



Gusthavo Ribeiro Salomão

**Projeto e simulação de um sistema de
geometria variável para propulsão em um
veículo robótico**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC–Rio.

Orientador: Marco Antonio Meggiolaro

Rio de Janeiro
Julho de 2018

Agradecimentos

Ao Professor Marco Antonio Meggiolaro, orientador deste trabalho, pela amizade e pelo apoio cedido.

À Professora Angela Nieckele, pela solicitude e pela ajuda fornecida durante o período de elaboração do projeto.

Aos engenheiros Julio Guedes e Daniel Freitas, pelas ajudas e pela confiança depositada.

Aos meus pais, Wagner e Margarete, pelo imenso amor e apoio cedidos durante o curso.

Ao meu irmão, Marcello, pela amizade, pelo companheirismo e pela confiança.

Aos meus colegas, pelas incríveis amizades feitas e bons momentos vividos juntos durante a graduação.

Resumo

Projeto e simulação de um sistema de geometria variável para propulsão em um veículo robótico

Neste trabalho são analisados os efeitos fluidodinâmicos no escoamento sobre diferentes tipos de geometria no interior de uma tubulação para aplicação em um veículo robótico. Perfis cônico, elíptico e parabólico são considerados nas simulações realizadas no software comercial *Ansys Fluent*. A análise verifica a viabilidade da instalação de um sistema de geometria variável em um robô autônomo de inspeção de poços de óleo e gás de xisto. O modelo de turbulência adotado, $k-\epsilon$ com lei de parede padrão, é validado para a dinâmica do problema através de simulações baseadas na reprodução de parâmetros utilizados em um experimento similar. A comparação dos resultados é realizada com base em dados empíricos disponíveis e também através de resultados obtidos por meio de um modelo matemático. Simulações são realizadas para escoamentos axissimétricos bidimensionais e tridimensionais em regime permanente para obtenção dos resultados referentes ao projeto. Um teste de convergência de malha é conduzido para validar também a gama de valores de y^+ obtidos nas simulações para diferentes malhas e faixas de Reynolds. Com base nos resultados, um protótipo do sistema de geometria variável é modelado e dimensionado em ferramenta CAD *Solidworks*. Verifica-se que a instalação do sistema proposto reduz o consumo de energia do robô.

Palavras-chave

Inspeção de poços; robótica; poço; CFD; CAD.

Abstract

Design and simulation of a variable geometry system for propulsion in a robotic vehicle

In this work an analysis is conducted based on the fluid dynamics effects caused by flows over different types of geometries inside a pipe for application in a robotic vehicle. Conical, elliptical and parabolic profiles are considered in the simulations performed in Ansys Fluent. The analysis verifies the feasibility of installing a variable geometry system in an autonomous robot for oil and shale gas well inspection. The turbulence model $k-\epsilon$ with standard wall functions is validated for the dynamics of the problem through simulations based on reproduction of parameters used in a similar experiment. The results are compared based on available empirical data, as well as on results obtained by a mathematical model. Simulations are performed for two-dimensional and three-dimensional axisymmetric flows under steady state condition to obtain the solutions related to the variable geometry system. Also, a mesh independence test is conducted to validate the range of y^+ values obtained through simulations for different meshes and Reynolds numbers. Based on the results, a prototype of the variable geometry system is designed in Solidworks. It is verified that the installation of the proposed system reduces the robot's energy consumption.

Keywords

Well inspection; robotics; well; CFD; CAD.

Sumário

| | |
|--|----|
| Lista de Abreviaturas | 9 |
| 1 Introdução | 10 |
| 1.1 Motivação | 10 |
| 1.2 Objetivo | 12 |
| 1.3 Revisão Bibliográfica | 14 |
| 1.4 Metodologia | 16 |
| 1.5 Estrutura do Trabalho | 16 |
| 2 Fundamentos Teóricos | 18 |
| 2.1 O Modelo k- ϵ Padrão | 18 |
| 2.2 Lei de Parede Padrão | 19 |
| 2.3 Força de Arrasto | 22 |
| 2.4 Comprimento de Entrada | 23 |
| 2.5 Perfis Geométricos Adotados | 24 |
| 3 Procedimentos de Simulação | 28 |
| 3.1 <i>Ansys Workbench</i> | 28 |
| 3.2 Validação do Modelo de Turbulência | 29 |
| 3.3 Simulação do Sistema de Geometria Variável | 37 |
| 3.4 Teste de Independência da Malha | 40 |
| 4 Modelagem do Sistema | 42 |
| 4.1 Disposição dos Componentes | 42 |
| 4.2 Dimensionamento da Mola | 46 |
| 5 Resultados e Discussão | 49 |
| 5.1 Resultados das Validações | 49 |
| 5.2 Resultados das Simulações para Geometria Colapsada | 51 |
| 5.3 Resultados das Simulações para Geometria Expandida | 55 |
| 5.4 Propriedades da Mola | 57 |
| 6 Conclusões e Sugestões | 59 |

Lista de figuras

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Desenho esquemático representando vista de perfil do robô | 10 |
| 1.2 | Desenho esquemático representando vista frontal do robô | 11 |
| 1.3 | Desenho esquemático das condições de percurso do robô | 12 |
| 1.4 | Vistas isométricas do protótipo do sistema de geometria variável | 13 |
| 2.1 | Painel de modelo de turbulência $k - \epsilon$ do <i>Fluent</i> | 19 |
| 2.2 | Gráfico das camadas em escoamentos turbulentos [1] | 20 |
| 2.3 | Representação do conceito das leis de parede | 21 |
| 2.4 | Representação do perfil cônico | 25 |
| 2.5 | Representação do perfil parabólico | 26 |
| 2.6 | Representação do perfil elíptico | 26 |
| 2.7 | Gráfico comparativo com os perfis considerados no trabalho | 27 |
| 3.1 | Módulo do <i>Workbench</i> utilizado nas simulações | 28 |
| 3.2 | Geometria 2D utilizada para o processo de validação | 30 |
| 3.3 | Ampliação da malha utilizada no processo de validação | 31 |
| 3.4 | Janela de materiais do <i>Fluent</i> | 32 |
| 3.5 | Janela de <i>cell zone</i> do <i>Fluent</i> | 33 |
| 3.6 | Janela de métodos de solução do <i>Fluent</i> | 34 |
| 3.7 | Geometria utilizada no processo de validação 3D | 35 |
| 3.8 | Vista da região de saída da malha | 36 |
| 3.9 | Vista da região que representa parte da cápsula no interior da malha | 36 |
| 3.10 | Malha utilizada para simulação do perfil elíptico em tubulação de 4 polegadas | 38 |
| 3.11 | Vista isométrica da geometria expandida simplificada | 39 |
| 3.12 | Vista frontal da geometria expandida simplificada | 40 |
| 3.13 | Malhas utilizadas no teste de independência de malha | 41 |
| 4.1 | Vistas frontais dos estágios do sistema de geometria variável | 42 |
| 4.2 | Vistas de perfil dos estágios do sistema de geometria variável | 43 |
| 4.3 | Vista isométrica do sistema de guia linear elétrico | 44 |
| 4.4 | Vista isométrica do sistema sem as pás elípticas | 45 |
| 4.5 | Vista explodida do sistema de geometria variável | 46 |
| 4.6 | Vista de perfil com dimensões do sistema de elevação das pás para o caso de tubulação de 3 polegadas | 47 |
| 4.7 | Vista de perfil com dimensões do sistema de elevação das pás para o caso de tubulação de 4 polegadas | 47 |
| 4.8 | Desenho simplificado para dimensionamento da mola | 48 |
| 5.1 | Gráfico da simulação de validação para queda de pressão | 49 |
| 5.2 | Gráfico da simulação de validação para a tensão cisalhante | 50 |
| 5.3 | Gráfico dos valores de y^+ obtidos nas simulações de validação | 51 |
| 5.4 | Gráfico da queda de pressão para diferentes malhas | 52 |
| 5.5 | Gráfico da tensão cisalhante na tubulação para diferentes malhas | 52 |
| 5.6 | Gráfico de valores de y^+ obtidos para diferentes malhas | 53 |

| | | |
|-----|--|----|
| 5.7 | Gráfico de queda de pressão para óleo e tubulação de 4 polegadas | 54 |
| 5.8 | Gráfico de valores de y^+ para óleo e tubulação de 4 polegadas | 54 |
| 5.9 | Gráfico de queda de pressão para configurações expandida e colapsada, para escoamento de gás em tubulação de 3 polegadas | 57 |

Lista de tabelas

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Condições de operação do veículo robótico | 14 |
| 1.2 | Dados experimentais obtidos por J Dul [2] | 15 |
| 1.3 | Dados obtidos pelo modelo matemático de Van den Kroonenberg [3] | 15 |
| 5.1 | Tabela com dados da validação e erros | 50 |
| 5.2 | Forças de arrasto para gás com geometria colapsada | 55 |
| 5.3 | Forças de arrasto para óleo com geometria colapsada | 55 |
| 5.4 | Forças de arrasto para gás com geometria expandida | 56 |
| 5.5 | Forças de arrasto para óleo com geometria expandida | 56 |
| 5.6 | Resultados do dimensionamento da mola | 57 |

Lista de Abreviaturas

CC – Corrente contínua

ID – Diâmetro interno

1

Introdução

1.1

Motivação

A inspeção de poços de óleo e gás é uma operação de cunho preventivo que visa identificar não conformidades nas paredes do poço. Devido à necessidade de pausa na produção, a inspeção torna-se uma operação de alto custo que leva empresas de perfuração a procurarem novas alternativas para o processo de inspeção. Uma falha em um poço gera retrabalho e, dependendo do custo de reparo, pode levar ao abandono do poço.

Um veículo robótico autônomo com rodas capaz de inspecionar poços de óleo e gás de xisto ativos em ambientes *onshore* reduz significativamente o custo de manutenção dos mesmos. Além disso, ainda permite, sem causar prejuízos à produção, avaliar a integridade dos mesmos através de perfilamento remoto. O robô, que possui flexibilidade no chassi e é capaz de se locomover dentro de tubulações de diâmetros variados, pode operar tanto em poços verticais como horizontais. As Figuras 1.1 e 1.2 apresentam o desenho esquemático do robô.

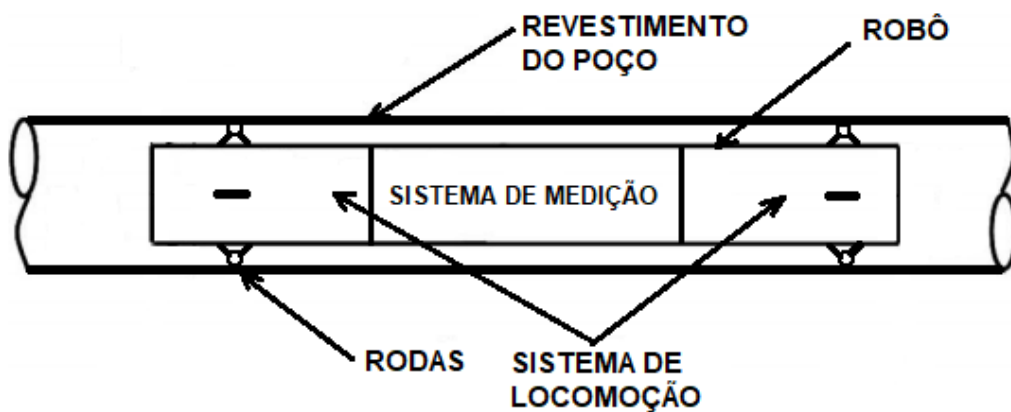


Figura 1.1: Desenho esquemático representando vista de perfil do robô

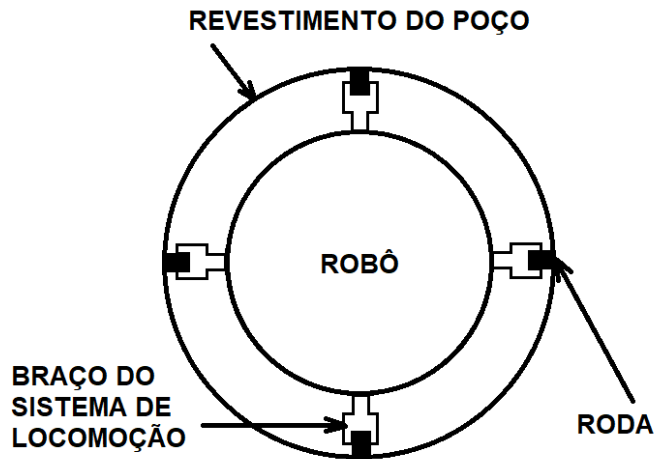


Figura 1.2: Desenho esquemático representando vista frontal do robô

No entanto, como o robô não possui cabo umbilical para garantir a passagem de energia e sinal de uma fonte externa, ele precisa dispor de baterias para alimentar todo o sistema de medição e os motores de corrente contínua (CC) do sistema de locomoção; desde o lançamento do robô até seu retorno à superfície. O peso de baterias que ele carrega depende diretamente da energia necessária ao seu deslocamento da superfície até o poço e vice-versa. Por isso, o consumo de energia do robô móvel torna-se um fator decisivo no projeto. Uma redução no seu peso reduz a exigência nos motores e consequentemente a quantidade de baterias necessárias.

No percurso de descida até o poço, como é mostrado na Figura 1.3(a), o peso do robô auxilia em sua locomoção, mas o escoamento de fluido em direção contrária ao seu deslocamento gera forças de arrasto que aumentam o consumo de energia até o poço. Após a realização do trabalho de inspeção, no caminho de retorno à superfície, esquematizado na Figura 1.3(b), o peso do robô contribui para o aumento de carga nos motores CC, mas seu deslocamento agora é a favor do escoamento, e a força de arrasto provocada pelo fluido passa a auxiliar na locomoção do robô.

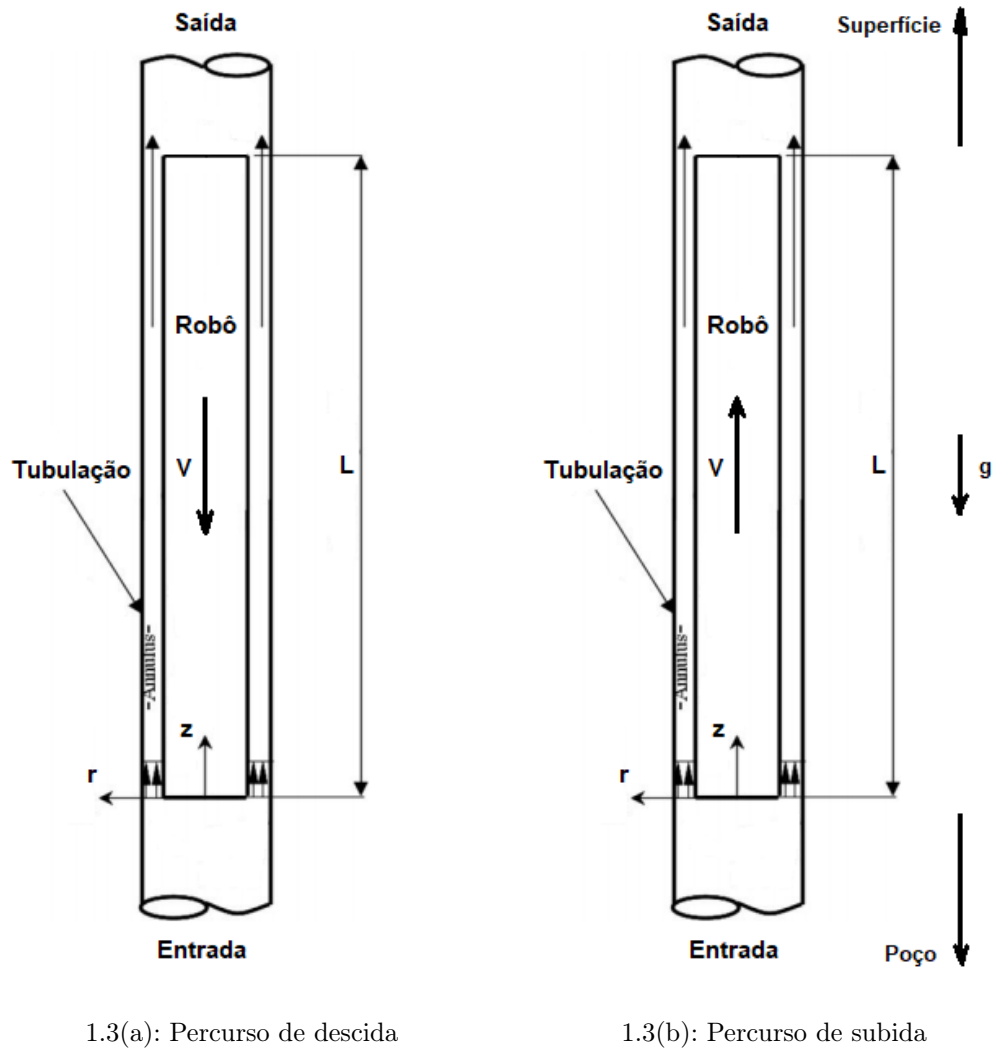
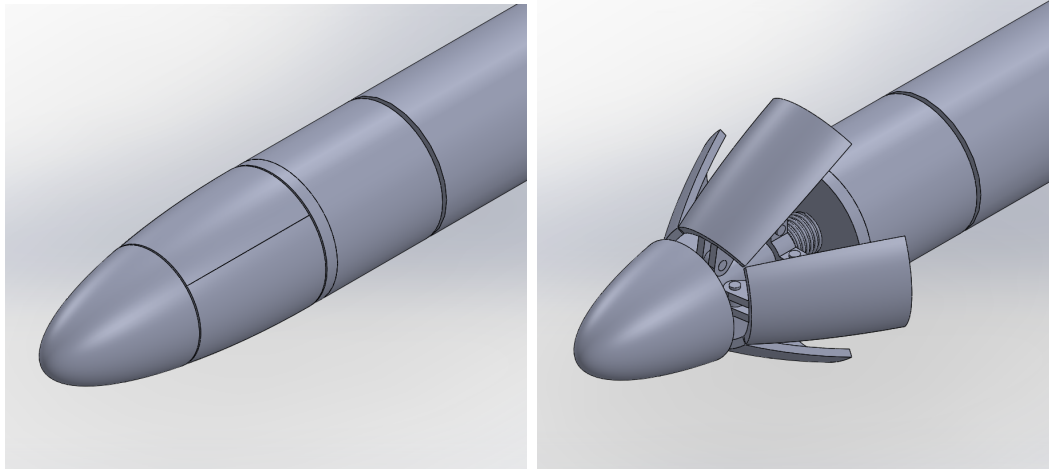


Figura 1.3: Desenho esquemático das condições de percurso do robô

1.2

Objetivo

Com base nisso, o presente trabalho visa simular diferentes tipos de geometria para promover redução de arrasto no caminho de descida ao poço e aumento no caminho de subida à superfície, e projetar, com base em simulações, um sistema de geometria variável para possibilitar isso. O sistema é projetado para ser instalado na extremidade do robô que fica apontada sempre em direção ao poço. A geometria varia durante o percurso do robô para diminuir o consumo de energia de seu sistema de locomoção. Um protótipo do sistema de geometria variável pode ser visualizado nas Figuras 1.4(a) e 1.4(b).



1.4(a): Sistema colapsado

1.4(b): Sistema expandido

Figura 1.4: Vistas isométricas do protótipo do sistema de geometria variável

Um dispositivo para recuperação do robô em caso de pane no poço deverá ser instalado na extremidade do robô que fica apontada para a superfície, para que se possa resgatá-lo com uma ferramenta que se conecta ao dispositivo, o que impede a instalação de uma segunda geometria para redução adicional da força de arrasto no robô.

Nas simulações, é considerado que o robô possui um diâmetro de 54 mm e comprimento de 3 metros. Além disso, é assumido que ele mantém velocidade constante e que não há deslizamento relativo entre suas rodas e a superfície interna da tubulação. A Tabela 1.1 contém os principais dados de condições de operação do veículo robótico.

Tabela 1.1: Condições de operação do veículo robótico

| CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DO SISTEMA ROBOTIZADO | | |
|---|---------------------|---------|
| Profundidade Mínima | m | 2,000 |
| Profundidade Máxima | m | 4,000 |
| Temperatura Mínima | °C | 80 |
| Temperatura Máxima | °C | 150 |
| Viscosidade Mínima (gás) | Pa.s | 0.00001 |
| Viscosidade Máxima (óleo) | Pa.s | 0.01 |
| Densidade Mínima (gás) | kg/m ³ | 1 |
| Densidade Máxima (óleo) | kg/m ³ | 800 |
| Pressão Mínima | kgf/cm ² | 35 |
| Pressão Máxima | kgf/cm ² | 415 |
| Vazão Mínima (óleo) | m ³ /d | 10 |
| Vazão Máxima (óleo) | m ³ /d | 1,000 |
| Vazão Mínima (gás) | m ³ /d | 42 |
| Vazão Máxima (gás) | m ³ /d | 832 |
| ID Tubing Mínimo | in | 3 |
| ID Tubing Máximo | in | 4 |
| Veloc. Máxima de Fluxo (óleo) | m/s | 7.01 |
| Veloc. Máxima de Fluxo (gás) | m/s | 33.00 |
| Veloc. Média Deslocamento Robô | m/min | 20 |
| Tempo de Operação Mínima | min | 300 |
| Tempo de Operação Máxima | min | 600 |
| Rugosidade | m | 0.0001 |

1.3

Revisão Bibliográfica

J Dul [2] estudou o movimento de cápsulas cilíndricas longas no interior de tubulações com escoamento totalmente turbulento e em regime de alto número de Reynolds, e conduziu um experimento para avaliar parâmetros como a queda de pressão na superfície da cápsula durante seu movimento em regime permanente. Os dados obtidos experimentalmente foram tabelados para diferentes razões entre o diâmetro interno da tubulação e o diâmetro da cápsula, e podem ser vistos nas Tabelas 1.2 e 1.3.

Van den Kroonenberg [3] estendeu os estudos de J Dul para a elaboração de um modelo matemático que pudesse avaliar a queda de pressão ao longo de cápsulas longas concêntricas à tubulação, na região anular do escoamento.

Com o modelo desenvolvido por ele, foram considerados os dados utilizados nos experimentos de J Dul para calcular a queda de pressão ao longo da cápsula e comparar os resultados obtidos com os empíricos, a fim de validar seu modelo matemático. Os resultados obtidos por Van den Kroonenberg mostraram proximidade com aqueles registrados por J Dul, como pode ser visto na Tabela 1.3.

Tabela 1.2: Dados experimentais obtidos por J Dul [2]

| Capsule length: $l = 2,64$ m | | | | | | Pipe diameter: $D = 0,07$ m | | | | | | |
|------------------------------|-------|-------|-----------|-------|---------------|-----------------------------|------------------|-------------------------|----------|------|-------------------------------------|--------|
| k | v_b | v_c | v_c/v_b | v_a | $(v_c - v_a)$ | $\Delta p_a/l$ | $\Delta p_c/l$ | $\Delta p_c/\Delta p_a$ | $D(1-k)$ | T | ν | d |
| 0,9 | 0,86 | 0,95 | 1,108 | 0,46 | 0,49 | 106 | 79 | 0,74 | 0,007 | 23,5 | $0,92 \times 10^{-6}$ | 0,063 |
| 0,9 | 1,11 | 1,23 | 1,109 | 0,60 | 0,63 | 167 | 116 | 0,69 | " | " | " | " |
| 0,9 | 1,36 | 1,50 | 1,108 | 0,73 | 0,77 | 239 | 161 | 0,67 | " | " | " | " |
| 0,9 | 1,60 | 1,77 | 1,100 | 0,91 | 0,86 | 316 | 208 | 0,66 | " | " | " | " |
| 0,9 | 1,81 | 1,99 | 1,099 | 1,04 | 0,95 | 389 | 241 | 0,62 | " | " | " | " |
| 0,85 | 0,78 | 0,89 | 1,143 | 0,49 | 0,40 | 89 | 60 | 0,68 | 0,0105 | 20,8 | $0,98 \times 10^{-6}$ | 0,0595 |
| 0,85 | 1,13 | 1,30 | 1,144 | 0,71 | 0,59 | 171 | 113 | 0,66 | " | " | " | " |
| 0,85 | 1,55 | 1,79 | 1,151 | 0,94 | 0,85 | 298 | 189 | 0,63 | " | " | " | " |
| 0,85 | 1,90 | 2,17 | 1,147 | 1,17 | 1,00 | 431 | 280 | 0,65 | " | " | " | " |
| 0,85 | 2,31 | 2,65 | 1,144 | 1,45 | 1,20 | 608 | 397 | 0,65 | " | " | " | " |
| 0,8 | 0,72 | 0,85 | 1,185 | 0,48 | 0,37 | 79 | 59 | 0,74 | 0,014 | 18,5 | $1,03 \times 10^{-6}$ | 0,056 |
| 0,8 | 1,16 | 1,38 | 1,187 | 0,78 | 0,60 | 186 | 127 | 0,68 | " | " | " | " |
| 0,8 | 1,52 | 1,81 | 1,184 | 1,02 | 0,79 | 297 | 202 | 0,68 | " | " | " | " |
| 0,8 | 1,85 | 2,18 | 1,183 | 1,24 | 0,94 | 415 | 287 | 0,69 | " | " | " | " |
| 0,8 | 2,11 | 2,50 | 1,183 | 1,42 | 1,08 | 528 | 359 | 0,68 | " | " | " | " |
| — | m/sec | m/sec | — | m/sec | m/sec | N/m ³ | N/m ³ | — | m | °C | m ² .sec ⁻¹ . | m |

Tabela 1.3: Dados obtidos pelo modelo matemático de Van den Kroonenberg [3]

| Capsule length: $l = 2,64$ m | | | | | | Pipe diameter: $D = 0,07$ m | | | | | | |
|------------------------------|-------|--------|--------|--------|------------------------|-----------------------------|------------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| k | v_b | Re_n | Re_p | Re_c | λ_n "Moody" | λ_p "Moody" | λ_c "Moody" | $w = \lambda_p/\lambda_c$ | v_c/v_b measur. | v_c/v_b calcul. | $\Delta p_c/\Delta p_n$ measur. | $\Delta p_c/\Delta p_n$ calcul. |
| 0,9 | 0,86 | 64852 | 3500 | 3728 | 0,0197 | 0,0420 | 0,0410 | 1,024 | 1,108 | 1,102 | 0,74 | 0,68 |
| 0,9 | 1,11 | 84138 | 4565 | 4793 | 0,0184 | 0,0380 | 0,0378 | 1,005 | 1,109 | 1,103 | 0,69 | 0,66 |
| 0,9 | 1,36 | 102685 | 5554 | 5859 | 0,0179 | 0,0361 | 0,0359 | 1,006 | 1,108 | 1,103 | 0,67 | 0,64 |
| 0,9 | 1,60 | 121545 | 6924 | 6543 | 0,0173 | 0,0340 | 0,0350 | 0,97 | 1,100 | 1,100 | 0,66 | 0,66 |
| 0,9 | 1,81 | 137244 | 7913 | 7228 | 0,0166 | 0,0325 | 0,0335 | 0,97 | 1,099 | 1,102 | 0,62 | 0,64 |
| 0,85 | 0,78 | 55714 | 5250 | 4286 | 0,0205 | 0,0370 | 0,0400 | 0,925 | 1,143 | 1,150 | 0,68 | 0,67 |
| 0,85 | 1,13 | 80714 | 7607 | 6321 | 0,0188 | 0,0330 | 0,0350 | 0,943 | 1,144 | 1,150 | 0,66 | 0,65 |
| 0,85 | 1,55 | 110714 | 10071 | 9107 | 0,0175 | 0,0300 | 0,0318 | 0,943 | 1,151 | 1,150 | 0,63 | 0,63 |
| 0,85 | 1,90 | 135714 | 12536 | 10714 | 0,0167 | 0,0290 | 0,0305 | 0,951 | 1,147 | 1,152 | 0,65 | 0,64 |
| 0,85 | 2,31 | 165000 | 15536 | 12875 | 0,0160 | 0,0273 | 0,0291 | 0,938 | 1,144 | 1,152 | 0,65 | 0,63 |
| 0,8 | 0,72 | 48906 | 6524 | 5029 | 0,0210 | 0,0350 | 0,0370 | 0,946 | 1,185 | 1,200 | 0,74 | 0,69 |
| 0,8 | 1,16 | 79582 | 10602 | 8155 | 0,0192 | 0,0315 | 0,0237 | 0,963 | 1,187 | 1,202 | 0,68 | 0,68 |
| 0,8 | 1,52 | 104224 | 13864 | 10738 | 0,0180 | 0,0283 | 0,0310 | 0,931 | 1,184 | 1,200 | 0,68 | 0,66 |
| 0,8 | 1,85 | 126203 | 16854 | 12777 | 0,0170 | 0,0268 | 0,0291 | 0,921 | 1,183 | 1,199 | 0,69 | 0,66 |
| 0,8 | 2,11 | 144503 | 19301 | 14680 | 0,0166 | 0,0262 | 0,0275 | 0,920 | 1,183 | 1,200 | 0,68 | 0,66 |
| — | m/sec | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

Mohamed F. Khalil *et al* [4] estenderam os estudos na área de escoamento sobre cápsulas utilizando modelos de turbulência já consolidados, como k- ϵ , k- ω

e *Boldwin-Lomax*, e compararam os resultados obtidos com aqueles registrados por J Dul e Van den Kroonenberg.

Os estudos conduzidos por J Dul, van den Kroonenberg e Mohamed F. Khalil *et al* foram realizados para cápsulas longas, para que a queda de pressão ao longo de seu comprimento pudesse ser avaliada negligenciando os efeitos de entrada e saída da região anular. Suas contribuições serviram como base para validar as simulações realizadas neste trabalho, que apresentam dinâmica similar, com comprimento do robô próximo ao da cápsula, também representado nas simulações como um cilindro concêntrico à tubulação.

1.4

Metodologia

No presente trabalho, através de ferramentas de fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics* ou CFD), são estimadas as forças de arrasto sobre diferentes tipos de geometrias escolhidas arbitrariamente, tanto no caminho de descida do robô ao poço como no de subida à superfície.

Para isso, o software comercial *Fluent* é utilizado para simular os efeitos fluidodinâmicos nas geometrias escolhidas. Além disso, a ferramenta CAD *Solidworks* é utilizada para modelar e dimensionar o protótipo do sistema de geometria variável.

Primeiramente, é validado o modelo de turbulência escolhido para a dinâmica do problema, através da comparação dos resultados das simulações de validação com os dados medidos de queda de pressão e fator de atrito, contidos nas Tabelas 1.2 e 1.3.

Com o modelo de turbulência validado, são conduzidas as simulações referentes ao sistema robotizado, com geometrias diferentes para redução ou aumento do arrasto do interior da tubulação, dependendo da rota do robô.

Com a realização das simulações e do processo de modelagem e dimensionamento de componentes, espera-se chegar a resultados que comprovem a eficiência do sistema projetado e justifiquem seu emprego no veículo robótico, levando em consideração a redução de seu consumo de energia na locomoção.

1.5

Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em 6 Capítulos. No Capítulo 2 são apresentados os fundamentos teóricos necessários para entendimento dos conceitos e procedimentos considerados nas simulações. No Capítulo 3 é apresentada uma introdução ao *software* CFD utilizado e é demonstrado o procedimento de validação adotado. Este Capítulo também apresenta a descrição das simu-

lações realizadas para o sistema de geometria variável. O Capítulo 4 apresenta os procedimentos de modelagem, montagem e dimensionamento do sistema de geometria variável. No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos para as simulações e as discussões sobre as geometrias adotadas. Finalmente, o Capítulo 6 discute as conclusões do projeto e as sugestões para trabalhos futuros.

2

Fundamentos Teóricos

Neste Capítulo são apresentados os fundamentos de fluidodinâmica necessários ao entendimento das simulações realizadas neste trabalho.

2.1

O Modelo k- ϵ Padrão

O modelo de turbulência k- ϵ padrão é um modelo semi-empírico baseado na modelagem de duas equações de transporte para a energia cinética turbulenta (k) e sua taxa de dissipação (ϵ). Enquanto o modelo da equação de transporte para k é derivado de uma equação exata, o modelo da equação de transporte para ϵ é modificado com base em raciocínios físicos e apresenta pouca semelhança com sua contraparte matematicamente exata [5].

Na derivação do modelo k- ϵ , é assumido que o escoamento é totalmente turbulento, e os efeitos de viscosidade molecular são negligenciáveis.

A energia cinética turbulenta, k, e sua taxa de dissipação, ϵ , são obtidas segundo as seguintes equações de transporte:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (2-1)$$

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

onde:

- G_k representa a geração de energia cinética turbulenta devido a gradientes de velocidade;
- G_b é a geração de energia cinética turbulenta devido à flutuabilidade;
- Y_M representa a flutuação na dilatação volumétrica para escoamentos turbulentos compressíveis;
- $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$ e $C_{3\epsilon}$ são constantes;
- σ_k e σ_ϵ são os números de Prandtl turbulentos para k e ϵ , respectivamente;
- S_k e S_ϵ são termos definidos pelo usuário.

A viscosidade turbulenta, μ_t , é computada combinando k e ϵ , como pode ser visto abaixo:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2-3)$$

onde C_μ é uma constante.

As constantes de modelo $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, C_μ , σ_k e σ_ϵ têm os seguintes valores padronizados no *Fluent*:

$$C_{1\epsilon} = 1,44 \quad C_{2\epsilon} = 1,92 \quad C_\mu = 0,09 \quad \sigma_k = 1,0 \quad \sigma_\epsilon = 1,3 \quad (2-4)$$

Sua implementação no *Fluent* é feita através da seleção dos coeficientes apresentados acima no painel de modelos viscosos, representado na Figura 2.1.

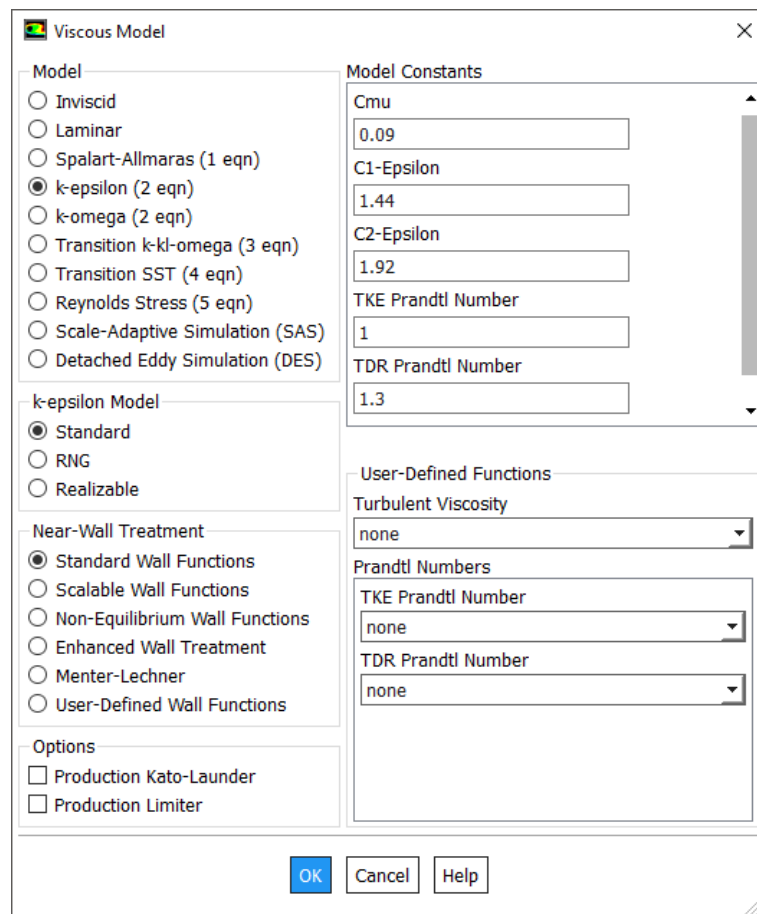


Figura 2.1: Painel de modelo de turbulência $k - \epsilon$ do *Fluent*

2.2

Lei de Parede Padrão

Leis de parede são um conjunto de fórmulas e funções semi-empíricas que estimam a região afetada pelos efeitos de viscosidade entre a parede e a região de escoamento totalmente turbulento. É uma aproximação recomendada para

regimes de alto número de Reynolds, onde os efeitos viscosos não se estendem muito das paredes [5].

Muitos experimentos mostraram que a região próxima à parede em escoamentos turbulentos pode ser dividida em 3 camadas, representadas na Figura 2.2. Na camada mais próxima da parede, chamada de subcamada laminar (*viscous sublayer*), o escoamento é praticamente laminar e dominam os efeitos de viscosidade molecular. A camada mais afastada da parede é chamada de núcleo turbulento (*outer layer*), onde a turbulência domina. A camada intermediária é a camada amortecedora onde tanto a turbulência como os efeitos viscosos são igualmente importantes.

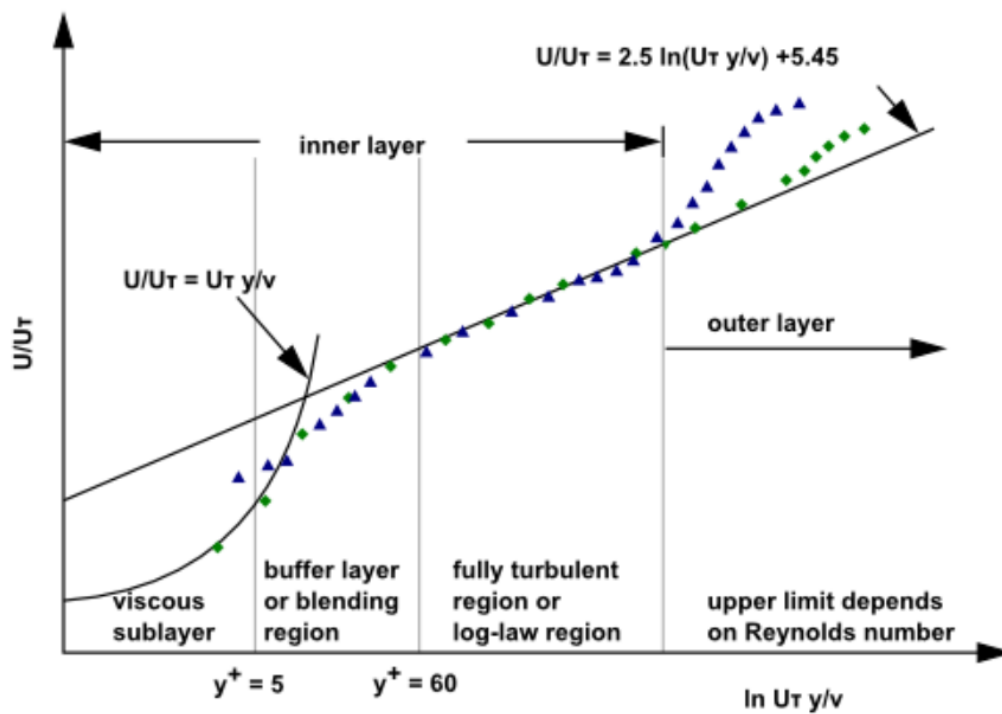


Figura 2.2: Gráfico das camadas em escoamentos turbulentos [1]

As leis de parede servem para relacionar as primeiras duas camadas com a camada totalmente turbulenta e a parede, como é mostrado na Figura 2.3. Elas não resolvem a subcamada viscosa, mas apresentam resultados satisfatórios para regimes de alto número de Reynolds.

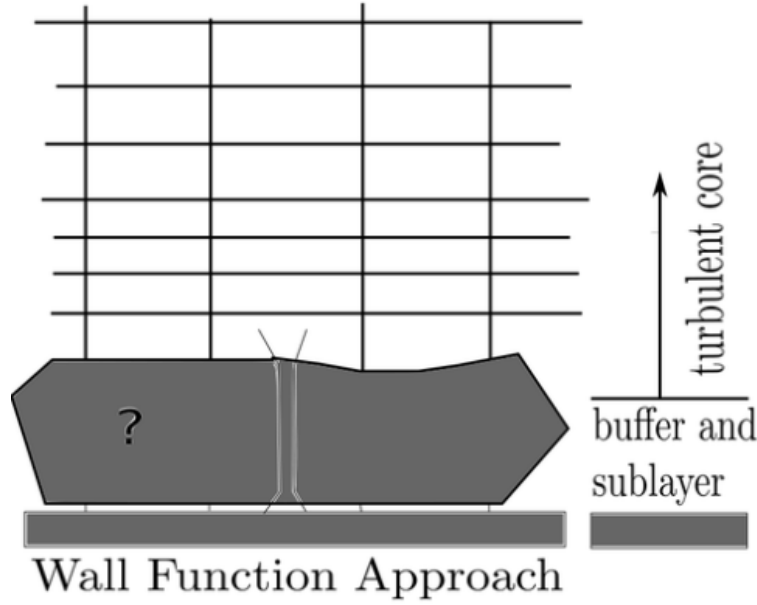


Figura 2.3: Representação do conceito das leis de parede

A lei de parede padrão utilizada no *Fluent* para o modelo $k-\epsilon$ é baseada na proposta de Launder e Spalding [5], onde para o cálculo do momento, é aplicada a lei de parede padrão para a velocidade média:

$$U^* = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^*) \quad (2-5)$$

onde

$$U^* = \frac{U_P C_\mu^{1/4} k_P^{1/2}}{\tau_\omega / \rho} \quad (2-6)$$

$$y^* = \frac{\rho C_\mu^{1/4} k_P^{1/2} y_P}{\mu} \quad (2-7)$$

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau y_P}{\mu} \quad (2-8)$$

e

- κ é a constante de von Kármán;
- E é a constante empírica;
- U_P é a velocidade média do fluido no ponto P;
- k_P é a energia cinética turbulenta no ponto P;
- y_P é a distância do ponto P à parede;
- μ é a viscosidade dinâmica do fluido.

A lei logarítmica para velocidade média é aplicada no *Fluent* quando $y^+ > 11,225$. Note que y^+ e y^* têm valores próximos quando o primeiro elemento é posicionado na região de lei logarítmica, mas são diferentes por $C_\mu^{1/4} \approx 0,5$. Portanto, para a adequação do uso da lei de parede padrão, os valores de y^+ devem ser monitorados para as simulações e não devem exceder 300, limite de y^+ até onde a lei logarítmica ainda é válida.

Quando a malha apresenta valores de y^* inferiores a 11,225, o *Fluent* aplica a relação de tensão-deformação laminar, onde $U^* = y^*$.

2.3

Força de Arrasto

A força de arrasto em corpos onde um fluido escoar sobre sua superfície é composta por duas componentes, uma relacionada à viscosidade, chamada de arrasto viscoso, e outra relacionada à diferença de pressão, chamada de arrasto de forma.

O arrasto viscoso depende da tensão cisalhante na superfície do sólido e pode ser descrito pela integração da tensão (τ_s) na área (A_s):

$$F_\mu = \int_{A_s} \tau_s(x) dA_s \quad (2-9)$$

A tensão cisalhante na superfície do sólido pode ser descrita a partir do coeficiente de atrito local:

$$\tau_s(x) = \frac{C_f(x) \rho U_\infty^2}{2} \quad (2-10)$$

Logo, a componente de arrasto viscoso pode ser definida através do coeficiente de atrito ao longo da superfície:

$$F_\mu = \frac{\rho U_\infty^2}{2} \int_{A_s} C_f(x) dA_s \quad (2-11)$$

O arrasto de forma é a outra componente da força de arrasto total e depende diretamente da distribuição de pressões ao longo da superfície do corpo, e pode ser descrito pela fórmula a seguir:

$$F_P = \int_S -p(x) dA \quad (2-12)$$

Dessa forma, pode-se descrever que:

$$F = \int_S d\vec{F} = \int_S d\vec{F}_\mu + \int_S \vec{F}_P = \int_S \tau_s \vec{t} dA - \int_S p d\vec{n} dA \quad (2-13)$$

Portanto, é possível realizar a validação do modelo de turbulência para o cálculo do arrasto no sistema de geometria variável. Para isso, os valores de queda de pressão ao longo da cápsula obtidos nas simulações são comparados com os dados medidos por J Dul, disponíveis na Tabela 1.2.

2.4

Comprimento de Entrada

Para que os resultados das simulações sejam compatíveis com o modelo a ser reproduzido, onde é considerado que o robô se locomove no interior de uma longa tubulação com escoamento totalmente turbulento e desenvolvido, é necessário que o escoamento chegue no robô já desenvolvido. Por isso, deve-se considerar nas simulações um comprimento de tubulação entre a entrada e o início do robô para que o escoamento chegue até ele totalmente desenvolvido, sem que seja utilizado um comprimento muito grande para não prejudicar a eficiência computacional da malha.

De acordo com [6], para escoamentos totalmente turbulentos, o comprimento de entrada segue a fórmula:

$$L_{h,turbulento} = 4,4DRe^{1/6} \quad (2-14)$$

onde

$$Re = \frac{\rho u_m D_h}{\mu} \quad (2-15)$$

e $D_h = D$ para escoamentos com seção reta circular [7].

A mesma referência ainda aponta que, na maioria das práticas de aplicação em engenharia, esse efeito de entrada fica insignificante a partir de um comprimento de tubulação de 10 diâmetros.

Logo, para simplificação das malhas por conta da variação de diâmetros e faixas de Reynolds, é considerado que:

$$L_{h,turbulento} \approx 10D \quad (2-16)$$

Além disso, em escoamentos hidrodinamicamente desenvolvidos o fator de atrito está relacionado à tensão cisalhante [7] de forma que:

$$f = \frac{4\tau_s}{\frac{1}{2}\rho u_m^2} \quad (2-17)$$

Dessa forma, através das simulações de validação, é possível ainda comparar o fator de atrito calculado por meio da tensão cisalhante na parede da tubulação com o obtido pelo diagrama de Moody na Tabela 1.3.

2.5

Perfis Geométricos Adotados

As geometrias utilizadas nas simulações são sólidos de revolução, baseados na rotação de uma geratriz em relação ao eixo da tubulação, possibilitando a simulação no *Fluent* com a opção de escoamento axissimétrico selecionada. Os perfis geométricos escolhidos são baseados nos perfis de cones de nariz comumente utilizados para escoamentos externos incompressíveis a altas faixas de Reynolds, e são avaliados em sua eficiência para escoamentos internos neste trabalho.

Estes perfis também estão comumente associados a uma razão entre seu comprimento e o diâmetro da base, chamada de *fineness ratio*:

$$Fineness = \frac{L}{D} \quad (2-18)$$

Valores mais altos de *fineness ratio* aumentam a área molhada e portanto aumentam a componente de arrasto relacionada ao atrito viscoso. Logo, a escolha dessa razão deve ser feita a partir de uma otimização entre diminuição da componente de pressão e aumento da componente viscosa do arrasto total.

Para o caminho de ida, o sistema irá colapsado e são considerados três tipos de perfis mais comuns, baseados em [8].

É dada prioridade à escolha de uma geometria com ponta achatada, outra sem, e uma geometria com perfil linear, para analisar as forças de arrasto produzidas por cada uma delas nas simulações referentes ao sistema de geometria variável.

2.5.1

Perfil Cônico

A Figura 2.4 mostra a geometria do perfil cônico. Esse perfil é mais comumente utilizado por sua facilidade de fabricação, e sua geratriz é definida pela equação a seguir:

$$y = \frac{xR}{L} \quad (2-19)$$

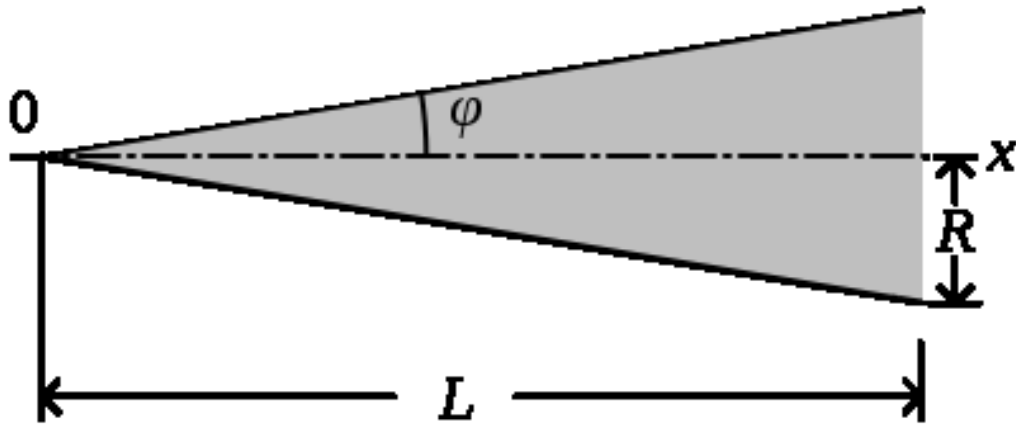


Figura 2.4: Representação do perfil cônico

2.5.2

Perfil Parabólico

Este perfil de cone de nariz é gerado pela rotação de um segmento de parábola em torno de uma linha paralela ao seu eixo de simetria, e pode ter diferentes formas de acordo com o valor de K' :

$$y = R \left(\frac{2\left(\frac{x}{L}\right) - K' \left(\frac{x}{L}\right)^2}{2 - H'} \right) \quad (2-20)$$

K' pode variar de 0 a 1, mas os valores mais utilizados são:

- $K' = 0$ para um cone;
- $K' = 0,5$ para 1/2 de parábola;
- $K' = 0,75$ para 3/4 de parábola;
- $K' = 1$ para uma parábola completa.

O valor de $K' = 1$ é utilizado neste trabalho para gerar uma parábola completa, mostrada na Figura 2.5.

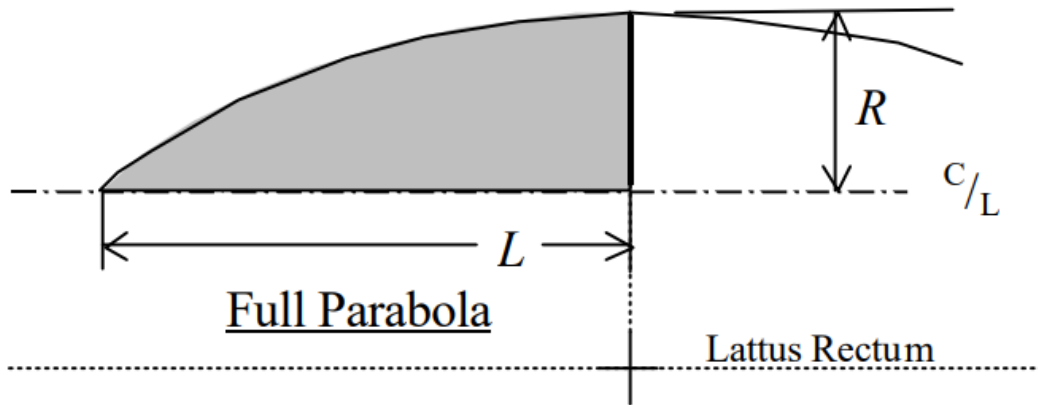


Figura 2.5: Representação do perfil parabólico

2.5.3 Perfil Elíptico

Este perfil é representado por metade de uma elipse, com seu eixo menor sendo a base do cone de nariz e seu eixo maior sendo a linha de centro sobre a qual a geratriz deve ser rotacionada para originar o sólido. Sua geometria pode ser visualizada na Figura 2.6.

Esse perfil é escolhido por apresentar ponta achatada e geratriz tangente ao robô na base do cone. A equação de sua geratriz é definida por:

$$y = R\sqrt{1 - \frac{x^2}{L^2}} \quad (2-21)$$

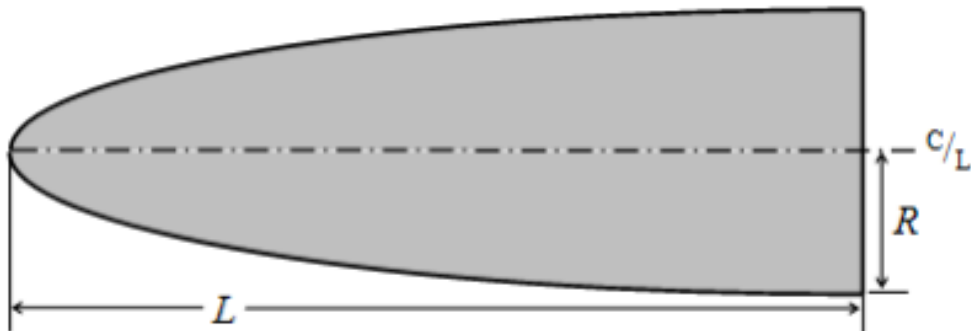


Figura 2.6: Representação do perfil elíptico

Para este trabalho, por motivos de disposição de componentes no interior do sistema de geometria variável, é escolhido um valor de *fineness ratio* igual a 2.

De acordo com a Figura 2.7, por oferecer maior espaço interno, o perfil elíptico é analisado para verificar se apresenta redução de arrasto semelhante ao das outras alternativas, para justificar sua escolha por apresentar maior volume.

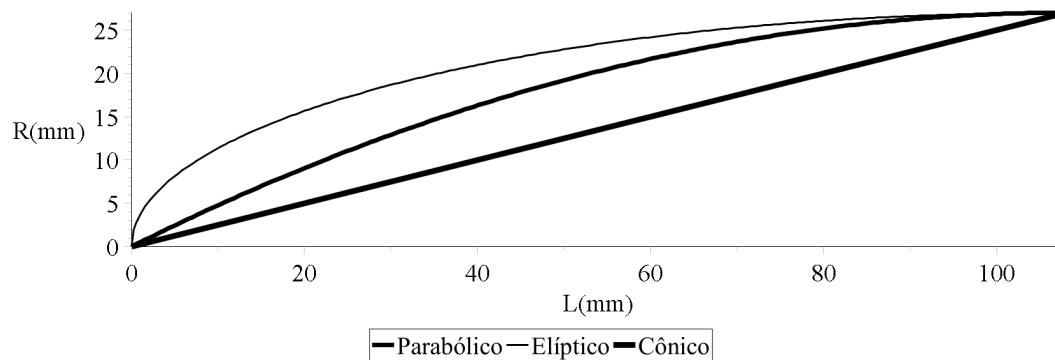


Figura 2.7: Gráfico comparativo com os perfis considerados no trabalho

3

Procedimentos de Simulação

Neste Capítulo são discutidos os procedimentos de validação das simulações, realizadas através do *software Fluent*, incluso no *software* comercial *ANSYS Workbench*. O processo de validação é descrito para as duas partes do problema proposto, composto primeiramente de validação para simulações bidimensionais axissimétricas, para o caso de geometria colapsada, e depois para simulações tridimensionais, para o caso de geometria expandida, que não possui axissimetria.

3.1

Ansyes Workbench

O *Ansyes Workbench* é um software de simulação integrado que dispõe de ferramentas necessárias para a condução de uma simulação completa, podendo fornecer ferramentas CAD para criação de geometria, *softwares* de criação de malha, de simulação e de pós processamento de resultados. Num mesmo projeto é possível inclusive realizar várias simulações dependentes ou não entre si.

O módulo de análise de escoamento de fluidos com o solver do *Fluent* (*Fluid Flow*) é utilizado para as simulações referentes à validação e ao sistema robotizado, e pode ser visto na Figura 3.1.

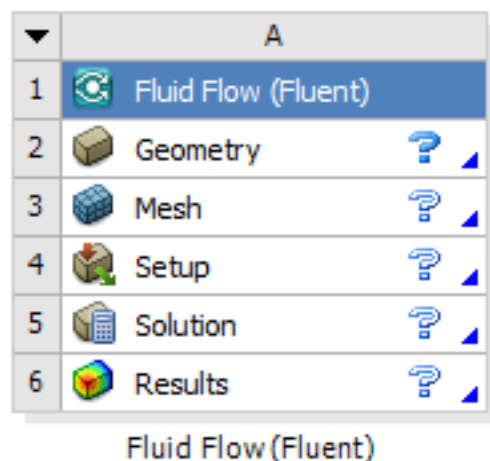


Figura 3.1: Módulo do *Workbench* utilizado nas simulações

Ele contém ferramentas no estilo passo a passo para serem atualizadas sequencialmente até a obtenção dos resultados:

- *Geometry*: Oferece duas ferramentas CAD (*SpaceClaim* e *DesignModeler*) para criação da geometria a ser exportada para o programa de criação de malha;
- *Mesh*: Dispõe da ferramenta *Meshing* para criação de malha para a simulação a ser conduzida;
- *Setup*: Utiliza o software *Fluent* para ler a malha criada ou importada no passo anterior e determinar parâmetros como modelos de turbulência, materiais, condições de contorno, métodos de solução e inicialização;
- *Solution*: Associado ao *Fluent* de forma a tratar apenas dos procedimentos relacionados à solução;
- *Results*: Oferece a ferramenta de pós processamento *CFD Post* para interpretação dos resultados através de gráficos, funções, entre outros.

3.2

Validação do Modelo de Turbulência

Para a validação do modelo de turbulência $k-\epsilon$ adotado neste trabalho, é preciso reproduzir no software de simulação o experimento realizado por J Dul. Dessa forma, é possível extrair os dados de queda de pressão e fator de atrito e compará-los com os dados experimentais da Tabela 1.2. Assim, é possível validar o modelo de turbulência de forma a apresentar valores de força de arrasto confiáveis nas simulações referentes ao sistema de geometria variável.

Logo, é escolhida para a simulação de validação uma razão de diâmetros de 0,9 para uma tubulação de 70 mm de diâmetro, segundo os parâmetros do experimento de J Dul descritos na Tabela 1.2. Dessa forma, o diâmetro da cápsula utilizado é de 63 mm.

Segundo a equação (2-16) calcula-se que o comprimento de entrada da tubulação é igual a 0,7 metros. Logo, para a modelagem da geometria a ser utilizada no *Fluent*, é considerada uma tubulação de 5 metros de comprimento. Como a cápsula tem 2,64 metros de comprimento, 1,18 metros ficam reservados para o escoamento chegar completamente desenvolvido na cápsula. Os outros 1,18 metros ficam reservados para o escoamento na saída da tubulação ser totalmente desenvolvido, por causa da utilização do tipo de condição contorno de *outflow*, que é discutido na seção a seguir.

3.2.1

Validação Bidimensional

Como a cápsula cilíndrica e a tubulação utilizadas por J Dul são sólidos de revolução, é possível realizar uma simulação bidimensional axissimétrica no *Fluent*, com a utilização de uma superfície plana como geometria, reduzindo o peso computacional da simulação. Dessa forma, essa geometria pode ser modelada no *software Solidworks* como um perfil axissimétrico, para ser exportada para a etapa *Geometry* do *Ansys Workbench*. A Figura 3.2 mostra a geometria a ser importada para o *software* de criação de malha, *Ansys Meshing*.

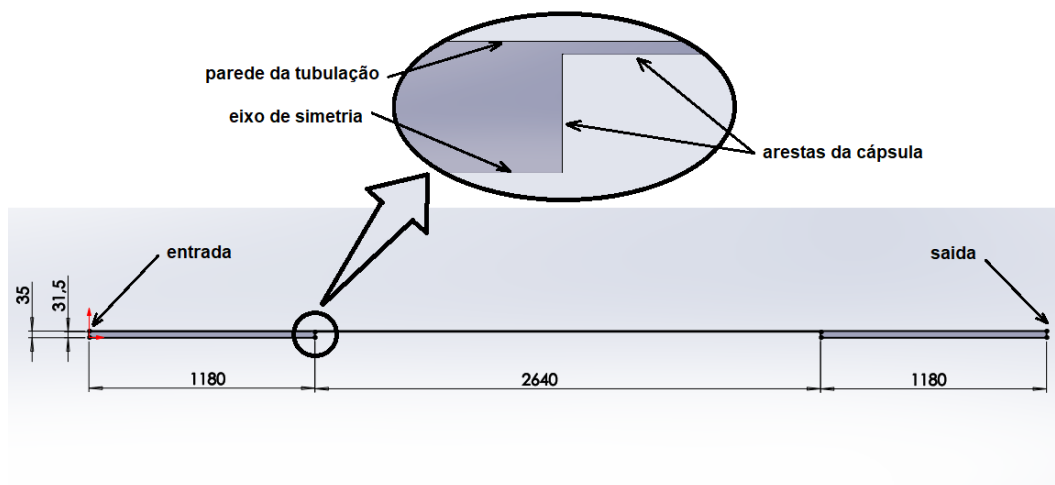


Figura 3.2: Geometria 2D utilizada para o processo de validação

As malhas utilizadas nas simulações bidimensionais do procedimento de validação são compostas de elementos quadriláteros e é estruturada, favorecendo o alinhamento dos elementos com o escoamento. Uma malha estruturada de quadriláteros apresenta menor número de elementos para uma mesma área a ser preenchida com triângulos de mesmo tamanho de aresta, diminuindo o peso computacional da simulação. Além disso, o alinhamento dos elementos com a direção do escoamento também minimiza efeitos de difusão numérica, que induz a erros nos resultados [5]. Para escoamentos complexos, o alinhamento dos elementos com a direção do escoamento não minimiza a difusão numérica da mesma forma, porém continua mantendo menor número de elementos quando comparado com uma malha composta de elementos triangulares.

No entanto, para que a condição de lei de parede padrão seja empregada corretamente no *Fluent*, a distância adimensional y^+ deve ser maior que 11,225. Por isso, o número máximo de nós na região anular do escoamento não deve

exceder nove [9]. Uma ampliação da malha no local de transição para a região anular pode ser vista na Figura 3.3.

Com a ferramenta *Meshing* do *Ansys Workbench* é possível nomear as regiões de interesse na malha para as condições de contorno, possibilitando a criação do eixo de simetria, das regiões de entrada e saída de fluido e das paredes da tubulação e da cápsula.

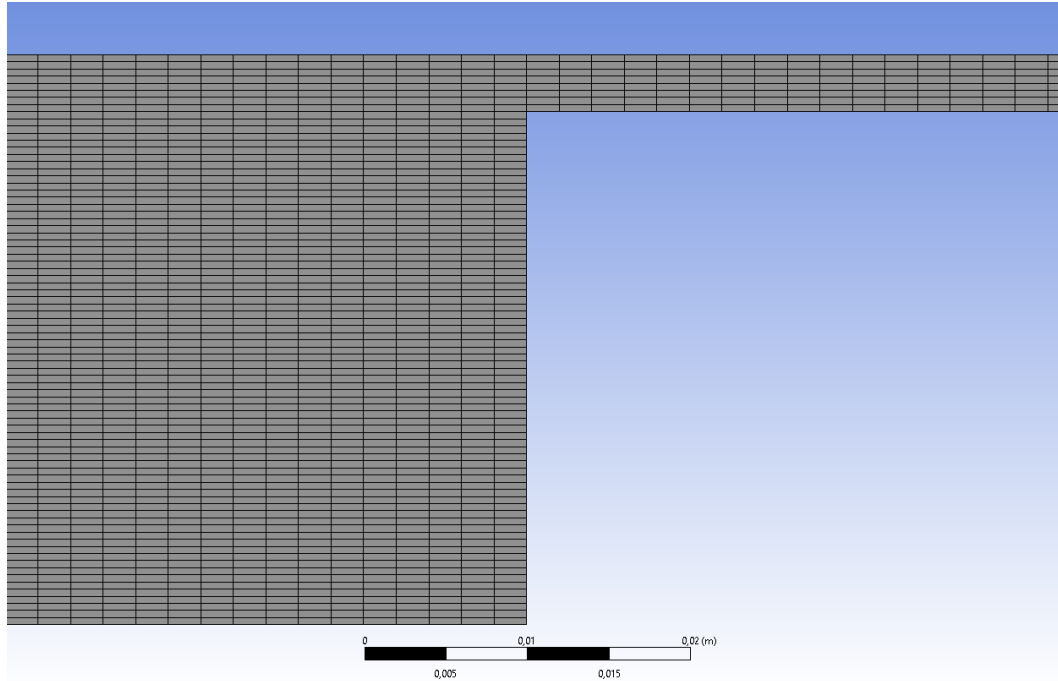


Figura 3.3: Ampliação da malha utilizada no processo de validação

Finalmente, ao importar a malha para o *Fluent*, é selecionado o modelo de escoamento axissimétrico e no painel de modelo de viscosidade é escolhido o modelo de turbulência $k-\epsilon$ padrão com opção de lei de parede padrão, como demonstrado no Capítulo anterior (Figura 2.1).

Na aba de materiais do *Fluent*, presente na Figura 3.4, são introduzidas as propriedades da água essenciais à simulação, como densidade e viscosidade dinâmica. (A Tabela 1.2 apresenta a viscosidade cinemática da água utilizada no experimento de J Dul). O *Ansys Fluent* já possui uma biblioteca com materiais disponíveis, e como é preciso introduzir as propriedades de densidade e viscosidade dinâmica, água é selecionada dentre as opções disponíveis e os valores de densidade e viscosidade dinâmica são alterados de acordo com os dados da Tabela 1.2. Como a viscosidade cinemática ν é obtida pela razão entre viscosidade dinâmica e densidade, é possível, a partir do valor da densidade da

água a 23,5 °C, calcular o valor da viscosidade dinâmica para ser implementada na aba de materiais do *Fluent*.

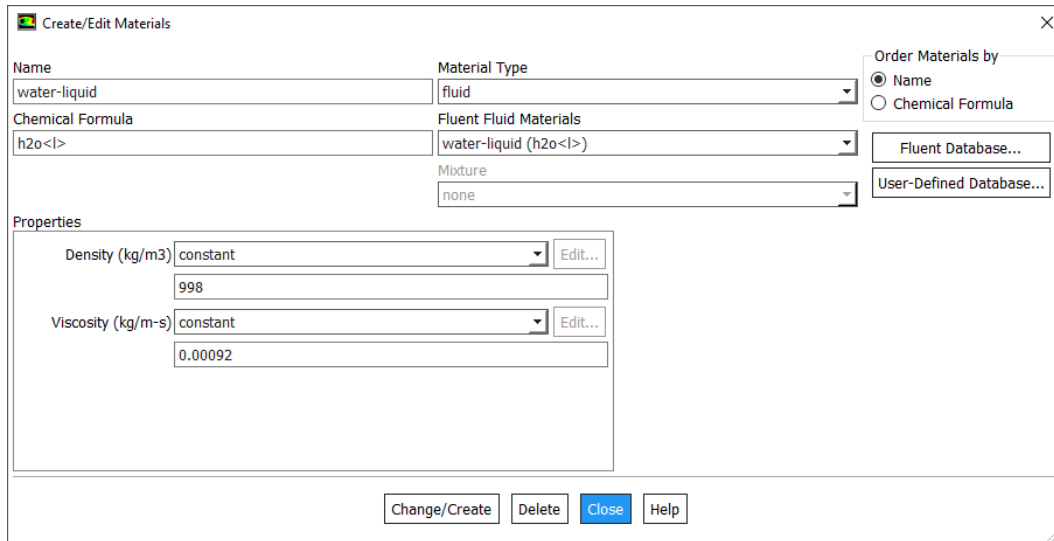


Figura 3.4: Janela de materiais do *Fluent*

Para reproduzir o experimento para razão de diâmetros de 0,9, primeiramente é atribuída à região de escoamento (*cell zone*) uma velocidade de translação de 1,99 m/s. Isso é feito para definir posteriormente as paredes da cápsula como estáticas em relação a essa região, para representar a movimentação da cápsula no interior da tubulação. Para isso, é atribuída à *cell zone* uma condição de *frame motion* e introduzida a velocidade de translação desejada. A implementação pode ser vista na Figura 3.5.

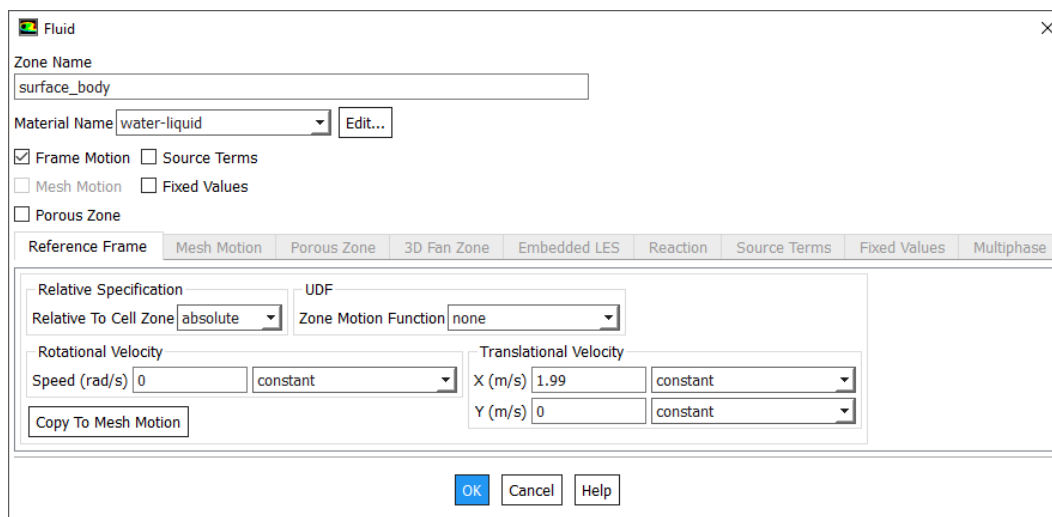


Figura 3.5: Janela de *cell zone* do *Fluent*

Com relação às condições de contorno adotadas, é dado à região de entrada a condição de *velocity inlet*, associando uma velocidade de entrada de 1,81 m/s, como apresentado na Tabela 1.2. Em opções de turbulência, escolhe-se intensidade de turbulência e diâmetro hidráulico, onde é utilizado o próprio diâmetro interno da tubulação. Para escoamentos em faixas de Reynolds elevadas, é recomendado utilizar 5% para a intensidade de turbulência na entrada [5]. A condição de contorno da parede da tubulação é definida como estática em relação ao eixo de coordenadas global. Isso é necessário para que a tubulação fique estática, enquanto a cápsula translada em seu interior. Para a condição de contorno de saída, é utilizada a opção de *outflow*, que se baseia na extrapolação de informações do interior para estimar as condições de saída [5]. Esse tipo de condição de contorno é recomendado para simulações em que há continuação da tubulação após a saída, e com escoamento desenvolvido.

Para os métodos de solução, são adotados os parâmetros padrão do *Fluent*, que oferecem combinação de rapidez e facilidade de convergência [10]. A Figura 3.6 mostra as seleções padronizadas.

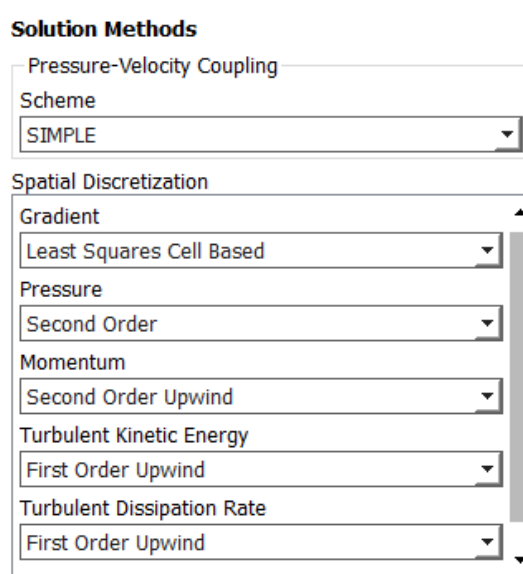


Figura 3.6: Janela de métodos de solução do *Fluent*

Finalmente, na aba de inicialização, é escolhido o método de inicialização padrão, optando pela condição de contorno da entrada da tubulação como parâmetro inicial para a simulação.

3.2.2

Validação Tridimensional

No procedimento de validação tridimensional, uma geometria 3D seccionada por um plano coincidente com o eixo da tubulação é modelada no *software Solidworks*, como mostra a Figura 3.7, para representar metade do domínio 3D. Isso é realizado para aplicar no plano de corte do sólido resultante a condição de plano de simetria, na aba de condições de contorno do *Fluent*, o que reduz o peso computacional por ser simulado apenas metade do domínio.

O sólido é dividido em 5 corpos para a utilização do método de criação de malha *MultiZone* no *software Meshing*, que possibilita a criação de malha hexaédrica estruturada para a geometria tridimensional escolhida. Para que o programa promova compatibilidade geométrica entre as malhas nas faces de contato entre os corpos, é necessário utilizar o comando *create part* no *DesignModeler*, após importar a geometria para o *Workbench*. Dessa forma, é possível garantir que haja compatibilidade entre os nós das malhas das faces de contato de dois sólidos adjacentes.

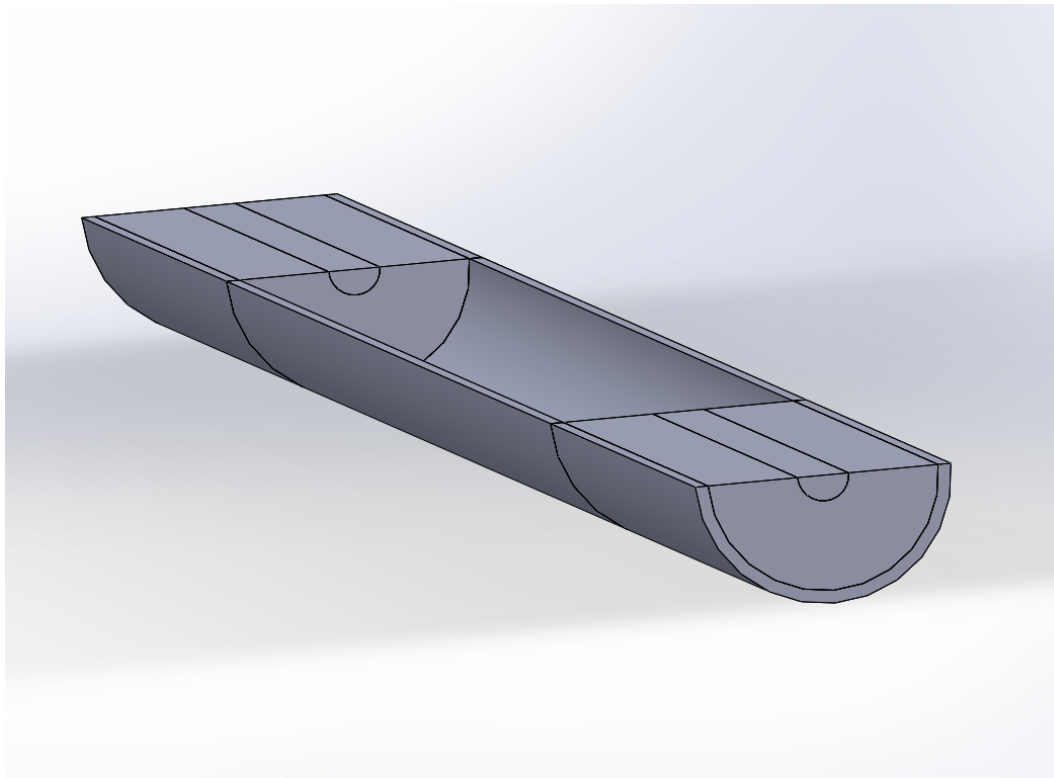


Figura 3.7: Geometria utilizada no processo de validação 3D

As superfícies na cavidade interna do cilindro formado pelos 5 corpos representa a cápsula. O sólido inteiro representa a região de escoamento do fluido.

No programa *Meshing* da *Ansys* é especificado o número de divisões na região anular para se obter 9 nós. As outras regiões são especificadas para manter uma taxa de crescimento de elementos adjacentes menor que 20% para se alcançar resultados confiáveis [5]. As Figuras 3.8 e 3.9 mostram diferentes regiões da malha criada.

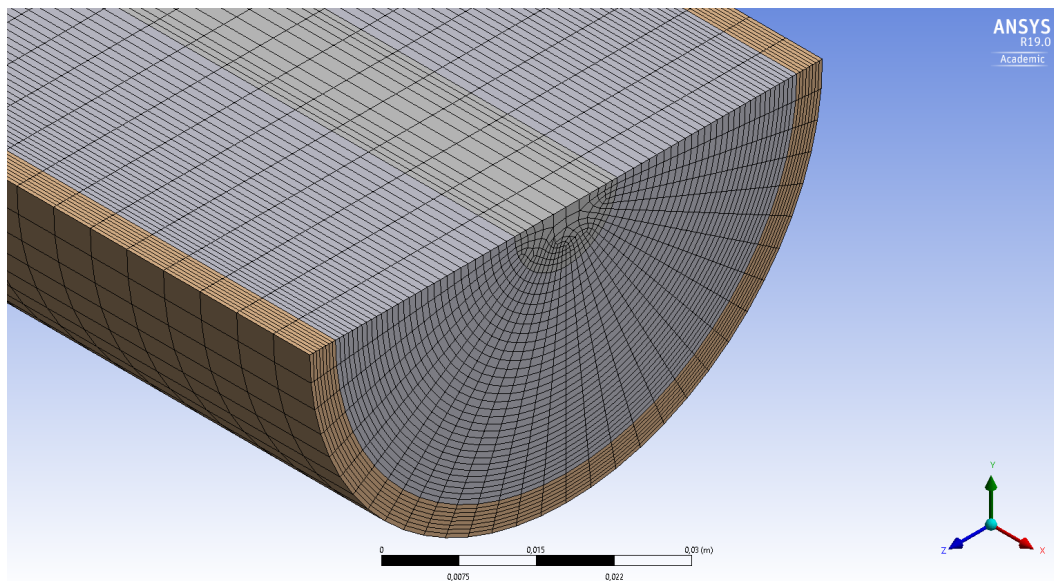


Figura 3.8: Vista da região de saída da malha

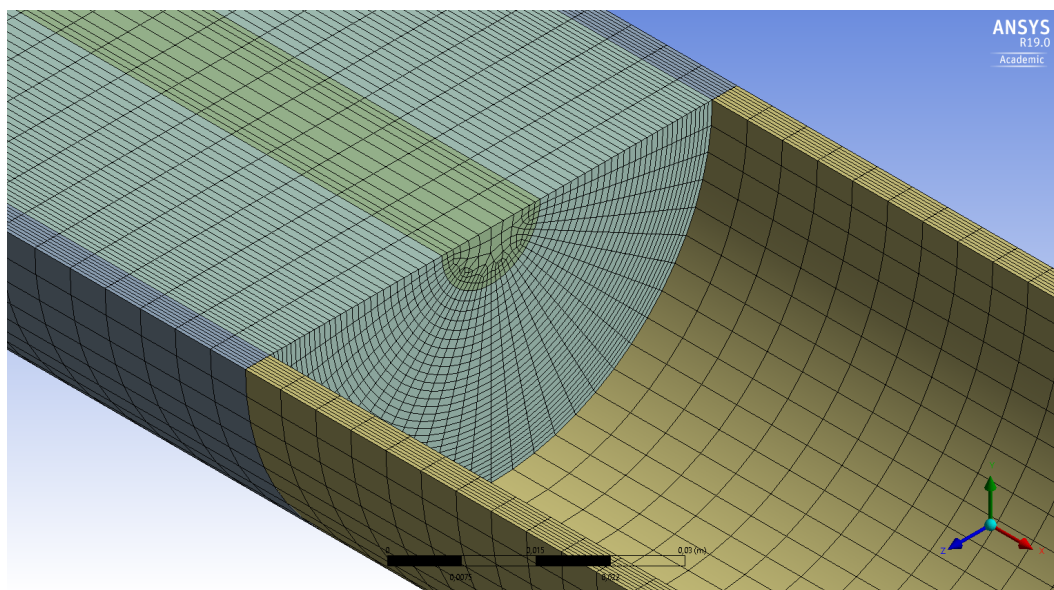


Figura 3.9: Vista da região que representa parte da cápsula no interior da malha

O processo de entrada e modificação de parâmetros no *Fluent* é similar ao da validação bidimensional, com a diferença de que é adotado escoamento 3D no *Fluent* e somente metade do domínio é simulado ao escolher o plano de corte da geometria como condição de simetria, na aba de condições de

contorno. Modelos de turbulência, materiais, condições da zona de elementos, condições de contorno restantes e métodos de solução e inicialização são mantidos inalterados com relação ao procedimento de validação bidimensional.

3.3

Simulação do Sistema de Geometria Variável

São abordados nesta seção os procedimentos de simulação para o problema proposto neste trabalho, e é apresentado um teste de convergência de malha para o intervalo de valores de y^+ desejados nas diversas simulações.

São conduzidas simulações para as diferentes geometrias adotadas neste trabalho, incluindo simulações com geometria colapsada e expandida, bem como simulações sem a instalação do sistema de geometria variável.

Tendo como base o conjunto de parâmetros utilizados no *Fluent* para a validação do modelo de turbulência, para as simulações referentes ao sistema de geometria variável, são modificados no *Fluent* apenas parâmetros como material (óleo ou gás), a velocidade da zona de elementos (velocidade do robô) e de entrada do fluido, além da adição de rugosidade na parede da tubulação, dados contidos na Tabela 1.1. Este último parâmetro é modificado dentro da janela de condição de contorno da parede interna da tubulação, no campo *roughness height*.

3.3.1

Simulações para Geometria Colapsada

São simulados casos com 4 tipos de geometria (perfil cônico, parabólico, elíptico e sem perfil ou perfil reto), a fim de avaliar a eficiência da geometria com perfil elíptico, por ser a opção com maior espaço interno para a disposição dos mecanismos de expansão e colapso do sistema de geometria variável. Além disso, são considerados também 2 diâmetros internos de tubulação por onde o robô irá operar, segundo os limites de ID da Tabela 1.1 e também os dois tipos de fluidos que podem escoar pela tubulação durante a operação do veículo robotizado, óleo e gás, resultando em um total de 16 simulações para a geometria colapsada. Na Figura 3.10 é possível visualizar o exemplo de uma das malhas simuladas para o sistema de geometria variável.

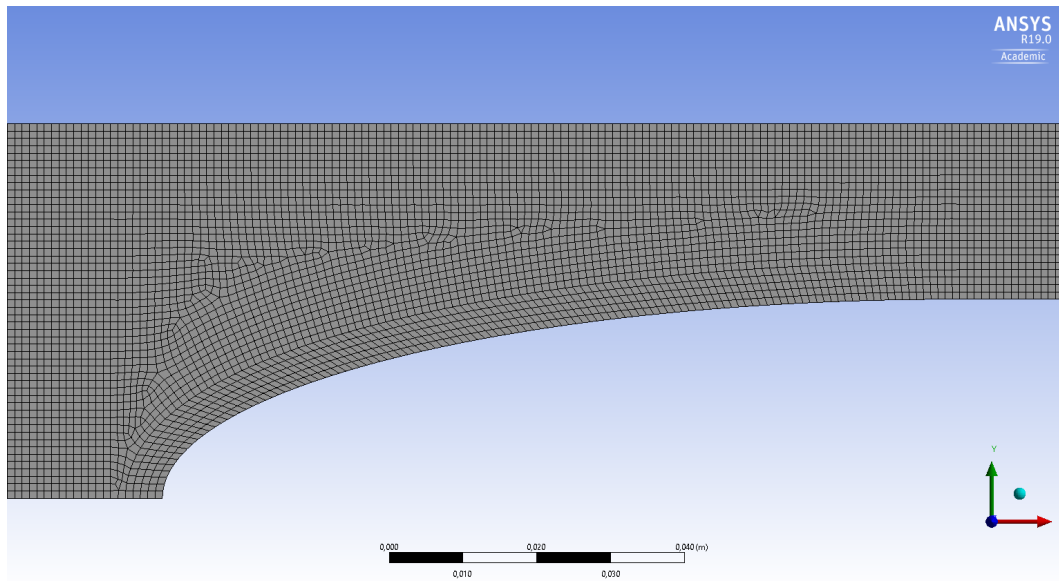


Figura 3.10: Malha utilizada para simulação do perfil elíptico em tubulação de 4 polegadas

No processo de criação da malha para diferentes tipos de geometria, é priorizada a criação de elementos que estejam alinhados com a direção do escoamento, principalmente na região próxima às paredes. Também é priorizado o uso de elementos quadriláteros para a criação das malhas.

A diferença para os casos com tubulação de 4 polegadas reside na diferença de espaçamento entre superfícies do robô e da tubulação na região anular. São mantidas as dimensões dos elementos para esses casos. Porém, para os casos de escoamento com gás, por ser uma simulação que lida com número de Reynolds mais elevados, o tamanho máximo dos elementos da malha é reduzido pela metade para se obter valores de y^+ adequados para o uso da lei de parede padrão.

3.3.2 Simulações para Geometria Expandida

No caminho de subida à superfície, com o escoamento a favor do deslocamento do robô, a geometria é expandida para se alcançar o maior arrasto possível, servindo como meio de propulsão passiva.

Como a representação simplificada da geometria expandida deixa de ser um sólido de revolução, a simulação não pode ser conduzida assumindo escoamento axissimétrico, logo a simulação é feita em 3D.

Para isso, é necessário analisar se é possível criar regiões periódicas no domínio de escoamento para a geometria expandida.

Para o caso apresentado na Figura 3.11, a geometria pode ser dividida em 4 regiões iguais em cortes de setores de 90° .

Com isso, para simular este caso, é modelado no *Solidworks* uma geometria simplificada do sistema expandido. Essa geometria é baseada no perfil elíptico da Figura 2.6, e pode ser visualizada nas Figuras 3.11 e 3.12.

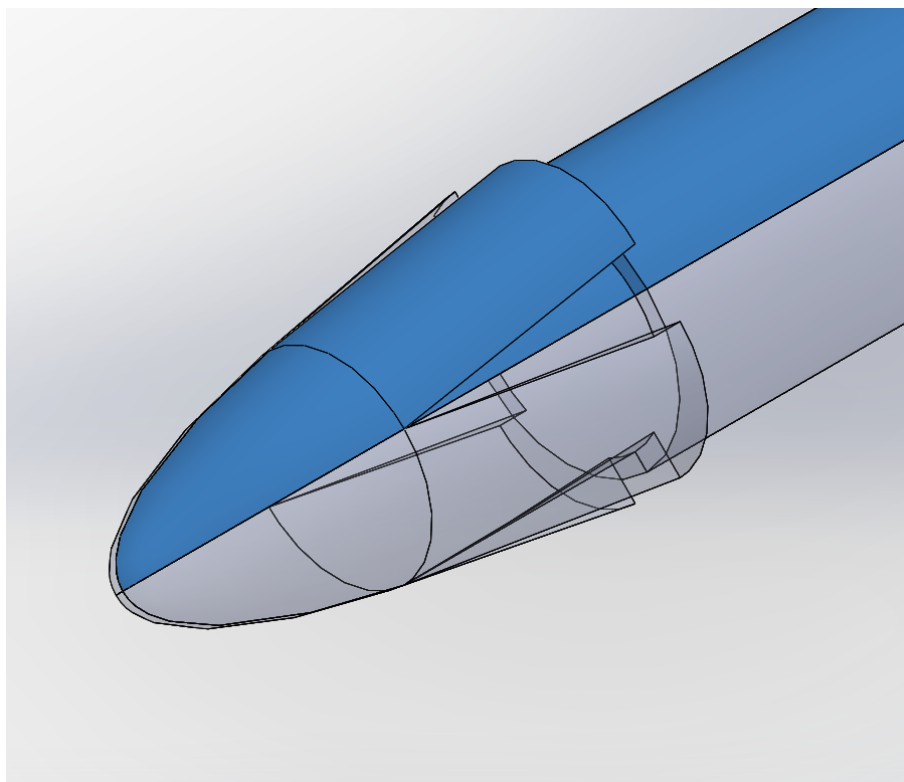


Figura 3.11: Vista isométrica da geometria expandida simplificada

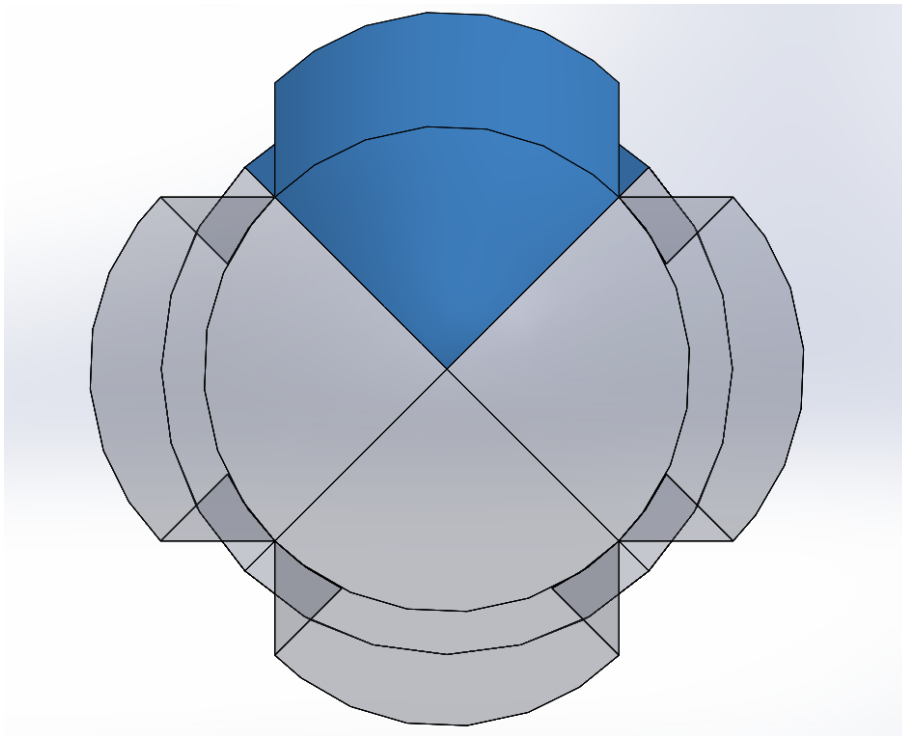


Figura 3.12: Vista frontal da geometria expandida simplificada

Para possibilitar a simulação no *Fluent* utilizando $1/4$ da geometria, é necessário definir uma interface periódica nas faces geradas pelo corte em setor do sólido. Essa interface só pode ser adequadamente criada se a malha nas duas faces são espelhadas com relação ao eixo de rotação. Para isso, é utilizado o comando *Match Control* na criação da malha, que espelha a malha de uma face do objeto a partir de um eixo de rotação.

Para a simulação no *Fluent*, é invertida a velocidade de deslocamento da *cell zone* para que as simulações sejam realizadas com o robô se deslocando na mesma direção do escoamento.

3.4

Teste de Independência da Malha

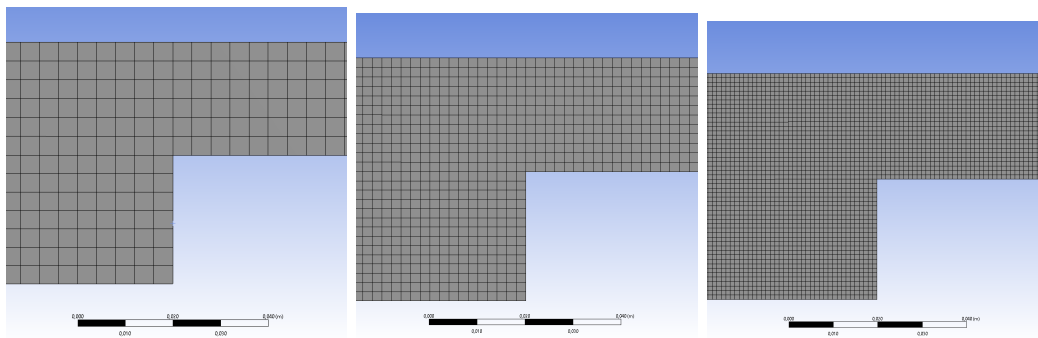
Para que as simulações apresentem resultados consistentes, é necessário realizar um teste de independência da malha, no qual os resultados obtidos são analisados de maneira a verificar a partir de qual grau de refinamento da malha eles deixam de variar significativamente. Nesse momento, dependendo da diferença entre os valores obtidos, considera-se que os resultados convergiram.

Além disso, para as simulações empregadas com a lei de parede padrão, envolvendo geometrias e faixas de Reynolds diferentes, é necessário realizar o

teste para identificar, para a dinâmica do problema, qual a faixa de y^+ mais adequada para se obter resultados consistentes.

No entanto, o refinamento da malha não deve resultar em valores de y^+ maiores e nem menores que os limites definidos para a validade da lei logarítmica utilizada na lei de parede padrão.

Para isso, o teste é realizado para diâmetro interno da tubulação de 4 polegadas e sem a instalação do sistema de geometria variável. São consideradas 3 malhas diferentes, uma inicial com elementos de 4 mm de lado, outra com redução de 2 vezes no tamanho dos elementos (2 mm de lado) e outra com redução de 4 vezes no tamanho dos lados dos elementos (1 mm de lado). Elas estão representadas nas Figuras 3.13(a), 3.13(b) e 3.13(c).



3.13(a): Malha inicial

3.13(b): Redução de 2 vezes

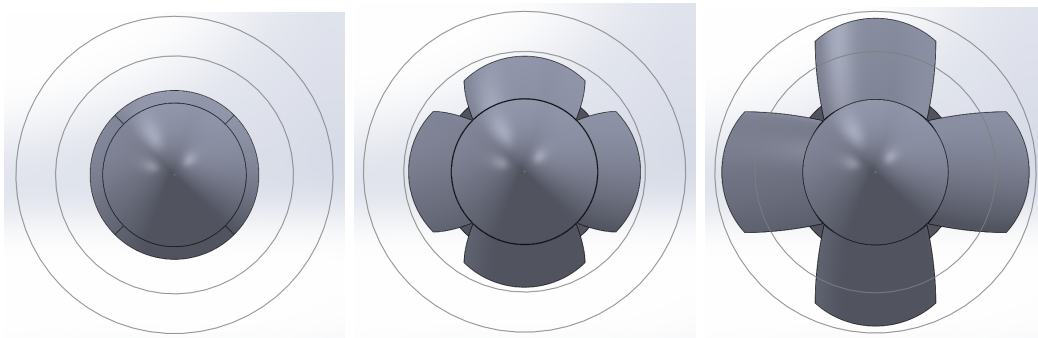
3.13(c): Redução de 4 vezes

Figura 3.13: Malhas utilizadas no teste de independência de malha

4

Modelagem do Sistema

Neste Capítulo são discutidos os procedimentos de modelagem em ferramenta CAD do sistema de geometria variável. Primeiramente é feita uma abordagem sobre a disposição dos componentes que constituem o sistema, e sobre sua montagem. São abordados também os conceitos de funcionamento do sistema elétrico, bem como os procedimentos de cálculos para o dimensionamento da mola de segurança. Essa mola possibilita fechamento do sistema expandido em caso de pico de pressão no interior da tubulação. Nas Figuras 4.1(a), 4.1(b) e 4.1(c) é possível ver os estágios do sistema de geometria variável considerados neste trabalho.



4.1(a): Geometria colapsada 4.1(b): Geometria expandida, tubulação de 3 polegadas 4.1(c): Geometria expandida, tubulação de 4 polegadas

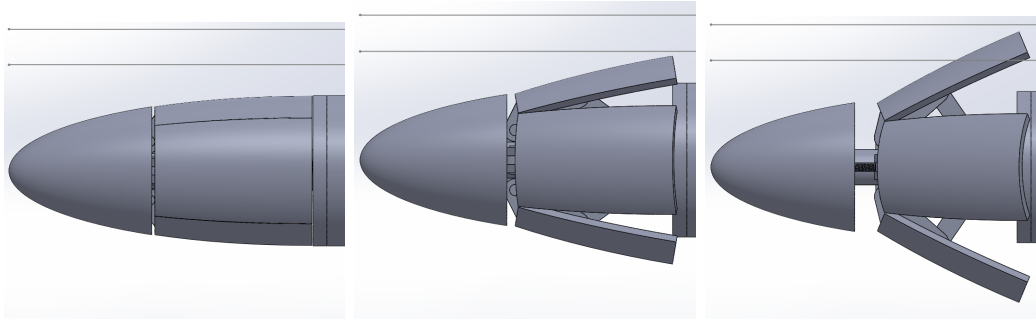
Figura 4.1: Vistas frontais dos estágios do sistema de geometria variável

4.1

Disposição dos Componentes

Através da geometria de perfil elíptico, é modelado um protótipo do sistema de geometria variável no *Solidworks*, com todos os componentes necessários para sua atuação.

O sistema dispõe de 4 pás elípticas pivotadas em 2 pontos cada para que possam inclinar e se deslocar entre as posições de mínimo arrasto possível (colapsada) e máximo arrasto possível (expandida), mostradas nas figuras 4.2(a), 4.2(b) e 4.2(c), mantendo um afastamento de 2 mm em relação à parede da tubulação por motivos de segurança ligados às irregularidades da parede interna do duto.



4.2(a): Sistema colapsado 4.2(b): Sistema expandido, tubulação de 3 polegadas 4.2(c): Sistema expandido, tubulação de 4 polegadas

Figura 4.2: Vistas de perfil dos estágios do sistema de geometria variável

O sistema é atuado eletricamente por meio de um sistema de guia linear acionado por um fuso que é rotacionado por um motor de passo, localizado na traseira do sistema.

Como pode ser visto na Figura 4.3, uma peça com rasgos defasados de 90° serve como guia para a castanha que se desloca no seu interior através da rotação do fuso. Como os rasgos da guia impedem que a castanha rotacione no próprio eixo, o movimento relativo entre as roscas da castanha e do fuso promove movimento linear de translação ao longo do tubo da guia.

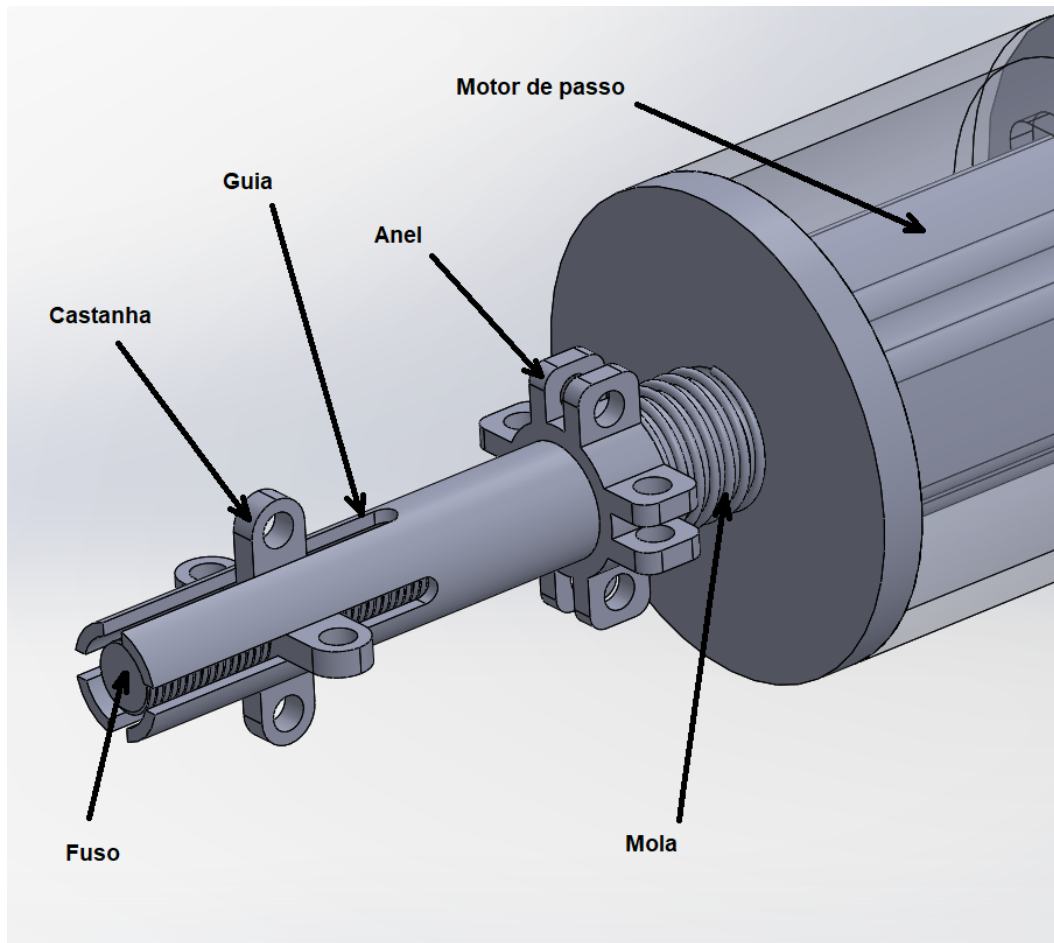


Figura 4.3: Vista isométrica do sistema de guia linear elétrico

Além disso, por causa da relação de movimentação entre rosca e castanha, o sistema é auto travante, o que evita a passagem de cargas mecânicas para o motor de passo enquanto a geometria não varia.

Esse sistema de atuação permite ajuste de variação de geometria contínuo, o que amplia a versatilidade da aplicação do sistema para diferentes diâmetros de tubulação.

Uma mola de segurança é instalada entre o anel e o disco, permitindo que em casos de pico de pressão no interior da tubulação o sistema possa fechar sem que o motor trabalhe. Além disso, um batente impede que o anel se afaste da mola, possibilitando que ela trabalhe sob compressão.

A ponta do sistema é composta por um sólido gerado através da rotação do mesmo perfil elíptico que gera a geometria da pá, representada na Figura 4.4. Ela é fixada na guia e serve como tampa para o sistema de guia linear, limitando o deslocamento da castanha ao longo do tubo.

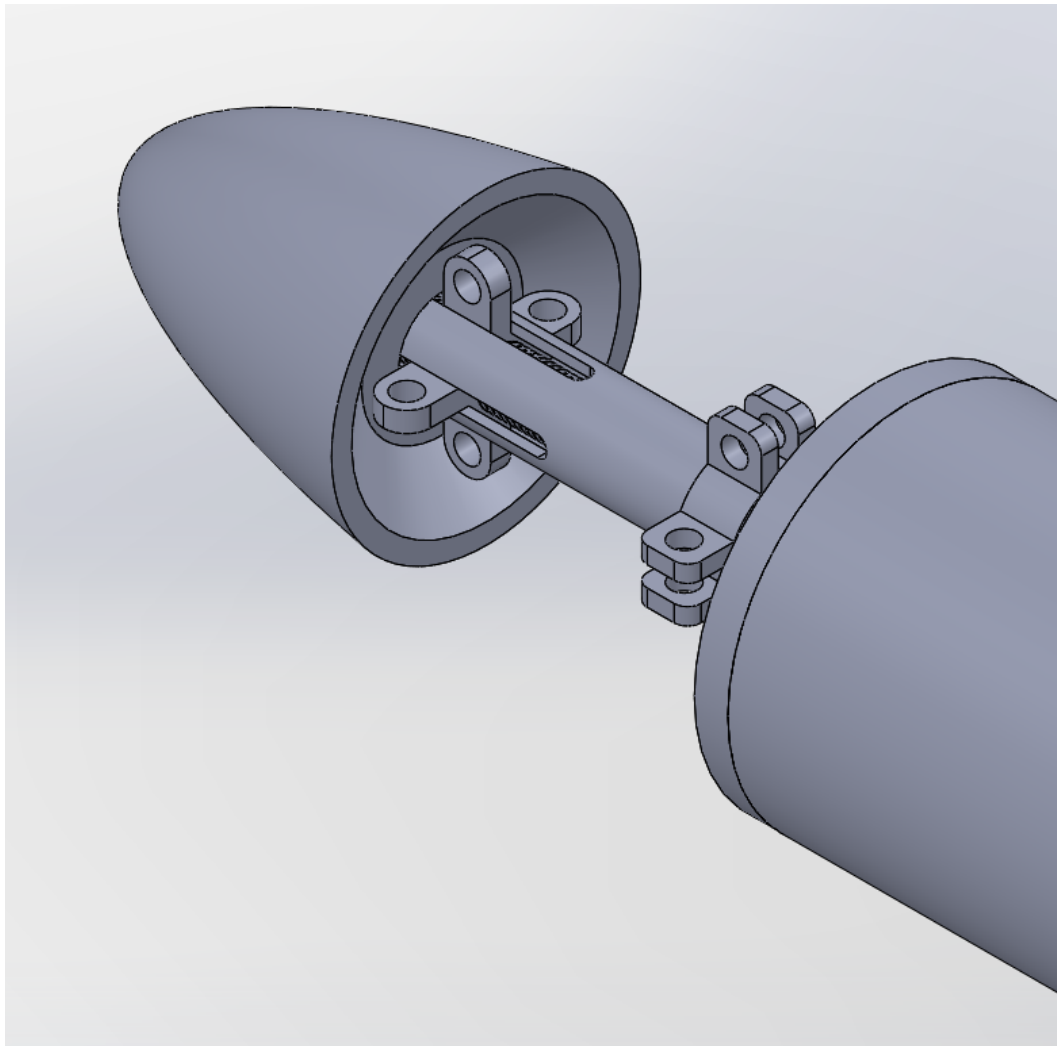


Figura 4.4: Vista isométrica do sistema sem as pás elípticas

A montagem do sistema é feita através da instalação do fuso no eixo do motor de passo, seguido do aparafusamento do motor de passo no disco. Em seguida, são posicionados o anel e a mola na parte tubular do disco e a guia é então rosqueada, aplicando pressão na mola. Depois, é encaixada a castanha nos canais da guia. Com isso, a ponta do sistema pode ser instalada junto com as pás e os braços com os pinos e anéis elásticos. A vista explodida do sistema projetado pode ser visualizada na Figura 4.5.

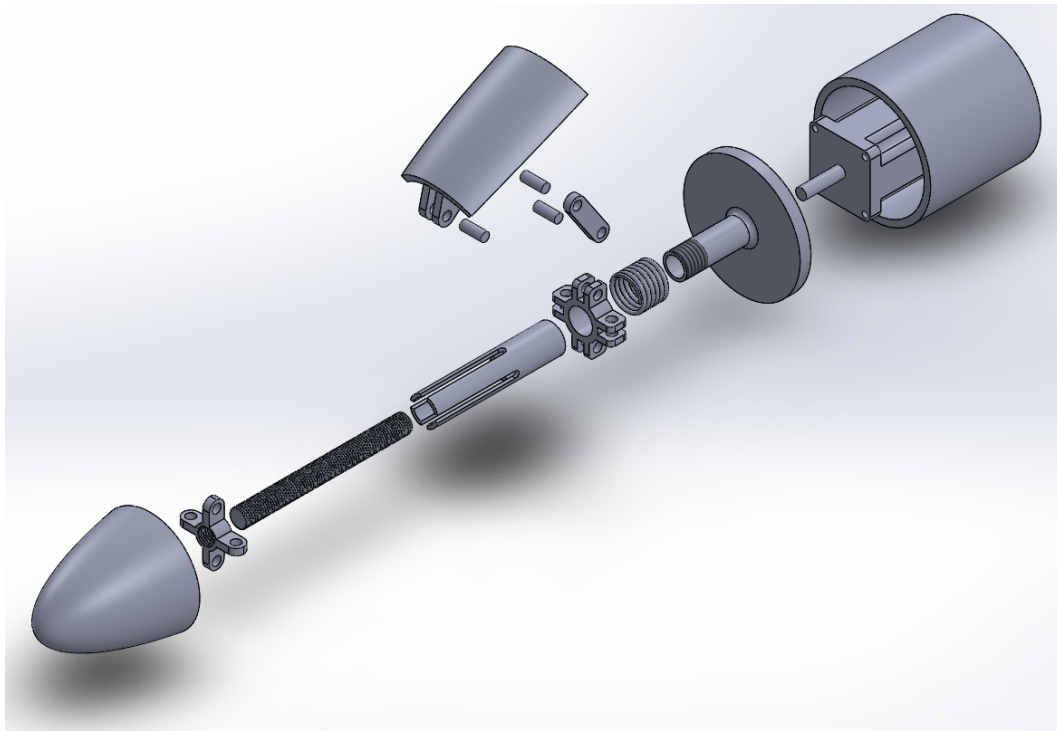


Figura 4.5: Vista explodida do sistema de geometria variável

4.2

Dimensionamento da Mola

O sistema de geometria variável deve contar com um dispositivo de segurança que evite que eventuais picos de pressão no interior da tubulação representem aumentos muito significativos de força de arrasto, podendo fazer com que a produção seja prejudicada ou com que as rodas do robô deslizem em relação a parede da tubulação.

O sistema com mola projetado é totalmente mecânico e não depende de eletrônica para regular a força de arrasto com base no aumento de pressão.

Para o dimensionamento da mola, é necessário calcular sua constante para que o sistema possa fechar com pressões acima daquelas induzidas pelas velocidades máximas de escoamento da Tabela 1.1.

Com isso, são realizados cálculos para que se obtenha 2 mm de deformação da mola para as pressões máximas das simulações. É considerado inclusive um afastamento padrão de 2 mm da parede interna por conta de irregularidades na superfície do revestimento do poço. Somados, são 4 mm de afastamento para ambos os casos de diâmetros internos, como pode ser visto nas Figuras 4.6 e 4.7.

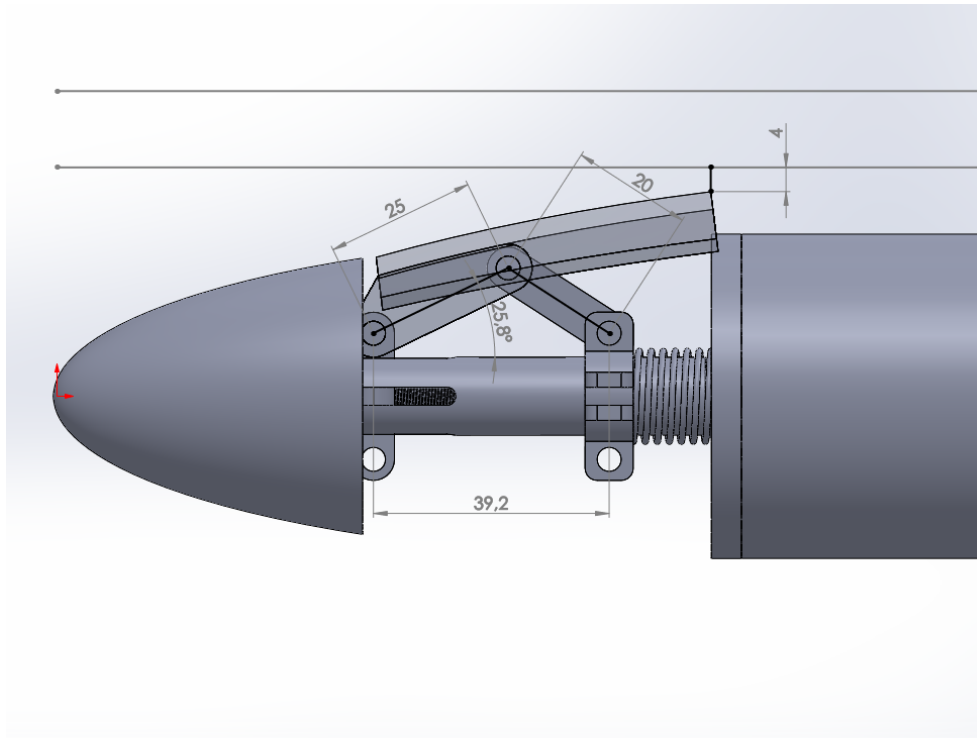


Figura 4.6: Vista de perfil com dimensões do sistema de elevação das pás para o caso de tubulação de 3 polegadas

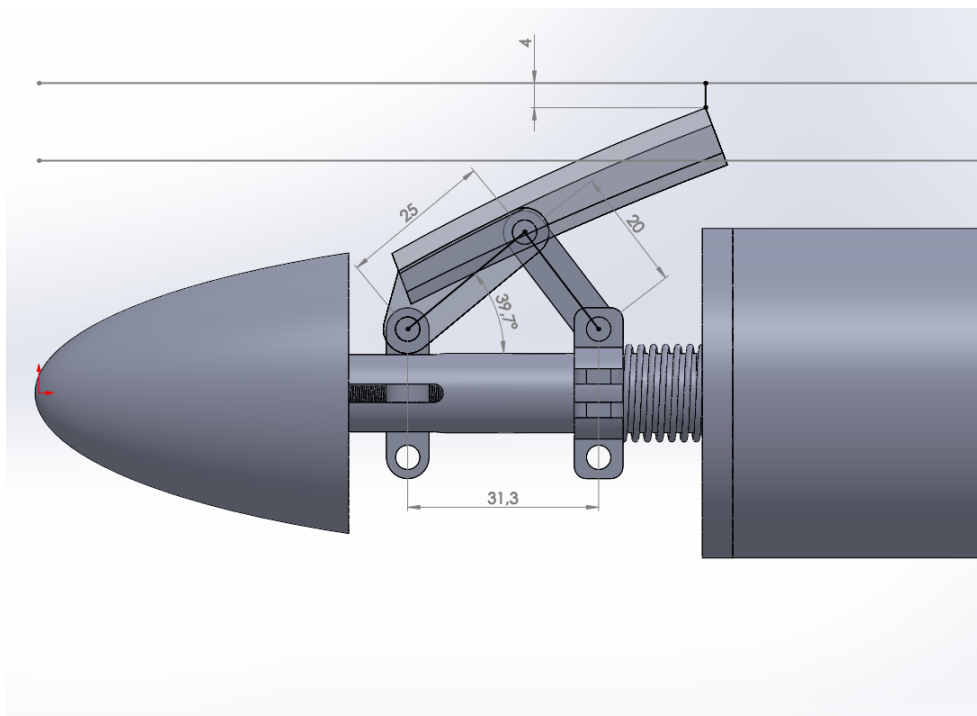


Figura 4.7: Vista de perfil com dimensões do sistema de elevação das pás para o caso de tubulação de 4 polegadas

Com isso, foi considerado o modelo presente na Figura 4.8 onde é simplificado que a força resultante na pá é aplicada no ponto de pivotamento superior. Assim, conhecendo-se as forças F_x e F_y através dos resultados das simulações, é possível aplicar as equações de equilíbrio de forças e momentos para calcular os valores das reações nos apoios A e B.

O apoio do ponto A deve ser considerado como fixo através da consideração de que o sistema é auto travante.

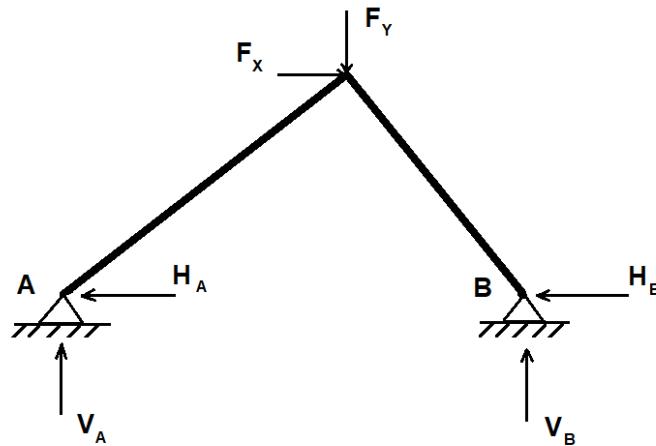


Figura 4.8: Desenho simplificado para dimensionamento da mola

A componente horizontal da reação no apoio B é a força de reação da mola para apenas uma pá para o caso de pressão máxima no interior da tubulação. Para calcular a força de reação total da mola para as 4 pás do sistema, é preciso multiplicar o valor da reação por 4.

5

Resultados e Discussão

Neste Capítulo são apresentados e discutidos os resultados das simulações realizadas segundo os procedimentos descritos no Capítulo 3. Também são apresentados os cálculos das propriedades da mola de segurança a partir dos resultados obtidos nas simulações do sistema de geometria variável.

5.1

Resultados das Validações

De acordo com os gráficos das Figuras 5.1 e 5.2, verifica-se que as validações realizadas para os modelos bidimensionais e tridimensionais apresentam resultados próximos ao longo de todo o comprimento da tubulação. A maior diferença reside na representação da queda de pressão no local de entrada da região anular, onde aparecem os vórtices por causa da mudança brusca de direção do escoamento.

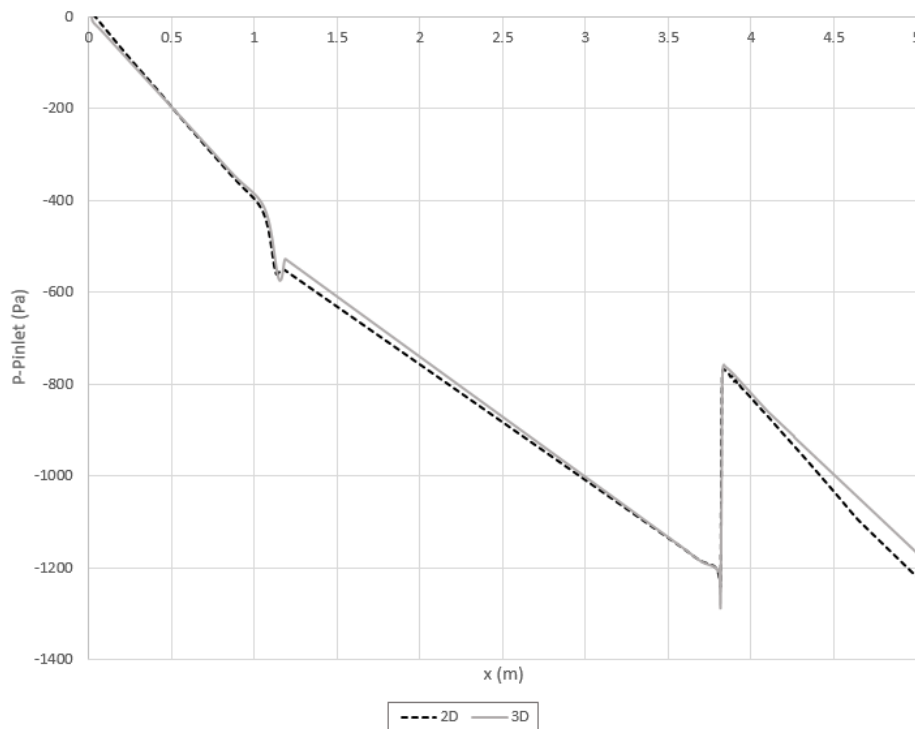


Figura 5.1: Gráfico da simulação de validação para queda de pressão

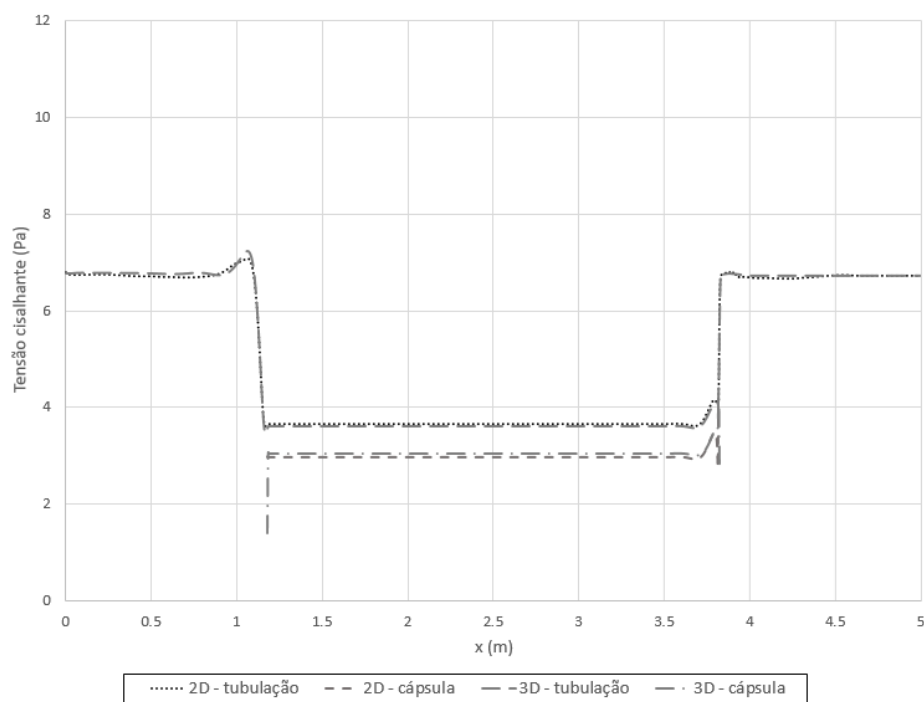


Figura 5.2: Gráfico da simulação de validação para a tensão cisalhante

A Tabela 5.1 relaciona os dados de queda de pressão e fator de atrito obtidos para ambas as simulações com os dados experimentais obtidos por J Dul, e apresenta também os respectivos erros.

Tabela 5.1: Tabela com dados da validação e erros

| Erro na Validação | | | | |
|-------------------|-----------------------|------|-----------------|------|
| Geometria | Queda de pressão (Pa) | Erro | fator de atrito | Erro |
| 2D | -255 | 5,8% | 0,017 | 3.1% |
| 3D | -260 | 7,9% | 0,017 | 3.1% |

Verifica-se que o modelo de turbulência $k-\epsilon$ padrão adotado para a dinâmica do trabalho indica resultados para queda de pressão com menos de 8% erro, e para o fator de atrito na tubulação de 3,1%, o que o justifica como um modelo válido para o estudo das forças de arrasto nas geometrias consideradas neste trabalho.

Também verifica-se a partir do gráfico da Figura 5.3 que para ambos os casos simulados os valores de y^+ na parede são adequados para o emprego da lei de parede padrão.

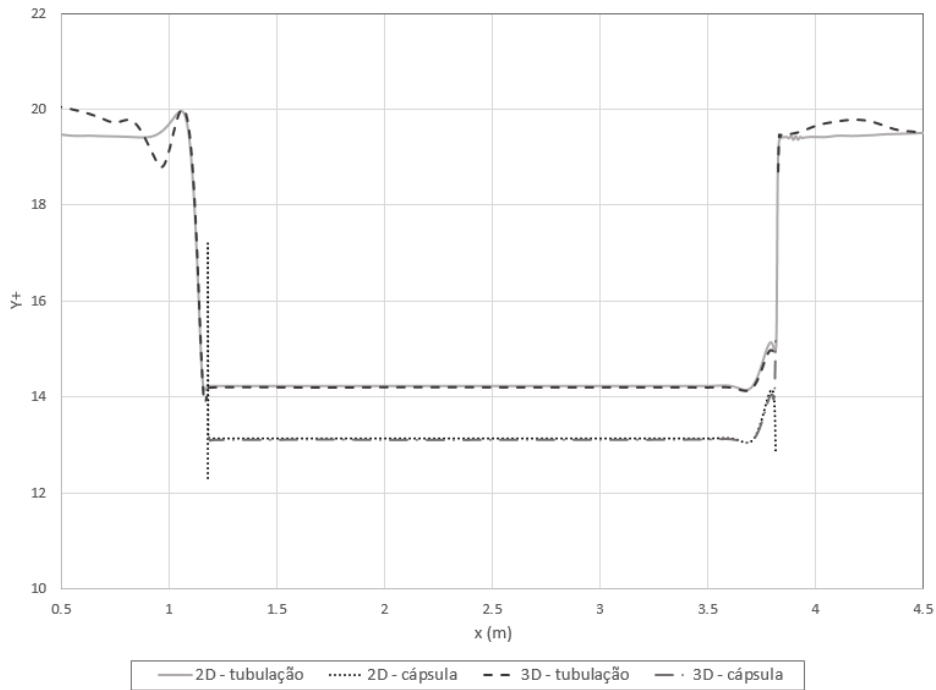


Figura 5.3: Gráfico dos valores de y^+ obtidos nas simulações de validação

5.2

Resultados das Simulações para Geometria Colapsada

O teste de convergência da malha mostra a variação das soluções apresentadas nas simulações para os diferentes tipos de malha considerados. Os gráficos das Figuras 5.4 e 5.5 mostram as variações de queda de pressão e de tensão cisalhante de acordo com o grau de refinamento da malha. Além disso, os intervalos de valores de y^+ obtidos para todas as malhas podem ser vistos no gráfico da Figura 5.6.

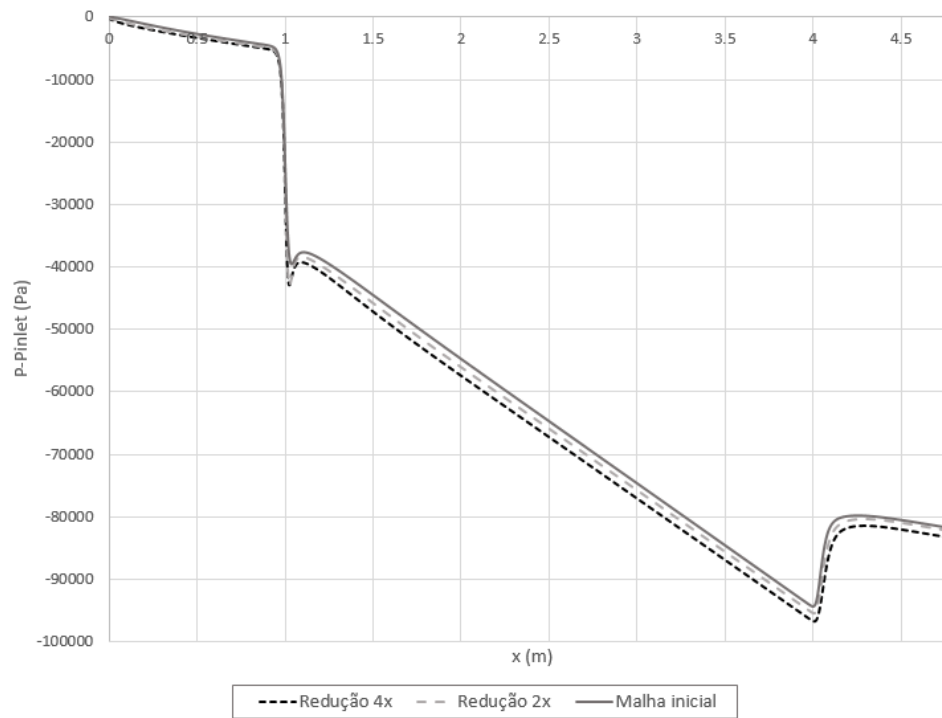


Figura 5.4: Gráfico da queda de pressão para diferentes malhas

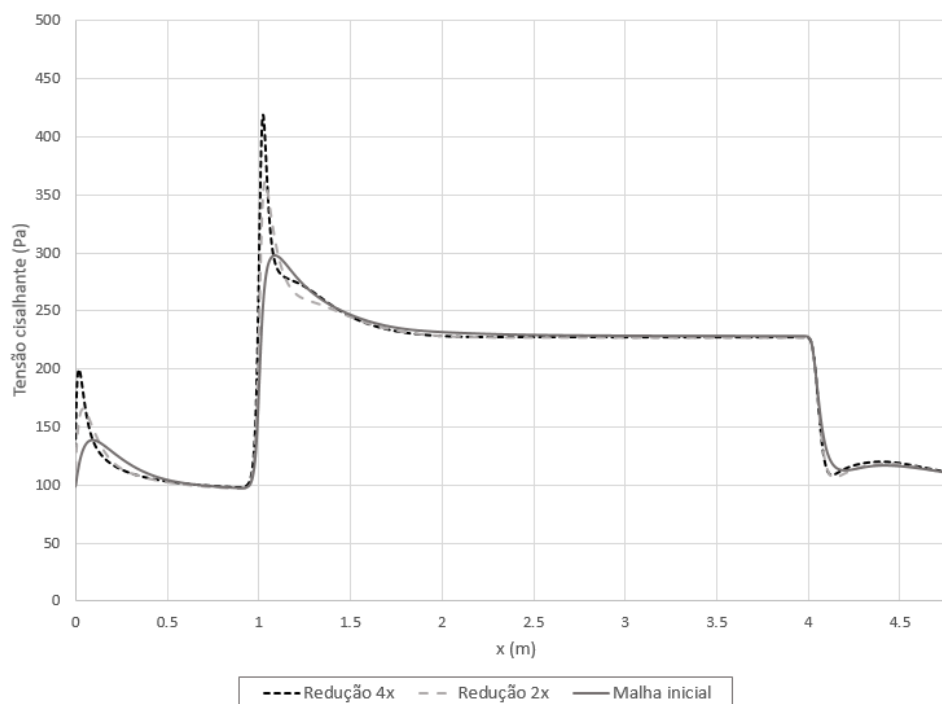


Figura 5.5: Gráfico da tensão cisalhante na tubulação para diferentes malhas

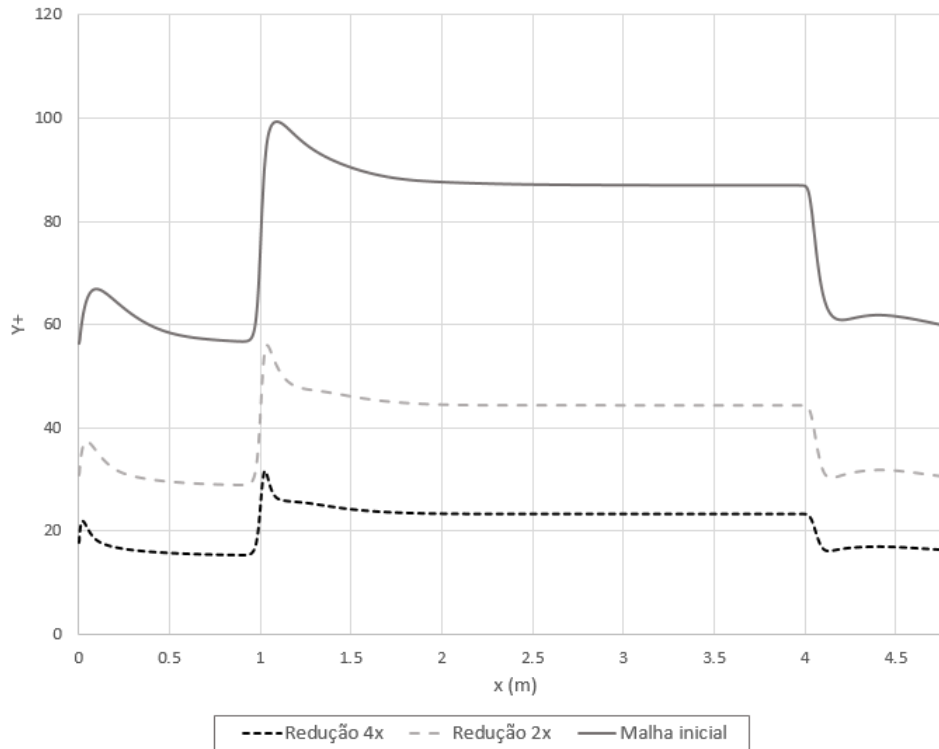


Figura 5.6: Gráfico de valores de y^+ obtidos para diferentes malhas

Verifica-se que as malhas com redução de 2 e 4 vezes no tamanho dos elementos apresentaram resultados muito próximos. Vale ressaltar que refinamentos de malha adicionais levariam à ultrapassagem do limite inferior de valores de y^+ (≈ 12) para os quais a lei de parede padrão é válida. E, como pode ser visto no gráfico da Figura 5.6, os valores mínimos de y^+ já estão próximos desse limite.

Logo, simulações que apresentam valores de y^+ dentro da faixa apresentada pelas malhas com redução de 2 e 4 vezes não necessitam de refinamento adicional para se obter resultados consistentes.

Com isso, as simulações para os diferentes tipos de geometria considerados foram processadas em 16 malhas para cada condição descrita (variando tipo de perfil, diâmetro de tubulação e tipo de fluido). Nos gráficos das Figuras 5.7 e 5.8 é possível ver um exemplo do formato do perfil de queda de pressão e os valores de y^+ priorizados para as simulações do restante das malhas.

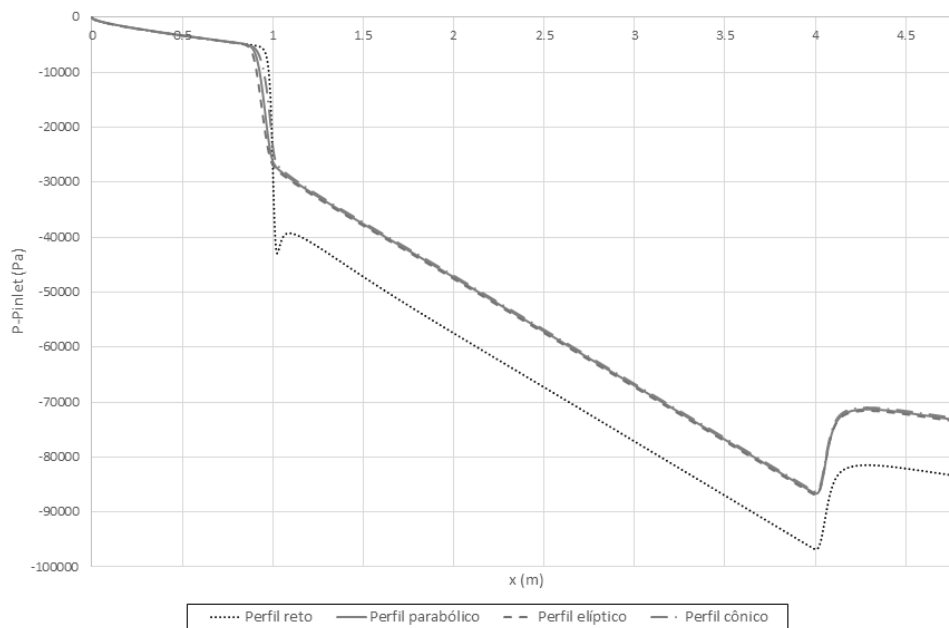


Figura 5.7: Gráfico de queda de pressão para óleo e tubulação de 4 polegadas

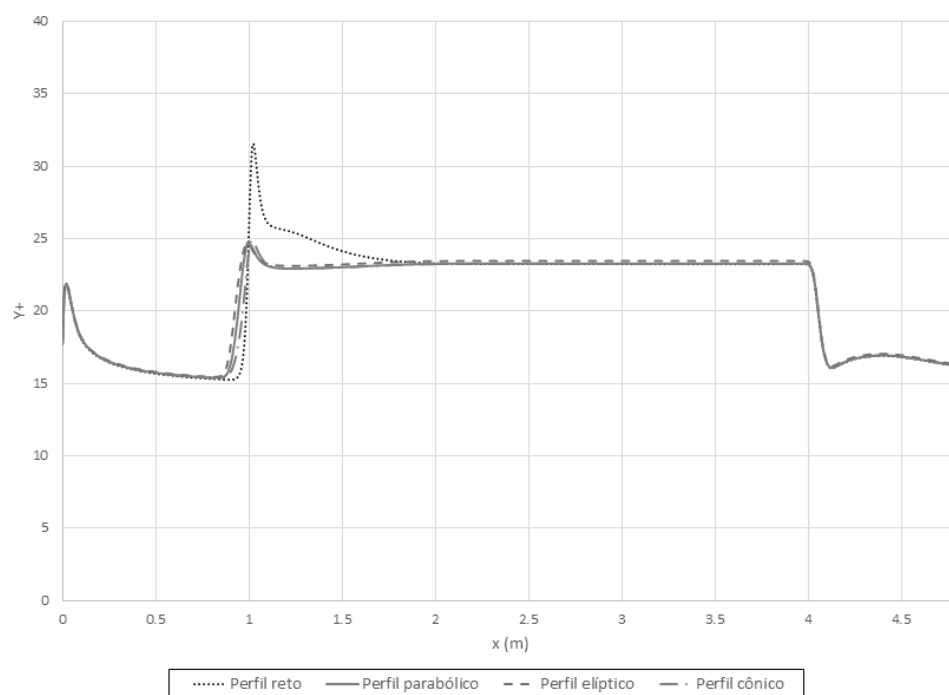


Figura 5.8: Gráfico de valores de y^+ para óleo e tubulação de 4 polegadas

Através do gráfico da Figura 5.7 é possível notar como a queda de pressão é mais pronunciada na região de encontro do escoamento com o robô para o caso sem a utilização de uma geometria na sua frente. Isso se manifesta em

um aumento da componente de arrasto de forma, que pode ser visto na Tabela 5.3.

As Tabelas 5.2 e 5.3 reúnem os resultados de todas as simulações para análise dos dados de arrasto para a geometria colapsada.

Tabela 5.2: Forças de arrasto para gás com geometria colapsada

| Força de Arrasto (gás) | | | | | | |
|------------------------|-----------|-------------|-----------|-----------|-------------|-----------|
| Tipo de geometria | ID 3" | | | ID 4" | | |
| | Forma (N) | Viscoso (N) | Total (N) | Forma (N) | Viscoso (N) | Total (N) |
| Perfil reto | 24.6 | 5.4 | 30 | 6.2 | 2.3 | 8.5 |
| Perfil cônico | 20.3 | 5.6 | 25.9 | 4.1 | 2.4 | 6.5 |
| Perfil parabólico | 20.4 | 5.6 | 26 | 4.1 | 2.4 | 6.5 |
| Perfil elíptico | 20.5 | 5.6 | 26.1 | 4.2 | 2.5 | 6.7 |

Tabela 5.3: Forças de arrasto para óleo com geometria colapsada

| Força de Arrasto (óleo) | | | | | | |
|-------------------------|-----------|-------------|-----------|-----------|-------------|-----------|
| Tipo de geometria | ID 3" | | | ID 4" | | |
| | Forma (N) | Viscoso (N) | Total (N) | Forma (N) | Viscoso (N) | Total (N) |
| Perfil reto | 972 | 285.6 | 1257.6 | 248.5 | 123 | 371.5 |
| Perfil cônico | 824.6 | 293 | 1117.6 | 169.7 | 130.3 | 300 |
| Perfil parabólico | 828.1 | 295.1 | 1123.2 | 170.5 | 131.3 | 301.8 |
| Perfil elíptico | 831.6 | 296.2 | 1127.8 | 172 | 131.8 | 303.8 |

Verifica-se que os perfis cônico, parabólico e elíptico apresentam reduções de arrasto semelhantes e significativas quando comparados ao arrasto produzido pela geometria de perfil reto.

Logo, a utilização do perfil elíptico para a modelagem do sistema mostra-se eficiente, por apresentar maior volume que os outros perfis, para melhor disposição dos componentes internos, sem aumentar na mesma proporção a sua contribuição na força de arrasto.

5.3

Resultados das Simulações para Geometria Expandida

Para as simulações de geometria expandida, é necessário verificar se o sistema expandido passa a apresentar ganho de arrasto significativo quando comparado ao arrasto resultante no robô sem o sistema instalado.

As Tabelas 5.4 e 5.5 mostram que há ganho de arrasto para todas as situações consideradas no caso de locomoção do robô com a geometria expandida.

Tabela 5.4: Forças de arrasto para gás com geometria expandida

| Força de Arrasto - Geometria Expandida (gás) | | | | |
|--|------------|--------|-----------|-----------|
| ID (in) | Componente | Região | Força (N) | Total (N) |
| 3 | Horizontal | 4 Pás | 4,8 | 36,4 |
| | | Robô | 31,6 | |
| | Vertical | 4 Pás | 13,2 | - |
| | | Robô | - | |
| 4 | Horizontal | 4 Pás | 2,8 | 10,8 |
| | | Robô | 8 | |
| | Vertical | 4 Pás | 1,6 | - |
| | | Robô | - | |

Tabela 5.5: Forças de arrasto para óleo com geometria expandida

| Força de Arrasto - Geometria Expandida (óleo) | | | | |
|---|------------|--------|-----------|-----------|
| ID (in) | Componente | Região | Força (N) | Total (N) |
| 3 | Horizontal | 4 Pás | 154,4 | 1316 |
| | | Robô | 1161,6 | |
| | Vertical | 4 Pás | 448 | - |
| | | Robô | - | |
| 4 | Horizontal | 4 Pás | 91,2 | 412 |
| | | Robô | 320,8 | |
| | Vertical | 4 Pás | 58,8 | - |
| | | Robô | - | |

Para comparação com o caso de geometria colapsada, o gráfico da Figura 5.9 compara os valores de queda de pressão para os casos de geometria colapsada ou expandida. Verifica-se que no segundo caso a queda de pressão é mais acentuada ao longo do sistema de geometria variável do que no primeiro caso, justificando o aumento de arrasto de forma com a expansão da geometria.

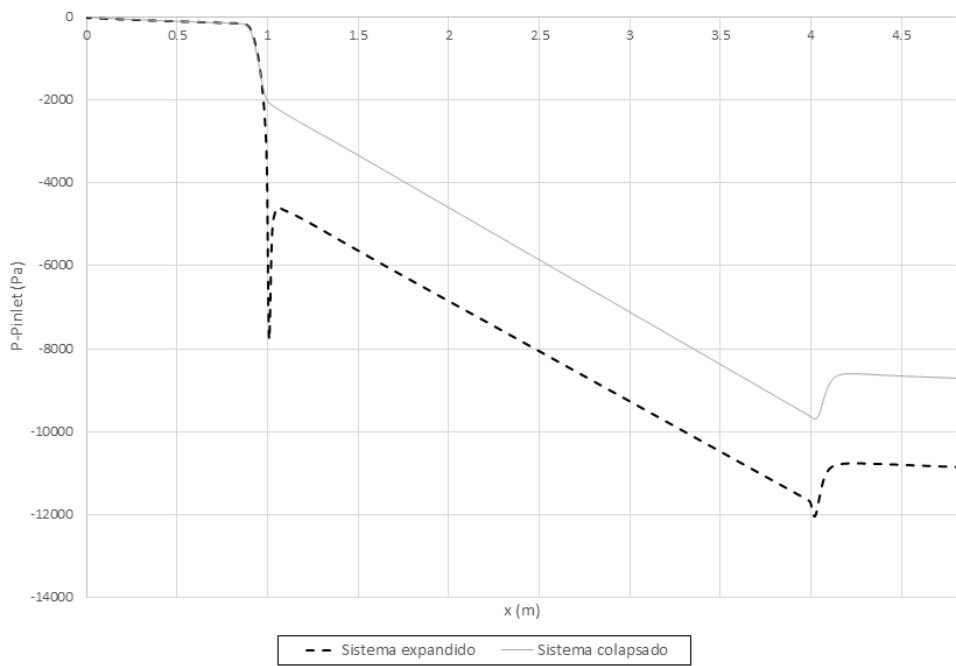


Figura 5.9: Gráfico de queda de pressão para configurações expandida e colapsada, para escoamento de gás em tubulação de 3 polegadas

Portanto, verifica-se que a expansão do sistema de geometria variável é eficiente para a redução do consumo de energia do robô no caminho de subida à superfície.

5.4
Propriedades da Mola

Os resultados dos cálculos realizados para o dimensionamento da mola podem ser vistos na Tabela 5.6. Os dados utilizados para os cálculos da constante da mola foram baseados nos resultados de força de arrasto na pá obtidos nas Tabelas 5.4 e 5.5.

Tabela 5.6: Resultados do dimensionamento da mola

| Dimensionamento da mola | | | |
|-------------------------|-----------------------------|-------|------------------|
| ID (in) | Força de reação da mola (N) | | k da mola (kN/m) |
| | 1 pá | 4 pás | |
| 3 | 45,7 | 182,8 | 91,4 |
| 4 | 30,7 | 122,8 | 61,4 |

Nesse caso, para uma mesma constante de mola adotada, o sistema de segurança terá comportamentos diferentes dependendo do diâmetro da

tubulação. Isso significa que, caso a pressão no interior da tubulação exceda o valor estipulado pela Tabela 1.1, o sistema afasta as pás da parede de maneira mais expressiva para o caso de tubulação com diâmetro interno de 3 polegadas.

6

Conclusões e Sugestões

Neste trabalho foi modelado e simulado um sistema de geometria variável para reduzir o consumo de energia de um veículo robótico. Um sistema de segurança com mola foi dimensionado para poder amenizar o aumento de arrasto no robô em casos de pico de pressão no interior da tubulação.

Foi validado o modelo de turbulência $k-\epsilon$ para a estimativa de força de arrasto na dinâmica do problema. Os resultados da validação referentes à queda de pressão e à tensão cisalhante na tubulação apresentaram erros abaixo de 8% quando comparados aos dados empíricos disponíveis.

Também foi verificado que para todas as situações simuladas o sistema de geometria variável apresentou resultados favoráveis à redução de energia na locomoção do robô móvel. Esses resultados mostraram perdas de arrasto entre 11% e 27% com a geometria colapsada, e ganhos de arrasto entre 11% e 46% para a geometria expandida, quando comparado ao caso do robô sem o sistema instalado.

Portanto, uma sugestão para trabalhos futuros é utilizar de um modelo de turbulência sem funções de parede (como o $k-\omega$) para resolver a camada viscosa e verificar se a estimativa de fator de atrito torna-se mais próxima dos dados experimentais. Nas próximas simulações ainda sugere-se também que sejam considerados os braços do robô, para maior aproximação da simulação com o caso real.

Outra sugestão é realizar uma análise de otimização da geometria do sistema para se alcançar maior redução de consumo de energia do robô nos percursos de descida ao poço e de subida à superfície.

Finalmente, uma última sugestão é verificar a influência do número de pás na eficiência do sistema. Ainda podem ser analisadas também quais disposições de pás no sistema favorecem sua fabricação e sua montagem.

Referências Bibliográficas

- [1] Salim M Salim and S Cheah. Wall y^+ strategy for dealing with wall-bounded turbulent flows. In *Proceedings of the international multiconference of engineers and computer scientists*, volume 2. Citeseer, 2009.
- [2] J Dul. International Report B-27. Technical report, Twente Univ. Tech. Netherlands, 1976.
- [3] HH Van den Kroonenberg. A mathematical model for concentric horizontal capsule transport. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 56(5):538–543, 1978.
- [4] Mohamed F Khalil, Sadek Z Kassab, Ihab G Adam, and Mohamed A Samaha. Turbulent flow around single concentric long capsule in a pipe. *Applied Mathematical Modelling*, 34(8):2000–2017, 2010.
- [5] Ansys Fluent. 12.0 user's guide. *Ansys Inc*, 2009.
- [6] A Cengel Yunus and John M Cimbala. Fluid mechanics fundamentals and applications. *International Edition, McGraw Hill Publication*, 185201, 2006.
- [7] Robert W Fox, Alan T McDonald, and Philip J Pritchard. Introduction to fluid dynamics. *John Wiley & Sons*, 2004.
- [8] Gary A Crowell Sr. The descriptive geometry of nose cones. URL: <http://www.myweb.cableone.net/cjcrowell/NCEQN2.doc>, 1996.
- [9] MA Samaha. *Numerical Simulation of the Flow through Hydraulic Capsule Pipeline*. PhD thesis, MSc Thesis, Faculty of Engineering, Alexandria University, Alexandria 21544, Egypt, 2007.
- [10] Henk Kaarle Versteeg and Weeratunge Malalasekera. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Pearson Education, 2007.