skewness para cada malha gerada

Ângulo de Fechamento [ ° ]	Skewness
17,1	0,213
25,2	0,213
33,3	0,215
41,4	0,216
49,5	0,216
57,6	0,216
65,7	0,216
73,8	0,216
81,9	0,216

Elaborado pelo autor.

O outro parâmetro utilizado para verificação da qualidade das malhas geradas foi a métrica Orthogonal Quality, tal medidor avalia o quanto o ângulo do elemento gerado na malha está próximo do ideal, que seria 90° para elementos de face quadrilateral e 60° para elementos de face triangular, sendo 1 o melhor valor para ortogonalidade média dos elementos. (MAIA et al., 2019). A escala de classificação Skewness é dado em Tab. 7.

Tabela 7 – Escala de classificação Orthogonal Quality

Inaceitável	Ruim	Aceitável	Bom	Muito bom	Excelente
0 - 0,001	0,001 - 0,14	0,15 - 0,20	0,20 - 0,69	0,70 - 0,95	0,95 - 1,00

Fonte: (ANSYS, 2013).

Em Tab. 8 é apresentado o valor de Orthogonal Quality obtido para todas as malhas geradas.

Tabela 8 – Parâmetro Orthogonal Quality para cada malha gerada

Ângulo de Fechamento [ ° ]	Orthogonal Quality
17,1	0,805
25,2	0,806
33,3	0,805
41,4	0,804
49,5	0,804
57,6	0,804
65,7	0,805
73,8	0,805
81,9	0,805

Elaborado pelo autor.

Uma simulação teste inicial foi executada como instrumento de análise superficial do escoamento. Os parâmetros Orthogonal Quality e Skewness desta malha são dados em Tab. 9 e Tab. 10.

Tabela 9 – Parâmetro Skewness da malha teste.

Ângulo de Fechamento [ ° ]	Skewness
51,86	0,143

Elaborado pelo autor.

Tabela 10 – Parâmetro Orthogonal quality da malha teste.

Ângulo de Fechamento [ ° ]	Orthogonal Quality
51,86	0,904

Elaborado pelo autor.

No qual classificando estes valores conforme Tab. 7 e Tab. 5, tal malha se categoriza como sendo capaz de gerar valores aceitáveis.

### 5.3 Condições de contorno

O domínio computacional foi especificado com três condições de contorno, na entrada foi atribuída a velocidade média  $U_o$  calculada pela vazão da válvula principal medida, a energia cinética turbulenta uniforme  $k_o$  obtida pela relação 5.3, onde  $I$  equivale a

intensidade turbulenta dada por 5.4, e a taxa de dissipação específica  $\varepsilon_o$  correspondente a 5.5 no qual  $l$  equivale à escala de comprimento turbulenta dada por 5.6 em que  $L$  é o comprimento característico da tubulação que neste caso foi considerado como sendo o diâmetro do tubo.

$$k_o = \frac{3}{2}(IU_o)^2 \quad (5.3)$$

$$I = 0,16Re^{-0,125} \quad (5.4)$$

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{\frac{3}{4}}k_o^{\frac{3}{2}}}{l} \quad (5.5)$$

$$l = 0,07L \quad (5.6)$$

No qual através dos dados iniciais do escoamento apresentado em Tab. 1 e Tab. 2 é montado Tab. 11.

Tabela 11 – Condições de contorno para os diferentes ângulos de abertura

Ângulo de Fechamento [ ° ]	Re [ - ]	$k_o$ [ $m^2/s^2$ ]	$\varepsilon$ [ $m^2/s^3$ ]	I [ % ]
17,1	$2,205 \cdot 10^5$	$1,062 \cdot 10^{-1}$	$5,801 \cdot 10^{-2}$	$3,437 \cdot 10^{-2}$
25,2	$4,362 \cdot 10^5$	$3,504 \cdot 10^{-1}$	$3,477 \cdot 10^{-1}$	$3,156 \cdot 10^{-2}$
33,3	$7,837 \cdot 10^5$	$9,769 \cdot 10^{-1}$	$1,619 \cdot 10^0$	$2,933 \cdot 10^{-2}$
41,4	$1,289 \cdot 10^6$	$2,334 \cdot 10^0$	$5,978 \cdot 10^0$	$2,756 \cdot 10^{-2}$
49,5	$1,806 \cdot 10^6$	$4,209 \cdot 10^0$	$1,448 \cdot 10^1$	$2,643 \cdot 10^{-2}$
57,6	$1,982 \cdot 10^6$	$4,954 \cdot 10^0$	$1,849 \cdot 10^1$	$2,612 \cdot 10^{-2}$
65,7	$1,174 \cdot 10^6$	$1,980 \cdot 10^0$	$4,673 \cdot 10^0$	$2,789 \cdot 10^{-2}$
73,8	$1,174 \cdot 10^6$	$1,980 \cdot 10^0$	$4,673 \cdot 10^0$	$2,789 \cdot 10^{-2}$
81,9	$1,174 \cdot 10^6$	$1,980 \cdot 10^0$	$4,673 \cdot 10^0$	$2,789 \cdot 10^{-2}$

Elaborado pelo autor.

Na parede do tubo, a condição de não deslizamento foi aplicada para velocidade, e na saída o gradiente das variáveis de fluxo na direção do escoamento foi considerada como zero.

Para a malha teste, as condições de contorno são dados em Tab. 12.

Tabela 12 – Condições de contorno caso teste

Ângulo de Fechamento [ ° ]	Re [ - ]	$k_o$ [ $m^2/s^2$ ]	$\varepsilon$ [ $m^2/s^3$ ]	I [ % ]
51,86	$5,217 \cdot 10^5$	$4,794 \cdot 10^{-1}$	$2,228 \cdot 10^{-1}$	$3,08 \cdot 10^{-2}$

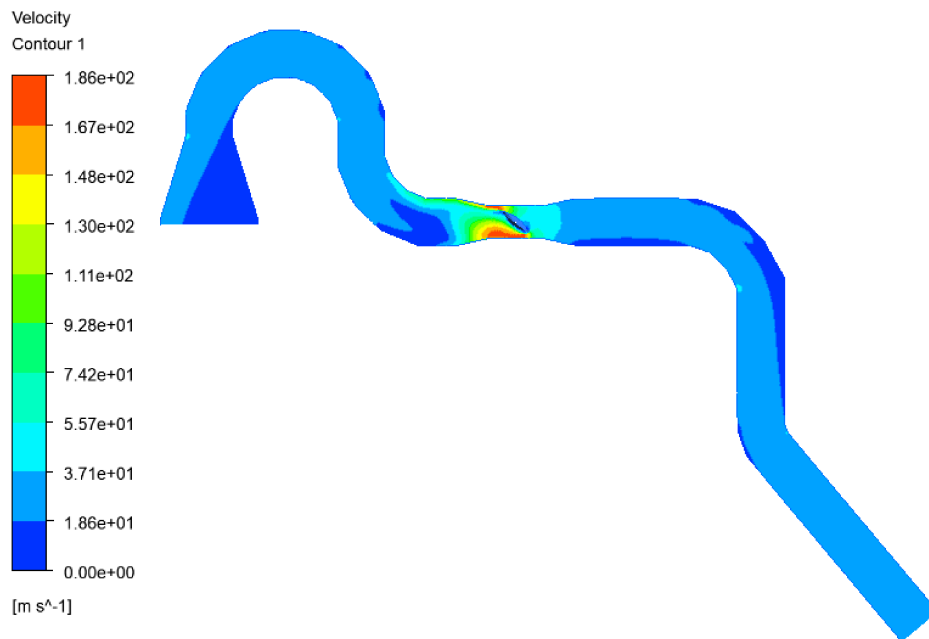
Elaborado pelo autor.

## 6 Resultados preliminares

O principal objetivo do presente trabalho é analisar o perfil de velocidade do escoamento ao longo da curvatura, e região de entrada do fluido pela válvula. No qual é esperado que devido a curvatura o escoamento não chegue na região de entrada da válvula na sua forma completamente desenvolvido, mas sim com perfil de velocidade assimétrico e alta zona de recirculação.

Uma simulação teste inicial foi executada como instrumento de análise superficial do escoamento. E através dos resultados obtidos foi possível registrar as regiões de mudança de velocidade e pressão através do tubo, como pode ser visto em Fig. 9 e Fig. 10.

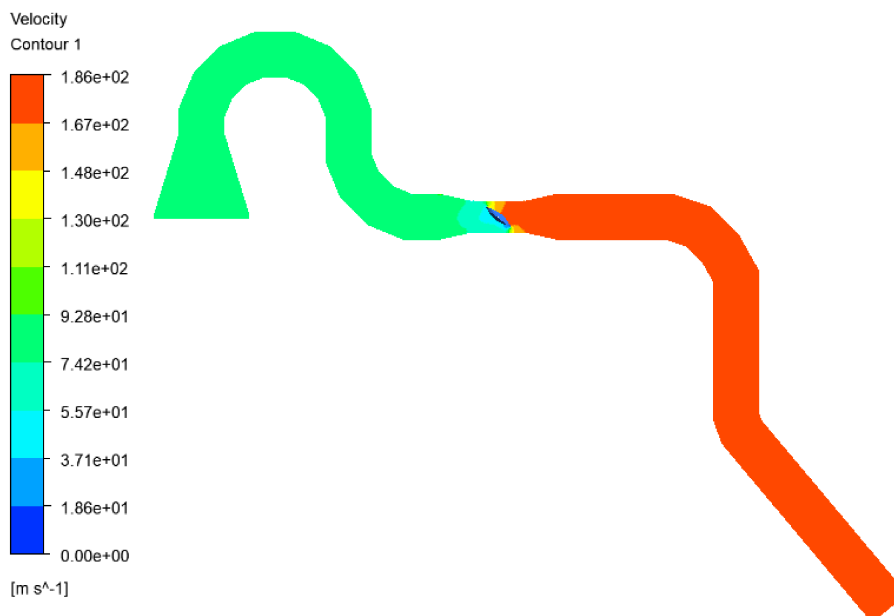
Figura 9 – Distribuição da velocidade na secção longitudinal do tubo.



Elaborado pelo autor.



Figura 10 – Distribuição da pressão na secção longitudinal do tubo.



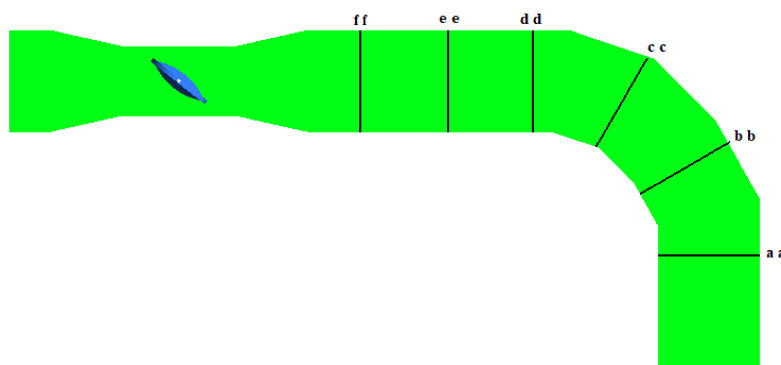
Elaborado pelo autor.

No qual o aumento significativo da velocidade na região estreitada do duto ocorre devido a redução da área de escoamento entre o tubo e a extremidade da válvula, sendo por consequência responsável pela geração de vórtices, recirculação e instabilidades na região como pode ser visto em Fig.10

A partir de tal análise é possível prever que com o aumento do ângulo de abertura da válvula o escoamento se torne mais suave e com um perfil de velocidade mais uniforme.

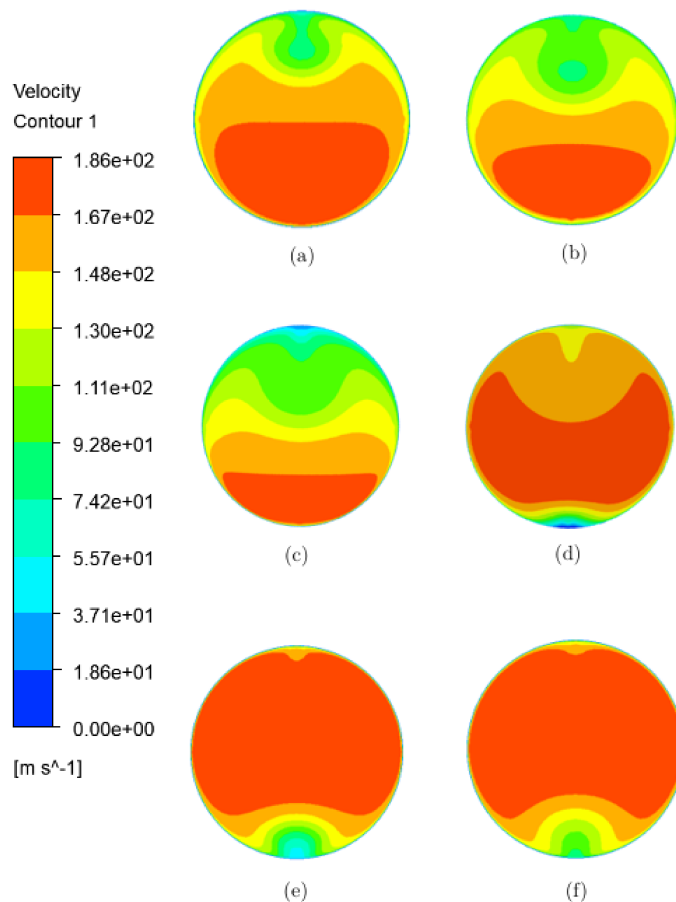
Para observação do desenvolvimento do escoamento pela curvatura até a região de entrada da válvula seis secções como dadas em Fig. 11 foram selecionadas. No qual a distribuição da velocidade em tais secções é apresentado em Fig. 12.

Figura 11 – Secções selecionadas para representação da distribuição da velocidade.



Elaborado pelo autor.

Figura 12 – Distribuição da velocidade em diferentes secções transversais do tubo.



Elaborado pelo autor.

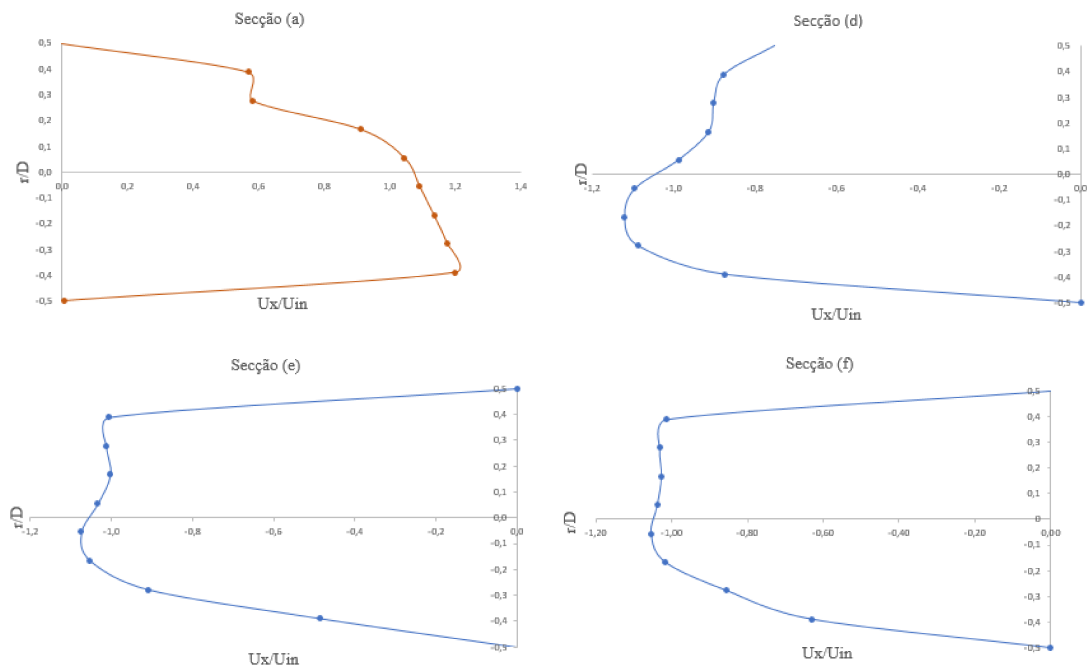
Devido a significativa dissipação de energia ou perda de momento em uma curvatura, o perfil de velocidade do escoamento muda de concavidade criando desta forma um ponto de inflexão no perfil. Tais acontecimentos explicam a formação do chamado 'dorso de camelo' que pode ser visualizado ao longo das secções Fig. 12(a) a Fig. 12(c).

Além disso é possível observar também a ocorrência de uma taxa de aumento da aceleração do escoamento em direção a parede mais externa do tubo, desencadeada por gradientes de pressão na entrada da curvatura, que se desenvolvem devido à força centrífuga presente.

Devido a este comportamento, no escoamento ao longo da curvatura, é possível perceber duas regiões de baixa velocidade provocado devido à separação da camada limite, sendo estas identificado em Fig. 9.

Os resultados são também demonstrados através do perfil de velocidade de tais secções, conforme dado em Fig. 13.

Figura 13 – Perfil de velocidade para secções seleccionadas



Elaborado pelo autor.

No qual da secção (d) para (f) é possível ser visualizado o aumento da velocidade em direção à região mais externa da tubulação, como também de (e) para (f) a tendência do escoamento para voltar para condição de completamente desenvolvido.

## 7 Conclusão

É sabido que o escoamento em tubulações ao longo de acessórios como curvaturas e válvulas provocam ao escoamento significativa dissipação de energia ou perda de momento, no qual é responsável por efeitos tais como escoamento secundário, separação da camada limite, recirculação e instabilidades. Por isso prever o escoamento logo após tais regiões se torna extremamente necessário, em priore, para o ramo industrial.

O intuito verdadeiro do presente trabalho seria, realizar a simulação do escoamento em um trecho de tubulação da Unidade de Craqueamento Fluido Catalítico (UFCC), avaliando para diferentes ângulos de abertura da válvula, o comportamento do perfil de velocidade, ao longo da curvatura até a região de entrada da válvula. A ideia seria que as rotinas computacionais acontecessem por meio MFSim, podendo posteriormente serem repetidas e comparadas com os softwares mais utilizados de engenharia como o Ansys e o OpenFOAM.

Entretanto devido a limitação computacional por parte do autor, não foi possível a realização do que era pretendido, em vez disso foi feita a construção e análise das malhas elaboradas para os diferentes ângulos de abertura propostos e a simulação de uma malha teste de baixa qualidade mas com resultados aceitáveis, por meio do software comercial Ansys 19.0.

Com relação a etapa de construção das malhas para cada ângulo de abertura, estas apresentaram valores aceitáveis para os parâmetros de qualidade Skewness e Orthogonal Quality, entretanto o estudo de independência de malha não foi realizado. Tal estudo é extremamente necessário em quaisquer simulações CFD, uma vez que garante que, não ocorra influência das malhas nos resultados das simulações.

Outro aspecto também não investigado foi a dimensão do ( $y^+$ ) da parede, no qual segundo a literatura deve ser  $> 1$ , uma vez que, o modelo de turbulência escolhido foi o  $k-\varepsilon$ , com tratamento de parede aprimorado.

As soluções preliminares apresentadas ainda assim foram capazes de mostrar superficialmente os efeitos teóricos esperados.

Tais como diminuição expressiva da pressão na região da válvula devido a perda de energia significativa em tal região.

# Referências

- ANSYS, I. Ansys meshing user's guide. *vol*, v. 15317, p. 724–746, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- ÁVILA, Í. A. M. d. et al. Modelagem matemática e computacional de interação fluido-estrutura com elementos de casca curvilíneos tridimensionais. Universidade Federal de Uberlândia, 2021. Citado na página 11.
- BOLLELI, F. F. M. Talyson de M. *Aula 3 Perda de carga*. [S.l.], 2021. Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5626814/mod\\_resource/content/2/Aula%20%20%20%202808.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5626814/mod_resource/content/2/Aula%20%20%20%202808.pdf)>. Acesso em: 29 abr. 2021. Citado na página 7.
- CENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. *Mecânica dos fluidos-3*. [S.l.]: Amgh Editora, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 9.
- CHIREMSEL, R. et al. Numerical investigation of an unsteady and anisotropic turbulent flow downstream a 90 bend pipe with and without ribs. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, Shahid Chamran University of Ahvaz, n. Articles in Press, 2021. Nenhuma citação no texto.
- CRAWFORD, N. et al. A numerical investigation of the flow structures and losses for turbulent flow in 90 elbow bends. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 223, n. 1, p. 27–44, 2009. Citado na página 9.
- DEAN, W.; HURST, J. Note on the motion of fluid in a curved pipe. *Mathematika*, London Mathematical Society, v. 6, n. 1, p. 77–85, 1959. Citado na página 9.
- DUTTA, P.; NANDI, N. Study on pressure drop characteristics of single phase turbulent flow in pipe bend for high reynolds number. *ARPJ. Eng. Appl. Sci*, v. 10, n. 5, p. 2221–2226, 2015. Citado na página 9.
- DUTTA, P.; NANDI, N. Numerical study on turbulent separation reattachment flow in pipe bends with different small curvature ratio. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series C*, Springer, v. 100, n. 6, p. 995–1004, 2019. Citado na página 7.
- DUTTA, P. et al. Numerical study on flow separation in 90° pipe bend under high reynolds number by k- $\epsilon$  modelling. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Elsevier, v. 19, n. 2, p. 904–910, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 10.
- HELLSTRÖM, L. H.; SINHA, A.; SMITS, A. J. Visualizing the very-large-scale motions in turbulent pipe flow. *Physics of Fluids*, American Institute of Physics, v. 23, n. 1, p. 011703, 2011. Citado na página 10.
- KALPAKLI, A.; ÖRLÜ, R. Turbulent pipe flow downstream a 90 pipe bend with and without superimposed swirl. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Elsevier, v. 41, p. 103–111, 2013. Citado na página 9.

- KIM, J.; YADAV, M.; KIM, S. Characteristics of secondary flow induced by 90-degree elbow in turbulent pipe flow. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, Taylor & Francis, v. 8, n. 2, p. 229–239, 2014. Citado na página 10.
- MAIA, S. V. S. et al. Análise estrutural de uma fuselagem para o aerodesign. Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2019. Citado na página 20.
- NAPHON, P.; WONGWISES, S. A review of flow and heat transfer characteristics in curved tubes. *Renewable and sustainable energy reviews*, Elsevier, v. 10, n. 5, p. 463–490, 2006. Citado na página 9.
- RENNELS, D. C.; HUDSON, H. M. *Pipe flow: A practical and comprehensive guide*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012. Citado na página 10.
- SPALDING, D. B. et al. Combustion of hydrogen-air jets in local chemical equilibrium: A guide to the charnal computer program. 1974. Citado na página 16.
- SPEEDING, P.; BÉNARD, E.; MCNALLY, G. Fluid flow through 90 degree bends. *Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing*, Wiley Online Library, v. 12, n. 1-2, p. 107–128, 2004. Citado na página 9.
- SUDO, K.; SUMIDA, M.; HIBARA, H. Experimental investigation on turbulent flow in a circular-sectioned 90-degree bend. *Experiments in Fluids*, Springer, v. 25, n. 1, p. 42–49, 1998. Citado na página 9.
- TAIBI, R. *CFD investigation of fluid flow within elbow pipes*. Dissertação (Mestrado) — uis, 2021. Citado na página 10.
- TAKAMURA, H. et al. Flow visualization and frequency characteristics of velocity fluctuations of complex turbulent flow in a short elbow piping under high reynolds number condition. *Journal of Fluids Engineering*, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, v. 134, n. 10, 2012. Citado na página 10.
- VIANA, S.; CHAVES, C. A. Modelagem e simulação em tubos curvos usando dinâmica de fluídos computacional. *Universidade Taubaté, Unitau, Taubaté, São Paulo, SP*, 2014. Citado na página 9.
- ZANUTTO, C. P. Aplicação de técnicas de fluidodinâmica computacional (cfd) na avaliação da hidrodinâmica e da transferência de massa em estágio de coluna de destilação. Universidade Federal de São Carlos, 2015. Citado na página 19.