

SIMULAÇÃO CFD DE DIFERENTES GEOMETRIAS DE SIDEPOD PARA
CARRO DE FORMULA SAE

Quentin Devorsine

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadores: Gustavo Rabello dos Anjos
Raquel Jahara Lobosco

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2026



*UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO*

Politécnica
UFRJ

Escola Politécnica

Departamento de Engenharia Mecânica

SIMULAÇÃO CFD DE DIFERENTES GEOMETRIAS DE SIDEPOD PARA
CARRO DE FORMULA SAE

Quentin Devorsine

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO MECÂNICO.

Examinada por:

Prof. Gustavo Rabello dos Anjos, D.Sc.

Prof. Raquel Jahara Lobosco, D.Sc.

Prof. Gabriel Lisbôa Veríssimo, D.Sc.

Prof. Luã Guedes Costa, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

FEVEREIRO DE 2026

Devorsine, Quentin

Simulação CFD de diferentes geometrias de sidepod para carro de formula SAE/ Quentin Devorsine. – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2026.

X, 33 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Gustavo Rabello dos Anjos

Raquel Jahara Lobosco

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/
Curso de Engenharia Mecânica, 2026.

Referências Bibliográficas: p. 33 – 34.

1. OpenFOAM. 2. CFD. 3. Sidepod. 4. FSAE. I. Rabello dos Anjos, Gustavo *et al.*. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Curso de Engenharia Mecânica. III. Simulação CFD de diferentes geometrias de sidepod para carro de formula SAE.

*On n'apprend pas à un vieux singe
à faire la grimace*

Agradecimentos

Agradeço ao meu professor Gustavo Rabello dos Anjos, que me orientou, me ajudou e me disponibilizou meios.

Gratidão à minha professora Raquel Jahara Lobosco, que me ajudou e orientou na parte de CFD.

Meus agradecimentos ao Antonio Emanuel Marques dos Santos, que me ajudou no uso das ferramentas computacionais.

Agradeço aos membros da Icarus pelo acolhimento na equipe e por ter me confiado esse projeto.

Agradeço à minha namorada pelo apoio moral cotidiano, as dicas e a ajuda na redação em português.

Sou muito grato a minha família que mesmo a 9000 km de distância consegue me ajudar e me permite realizar esse intercâmbio e esse projeto.

Por fim, agradeço aos meus amigos, com quem eu posso falar sem pressão e que de certa forma me ajudaram nesse processo.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico

SIMULAÇÃO CFD DE DIFERENTES GEOMETRIAS DE SIDEPOD PARA CARRO DE FORMULA SAE

Quentin Devorsine

Fevereiro/2026

Orientadores: Gustavo Rabello dos Anjos

Raquel Jahara Lobosco

Departamento: Engenharia Mecânica

O presente trabalho apresenta uma análise aerodinâmica comparativa de diferentes conceitos de *sidepods* para um veículo de Fórmula SAE, visando auxiliar a equipe Icarus UFRJ na otimização da eficiência aerodinâmica do seu carro. A metodologia baseia-se na utilização de ferramentas de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) através do *software open-source* OpenFOAM. O processo de discretização espacial foi realizado com as ferramentas `blockMesh` e `snappyHexMesh`, enquanto as simulações transientes em 3D utilizaram o *solver* `pimpleFoam`. O estudo compreendeu três etapas fundamentais: a realização de um teste de convergência de malha para assegurar a independência dos resultados; a validação da metodologia numérica através do escoamento sobre esferas, com resultados comparados às correlações clássicas da literatura; e a análise comparativa de três geometrias distintas de *sidepods*. Os resultados permitiram avaliar o desempenho de cada conceito por meio do coeficiente de arrasto (C_d) e do produto $C_d \cdot A$. Conclui-se que, embora geometrias complexas apresentem menores C_d intrínsecos, a área frontal reduzida desempenha um papel crucial na força de arrasto total. Este trabalho estabelece uma base metodológica para futuras integrações de modelos de radiadores como meios porosos e simulações do veículo completo.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Mechanical Engineer

CFD SIMULATION OF DIFFERENT SIDEPOD GEOMETRIES FOR SAE
FORMULA CAR

Quentin Devorsine

February/2026

Advisors: Gustavo Rabello dos Anjos

Raquel Jahara Lobosco

Department: Mechanical Engineering

This work presents a comparative aerodynamic analysis of different sidepod concepts for a Formula SAE vehicle, aiming to support the Icarus UFRJ team in improving its car's aerodynamic efficiency. The methodology is based on Computational Fluid Dynamics (CFD) using the open-source software OpenFOAM. The spatial discretization process was performed using `blockMesh` and `snappyHexMesh` tools, while 3D transient simulations were conducted with the `pimpleFoam` solver. The aerodynamic study comprised three fundamental stages: a mesh convergence study to ensure results' independence; the validation of the numerical methodology through flow simulations over spheres, with results compared against classical literature correlations; and a comparative analysis of three distinct sidepod geometries. The results allowed for the performance evaluation of each concept through the drag coefficient (C_d) and the $C_d \cdot A$ product. It is concluded that while complex geometries may present lower intrinsic C_d values, a reduced frontal area plays a crucial role in the total drag force. This work establishes a methodological foundation for future integrations of radiator models as porous media and full-vehicle simulations.

Sumário

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	x
1 Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Objetivo	2
1.3 Organização do TCC	2
2 Revisão Bibliográfica	4
3 Metodologia Proposta	9
3.1 CFD e Equações governantes	9
3.1.1 Equações de Navier-Stokes	10
3.2 Esferas	10
3.2.1 Preparação do Caso Numérico	11
3.2.2 Estudo de convergência de Malha	13
3.2.3 Modelos de Correlação para Validação	15
3.3 Projeto dos <i>Sidepods</i>	17
4 Resultados	23
4.1 Estudo da Esfera	23
4.1.1 Resultados do Teste de Convergência de Malha	23
4.1.2 Resultados para Diferentes Números de Reynolds	24
4.2 Análise dos <i>Sidepods</i>	27
5 Conclusões	30

Lista de Figuras

1.1	Exemplo <i>sidepods</i>	1
3.1	Coeficiente de arrasto (C_d) em função do número de Reynolds (Re) segundo Brown e Lawler [1].	11
3.2	Domínio computacional para a simulação da esfera.	12
3.3	Visualização das densidades de malha no plano de simetria da esfera.	15
3.4	Comparação de Correlações para o Coeficiente de Arrasto de uma Esfera	16
3.5	Inspiração conceito 2 ([2])	17
3.6	Inspiração conceito 3 ([2])	17
3.7	Modelo de <i>sidepod</i> 1.	18
3.8	Modelo de <i>sidepod</i> 2.	18
3.9	Modelo de <i>sidepod</i> 3.	19
3.10	Domínio computacional para a simulação dos <i>sidepods</i>	20
3.11	Malha do primeiro <i>sidepod</i>	21
3.12	Malha do segundo <i>sidepod</i>	21
3.13	Malha do terceiro <i>sidepod</i> , zoom na localização do <i>sidepod</i>	22
4.1	Coeficiente de arrasto (C_d) vs. tempo, $Re = 1000$: Estudo de convergência de malha.	23
4.2	C_d vs. tempo para $Re = 100$	25
4.3	C_d vs. tempo para $Re = 200$	25
4.4	C_d vs. tempo para $Re = 500$	26
4.5	C_d vs. tempo: 1° modelo de <i>sidepod</i>	27
4.6	C_d vs. tempo: 2° modelo de <i>sidepod</i>	28
4.7	C_d vs. tempo: 3° modelo de <i>sidepod</i>	28

Lista de Tabelas

3.1	Condições de contorno para os campos de velocidade (U) e pressão (p).	12
3.2	Número de elementos nos casos do estudo de convergência da malha para a esfera.	14
3.3	Número de elementos das malhas para as simulações dos <i>sidepods</i> . . .	20
4.1	Resultados, estudo de convergência de malha	24
4.2	Comparação entre os coeficientes de arrasto da esfera.	26
4.3	Comparação aerodinâmica entre os conceitos de <i>sidepod</i>	29

Capítulo 1

Introdução

Um *sidepod* é uma carenagem aerodinâmica utilizada em veículos de competição do tipo monoposto. Geralmente, os *sidepods* são posicionados em ambos os lados do chassi e atuam como um duto que abriga o radiador.

O *sidepod* tem duas funções principais distintas :

- Maximizar a eficiência de resfriamento do radiador.
- Minimizar o arrasto devido à passagem de ar no radiador.

Existem diversas geometrias de *sidepods*; uma forma de classificá-los é pela variação da seção transversal: seções constantes, convergentes-divergentes (efeito Venturi) ou divergentes-convergentes (com função de reduzir a velocidade do ar). Na figura 1.1 pode ser visto um *sidepod* (peça em preto) montado em um veículo de fórmula SAE.



Figura 1.1: Exemplo *sidepods*

1.1 Motivação

A motivação desse projeto nasceu do objetivo de melhorar a eficiência aerodinâmica do veículo de fórmula SAE da equipe Icarus UFRJ. Existem vários meios para fazer isso; os principais são: asas traseiras e dianteiras, o fundo plano do carro ou *undertray* e o *sidepod*. Somado a isso, há a necessidade de projetar um novo sistema de arrefecimento, visto que o motor do veículo será substituído, o que exige um sistema mais adaptado ao novo propulsor para maximizar a sua eficiência térmica..

1.2 Objetivo

Objetivo Geral - O objetivo geral deste trabalho é realizar uma análise aerodinâmica comparativa de diferentes conceitos de *sidepods* para um veículo de Fórmula SAE, utilizando ferramentas de fluidodinâmica computacional (CFD) para avaliar o desempenho de cada geometria.

Objetivos Específicos

1. Estabelecer e validar um ambiente de simulação no software OpenFOAM através de testes de convergência de malha e validação com dados da literatura para esferas.
2. Conceber três modelos conceituais de *sidepods* com diferentes variações de seção transversal.
3. Realizar simulações transientes utilizando o solver *pimpleFoam* para obter os coeficientes de arrasto de cada geometria.
4. Comparar o desempenho dos conceitos através do produto $C_d \cdot A$ para identificar a geometria com menor resistência ao avanço.

1.3 Organização do TCC

A estrutura deste trabalho está dividida em cinco capítulos. O Capítulo 1 introduz a temática e delimita os objetivos do presente trabalho. O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica, visitando a literatura técnica científica para estabelecer

a base conceitual necessária. No Capítulo 3, detalha-se a metodologia, abrangendo os procedimentos de simulação do *sidepod*. O Capítulo 4 é dedicado à apresentação e análise dos resultados obtidos. Por fim, o Capítulo 5 encerra o estudo com as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Um dos documentos mais importantes e de leitura obrigatória é o regulamento da SAE International [3], pois o projeto deve respeitar as normas da competição para garantir sua participação. Entre as regras, as mais relevantes para este trabalho são as dimensões máximas dos elementos aerodinâmicos.

A aerodinâmica dos carros é um assunto muito complexo e existem muitos estudos e livros sobre isso. A obra de McBeath [2] oferece uma fundamentação sólida para a compreensão da aerodinâmica; nela, destaca-se a seção sobre *ducts*, que são condutos aerodinâmicos, o *sidepod* pode ser considerado um desses condutos. Segundo McBeath [2], o coeficiente de arrasto de um radiador sem *sidepod* pode ser até treze vezes maior do que com um *sidepod*.

O livro de Katz [4] é uma referência para a transição da aerodinâmica teórica para as aplicações concretas no automobilismo. Ele fala do papel complexo do *sidepod*, destacando a dupla função dele de gestão do fluxo interno para o arrefecimento e carenagem aerodinâmica para a redução do arrasto de força de pressão. Ele demonstra que a otimização do *sidepod* não pode ser feita isoladamente, porque a forma dele condiciona a qualidade do fluxo para a asa traseira. Katz [4] justifica o uso de coeficientes de arrasto (C_d) e de sustentação (C_l) para comparar a eficiência intrínseca de conceitos geométricos antes de sua escala final.

A obra de Seward [5] é uma referência fundamental para o projeto de carros de competição. O autor apresenta métodos para o design de entradas de ar e dutos internos, visando otimizar o fluxo para os radiadores enquanto minimiza o arrasto aerodinâmico. Além disso, o texto enfatiza a importância do posicionamento es-

tratégico desses componentes para o equilíbrio de massas e o empacotamento do chassi. Seward [5] discute como a geometria das laterais do veículo influencia a performance térmica e a estabilidade dinâmica do carro.

O estudo de Doddegowda *et al.* [6] avalia o uso de ferramentas de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) simplificadas para o design aerodinâmico de veículos Fórmula SAE. Os resultados demonstram que o coeficiente de sustentação pode ser previsto com precisão de 10%, embora o arrasto apresente maior incerteza. A pesquisa valida o uso de asas multi-elementos e analisa a perda de *downforce* causada pela interferência do rastro do capacete do piloto. Conclui-se que a simulação computacional acelera o ciclo de projeto ao complementar de forma eficaz os testes em túnel de vento.

O estudo de Hetawala *et al.* [7] analisa a otimização aerodinâmica global de um carro do tipo Fórmula SAE usando ferramentas de simulação numérica (CFD). Comparando diferentes configurações, os autores demonstram que a integração combinada de uma asa dianteira e entradas de ar na *firewall* permite reduzir significativamente o arrasto e estabilizar o fluxo na parte traseira do veículo minimizando o rastro. Embora o artigo trate do carro como um todo, ele destaca a importância da gestão dos fluxos de ar internos e a evacuação deles, uma problemática central para a eficiência aerodinâmica e térmica dos *sidepods*.

O trabalho de Oxyzoglou *et al.* [8] apresenta o desenvolvimento de um pacote aerodinâmico completo para um carro de corrida Fórmula Student usando CAD e simulações CFD. Uma atenção especial é dada ao papel dos *sidepods*, que têm a função tanto de manter um bom arrefecimento do motor como de dirigir o fluxo para o fundo plano e o difusor. O estudo mostra que a geometria dos *sidepods* influencia fortemente a distribuição de pressão, a qualidade do fluxo sob o veículo e a interação com o rastro das rodas dianteiras. Os resultados do CFD indicam que o design otimizado dos *sidepods* reduz o arrasto devido ao arrefecimento e, ao mesmo tempo, melhora a eficiência aerodinâmica geral do veículo e o seu desempenho em curvas.

No âmbito da otimização aerodinâmica e térmica dos veículos do tipo Fórmula SAE, Sasikumar e Rajan [9] fizeram um estudo sobre a integração do sistema de arrefecimento. Usando uma abordagem CFD e uma modelagem do radiador como

um corpo poroso, os autores buscaram maximizar a vazão mássica de ar e minimizar o arrasto geral do carro. Eles demonstram que uma inclinação do radiador de 20° no eixo vertical oferece o melhor compromisso. Além disso, a análise comparativa dos perfis de *sidepods* revelou que as geometrias divergentes (onde a superfície de saída é superior à entrada) favorecem uma maior eficiência térmica. Por fim, o estudo evidencia a importância crítica da impermeabilização: a vedação das zonas superior e inferior do radiador melhora o desempenho, enquanto a adição de *gills* (aberturas laterais) mostrou-se ineficaz devido às interações turbulentas com o rastro das rodas dianteiras.

O trabalho de De Silva *et al.* [10] estuda a influência do design de *sidepods* no resfriamento do motor e no desempenho aerodinâmico de um carro da Fórmula SAE usando simulações CFD. Diferentes configurações (tamanho da entrada de ar, *sidepods* curtos, *undertray*, *gills* e *chimneys*) são analisadas para otimizar o fluxo de ar através do radiador. Os resultados mostram que a qualidade do fluxo é mais determinante do que apenas a superfície de entrada. A adição de *gills* e *chimneys* melhora significativamente a transferência de calor com uma penalidade de arrasto limitada.

O artigo [11] propõe um método de modelagem CFD de radiadores automotivos baseado em uma abordagem de meio poroso para representar as aletas sem modelar explicitamente a geometria complexa. Aplicado um radiador industrial, o método permite prever o desempenho térmico com uma precisão inferior a 3% em relação aos dados experimentais, reduzindo significativamente o custo do cálculo.

O trabalho de Hafsteinsson [12] detalha a implementação técnica de meios porosos no OpenFOAM, focando na aplicação da equação de Darcy-Forchheimer para modelar a perda de carga. Isso permite simular o radiador como uma zona porosa sem a necessidade de gerar uma malha complexa para cada aleta.

O trabalho de Oxyzoglou e Nerantzis [13] propõe uma metodologia rigorosa para a otimização de componentes aerodinâmicos em compósitos, integrando simulações de CFD e FEA para mapeamento de cargas e validação estrutural. Os autores demonstram como variáveis de espessura e orientação das camadas podem reduzir drasticamente a massa sem comprometer a rigidez exigida por regulamentos técnicos. Essa abordagem é diretamente aplicável ao desenvolvimento de peças para Fórmula

SAE, onde a eficiência estrutural e o peso mínimo são cruciais para a performance dinâmica do veículo.

O livro de Kays e London [14] é uma referência para os trocadores de calor compactos, ele é essencial para obter dados experimentais sobre geometrias específicas de aletas. Como os radiadores de FSAE utilizam núcleos compactos para maximizar a área de superfície em um volume pequeno, os gráficos dos fatores de transferência de calor e de fricção fornecidos no livro permitem calcular com precisão os coeficientes de convecção reais.

O livro de Thulukkanam [15] é uma ferramenta robusta para a seleção de materiais e análise da integridade mecânica do radiador. Ele é particularmente útil para o cálculo detalhado das perdas de carga (queda de pressão) tanto no lado do ar quanto no lado do fluido refrigerante. Em um veículo de Fórmula SAE, onde o espaço é limitado e o peso é crítico, o documento é uma ajuda para equilibrar a eficiência térmica com a potência necessária para a bomba d'água, garantindo que o radiador suporte as exigências estruturais e vibratórias da pista.

O livro de Kakaç *et al.* [16] fornece a base metodológica indispensável para o projeto térmico, focando na aplicação prática dos métodos LMTD e ϵ -NTU. Para o dimensionamento do radiador, este livro é uma guia para definir a área de troca necessária em função das taxas de fluxo e das temperaturas de operação do motor, assegurando que o sistema de arrefecimento opere de forma otimizada para evitar o superaquecimento durante a prova de enduro.

O estudo de Ahmad *et al.* [17] apresenta uma estratégia de otimização de malha aplicada à aerodinâmica veicular. Os autores demonstram que parâmetros como o tamanho da malha superficial e a taxa de crescimento são determinantes para a precisão do coeficiente de arrasto. O estudo destaca que o uso de malhas poliédricas oferece melhor resolução da esteira aerodinâmica, enquanto a adoção de simetria reduz o tempo computacional em mais de 50% sem comprometer a acurácia.

Existem muitas correlações para modelar o coeficiente de arrasto (C_D) das esferas, mas trabalhos recentes destacaram as limitações dos modelos tradicionais. Em particular, Brown e Lawler [1] fizeram uma reavaliação completa dos dados históricos para o arrasto e a velocidade de assentamento.

O livro de Clift *et al.* [18] é uma referência para estudos sobre a dinâmica

das partículas em fluidos. Ele propõe uma correlação multi-segmentada para o coeficiente de arrasto de uma esfera, reconhecida por sua precisão excepcional, mas complexa de implementar devido às suas sete equações distintas.

O trabalho de Morrison [19] propõe uma correlação única e explícita para o coeficiente de arrasto de uma esfera, funcionando sobre um grande intervalo de números de Reynolds que vão desde o regime laminar até $Re = 10^6$. Ao contrário dos modelos segmentados, essa fórmula simplificada captura com eficiência a transição crítica para a turbulência. É uma ferramenta prática e robusta para a validação de simulações numéricas com um amplo espectro operacional.

O tutorial da Wolf Dynamics [20] fornece um suporte para realizar as simulações com OpenFOAM. Ele tem funções de pós-tratamento incluídas como o cálculo do coeficiente de arrasto que é útil para a validação.

A revisão bibliográfica apresentada permitiu consolidar os fundamentos técnicos e normativos necessários para o desenvolvimento deste projeto. Inicialmente, a análise do regulamento da SAE International estabeleceu os limites geométricos e de segurança que regem a competição, garantindo a viabilidade técnica do *sidepod*. O estudo da literatura clássica de aerodinâmica veicular e de competição evidenciou a complexidade dos fluxos internos e a importância crítica da integração entre a carenagem externa e o sistema de arrefecimento para a redução do arrasto total.

A análise de trabalhos acadêmicos recentes demonstrou que a Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) é a ferramenta padrão para a otimização desses componentes em equipes de Fórmula SAE. Verificou-se que a modelagem de radiadores como meios porosos é uma abordagem eficiente e validada para simular a perda de carga sem o custo computacional de malhas excessivamente detalhadas. Adicionalmente, as referências sobre trocadores de calor forneceram a base metodológica para os cálculos térmicos e de dimensionamento que acompanham o projeto aerodinâmico.

Por fim, a revisão das correlações de arrasto para esferas e o estudo de malhas poliédricas estabeleceram os critérios de comparação necessários para a etapa de validação numérica. Com base neste arcabouço teórico, o próximo capítulo detalhará a metodologia proposta, descrevendo as etapas de simulação, os modelos geométricos concebidos e o processo de validação utilizando o software OpenFOAM.

Capítulo 3

Metodologia Proposta

A metodologia proposta consiste, primeiramente, na experimentação de diferentes perfis de *sidepod* para determinar a geometria de melhor desempenho. Para tanto, realizaram-se simulações numéricas através da ferramenta de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) OpenFOAM. O estágio inicial compreendeu a validação da metodologia de simulação, por meio do estudo do escoamento sobre uma esfera e posterior comparação dos resultados com dados consolidados na literatura.

3.1 CFD e Equações governantes

A CFD utiliza métodos numéricos e algoritmos para resolver e analisar problemas que envolvem o escoamento de fluidos. O princípio fundamental baseia-se na discretização do domínio e na resolução das equações diferenciais parciais que regem o movimento do fluido. Para escoamentos incompressíveis e isotérmicos, utilizam-se as equações de Navier-Stokes.

O OpenFOAM aplica o Método de Volumes Finitos (MVF) para transformar as equações diferenciais em um sistema linear algébrico da forma :

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \tag{3.1}$$

Onde \mathbf{A} representa a matriz de coeficientes, \mathbf{x} o vetor de incógnitas e \mathbf{b} o vetor de termos fonte.

3.1.1 Equações de Navier-Stokes

Equação da Continuidade (Conservação da Massa)

Para um fluido incompressível, a divergência do campo de velocidade é nula:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (3.2)$$

Equação de Quantidade de Movimento

Baseada na Segunda Lei de Newton, relaciona as forças aplicadas ao fluido com sua aceleração:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u}) - \nabla \cdot (\nu \nabla \mathbf{u}) = -\nabla p \quad (3.3)$$

Onde :

- \mathbf{u} : Vetor velocidade
- p : Pressão cinemática (P/ρ)
- ν : Viscosidade cinemática do fluido

3.2 Esferas

As simulações iniciais foram conduzidas sobre esferas com o objetivo de validar o ambiente numérico. Realizaram-se testes em diferentes números de Reynolds (R_e), definidos para o escoamento externo pela equação:

$$R_e = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (3.4)$$

Onde ρ é a massa específica do fluido, V a velocidade de escoamento, D o diâmetro da esfera, μ a viscosidade dinâmica e ν a viscosidade cinemática. Nas simulações, a variação do R_e foi obtida alterando-se apenas o parâmetro ν no Open-FOAM, mantendo-se a geometria e a velocidade constantes.

O parâmetro fundamental de comparação é o coeficiente de arrasto (C_d), que deve apresentar uma tendência decrescente com o aumento do número de Reynolds. Esta relação é amplamente documentada, como ilustrado pela curva de Brown e Lawler [1] na Figura 3.1. Foram executados quatro casos de validação: $R_e = 100, 200, 500$ e 1000.

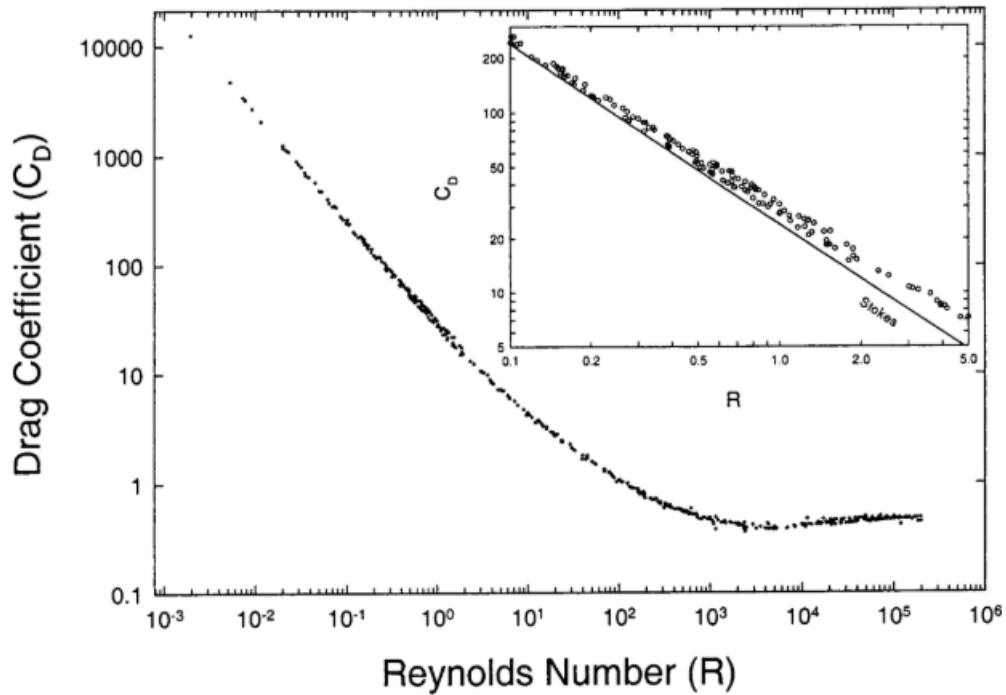


Figura 3.1: Coeficiente de arrasto (C_d) em função do número de Reynolds (R_e) segundo Brown e Lawler [1].

3.2.1 Preparação do Caso Numérico

A geometria da esfera foi modelada no *software* SolidWorks e exportada no formato `.stl`. A configuração do caso foi inspirada no tutorial de escoamento sobre cilindro da Wolf Dynamics [20]. O domínio computacional (Figura 3.2) foi definido no arquivo `blockMeshDict` como um paralelepípedo retangular de $30 \times 20 \times 20$ m. A esfera possui um diâmetro $D = 1$ m e está posicionada a 10 m da entrada (*inlet*) e de cada parede lateral (*fixedWalls*).

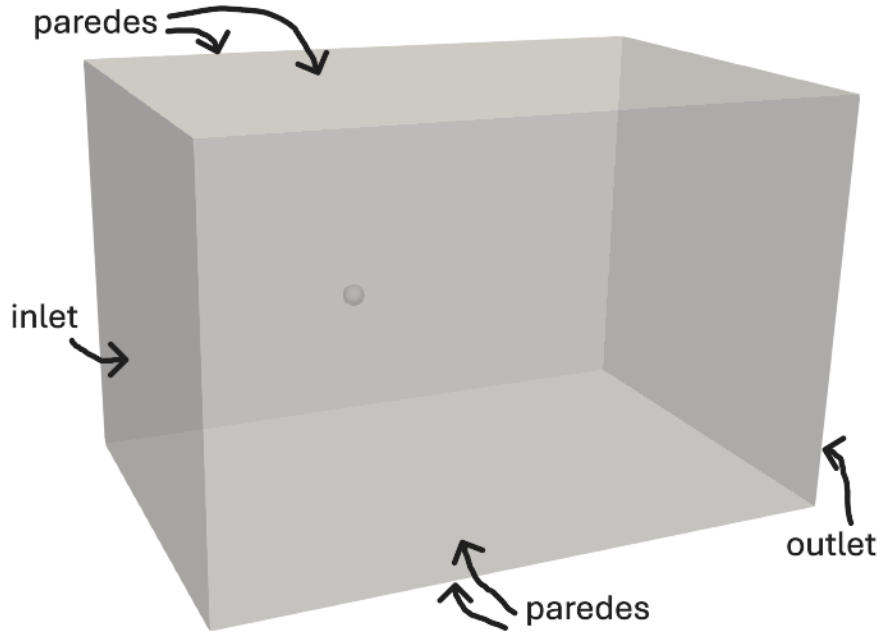


Figura 3.2: Domínio computacional para a simulação da esfera.

As condições de contorno (CC) estão detalhadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Condições de contorno para os campos de velocidade (U) e pressão (p).

Fronteira	U [m/s]	p [m ² /s ²]
Inlet	(1, 0, 0)	zeroGradient
Outlet	zeroGradient	0
fixedWalls	noSlip	zeroGradient
sphere	noSlip	zeroGradient

As condições de contorno detalhadas na Tabela 3.1 fundamentam-se nos seguintes conceitos:

1. **zeroGradient**: Define que o gradiente da variável é nulo na fronteira. Isso implica que o valor da variável na face é extrapolado da célula vizinha, indicando que a propriedade física não sofre variação ao atravessar essa superfície.
2. **noSlip**: Aplicada a superfícies sólidas, impõe velocidade nula em todas as direções, representando a condição física de aderência total do fluido à parede.

O processo de geração de malha foi realizado com o `snappyHexMesh`. O `solver` escolhido foi o `pimpleFoam`, por sua versatilidade em lidar com escoamentos incom-

pressíveis, laminares ou turbulentos em regime transiente. O algoritmo PIMPLE combina as vantagens de dois métodos clássicos:

1. PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*): Eficiente para resolver a dependência temporal.
2. SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*): Robusto para garantir a convergência da pressão em malhas complexas.

A principal vantagem do `pimpleFoam` é permitir a utilização de passos de tempo maiores (números de Courant $Co > 1$). Ele utiliza corretores externos (*outer correctors*) para garantir que o acoplamento pressão-velocidade seja resolvido de forma estável antes de avançar para o próximo incremento de tempo.

3.2.2 Estudo de convergência de Malha

Para assegurar a qualidade dos resultados, inicialmente observou-se a geometria dos elementos através da função `checkMesh`. Em seguida, realizou-se um estudo de convergência de malha para verificar se o refinamento era suficiente. Este estudo foi conduzido com $Re = 1000$, por representar o regime mais crítico; uma malha adequada para este caso garante a precisão para os demais números de Reynolds inferiores.

Foram geradas seis malhas distintas, variando-se apenas a resolução inicial no arquivo `blockMeshDict`. Os parâmetros de refinamento no arquivo `snappyHexMeshDict` foram mantidos constantes para permitir uma comparação direta. A malha inicial é controlada por três parâmetros de divisão do domínio. O número de elementos pré-refinamento (N_e) é o produto dessas divisões. Por exemplo:

A malha 2: (30 20 20) $\rightarrow N_e = 30 \times 20 \times 20 = 12.000$.

A Tabela 3.2 apresenta os dados das seis malhas testadas:

Tabela 3.2: Número de elementos nos casos do estudo de convergência da malha para a esfera.

Malha	blockMesh	N_e (pré-refinamento)	N_e (pós-refinamento)
1	(23 15 15)	5.175	179.208
2	(30 20 20)	12.000	202.229
3	(38 25 25)	23.750	554.956
4	(45 30 30)	40.500	649.043
5	(53 35 35)	64.925	1.041.588
6	(60 40 40)	96.000	1.495.644

Os principais parâmetros configurados no `snappyHexMeshDict` foram:

- Refinamento de superfície (esfera) definido entre os níveis 3 e 4, com o nível máximo aplicado onde o ângulo entre facetas excede 30° (`resolveFeatureAngle`).
- Refinamento volumétrico via duas caixas (*refinement boxes*): uma *refinement-Box* (nível 4) em torno da esfera e uma *wakeBox* (nível 3) para capturar a esteira.
- Adição de 5 camadas prismáticas na superfície (`nSurfaceLayers`), com razão de expansão de 1,2 (`expansionRatio`) para resolução da camada limite.

As seis malhas foram inspecionadas qualitativamente no *software* ParaView, utilizando um corte no plano normal à direção \vec{z} (Figuras 3.3a a 3.3f).

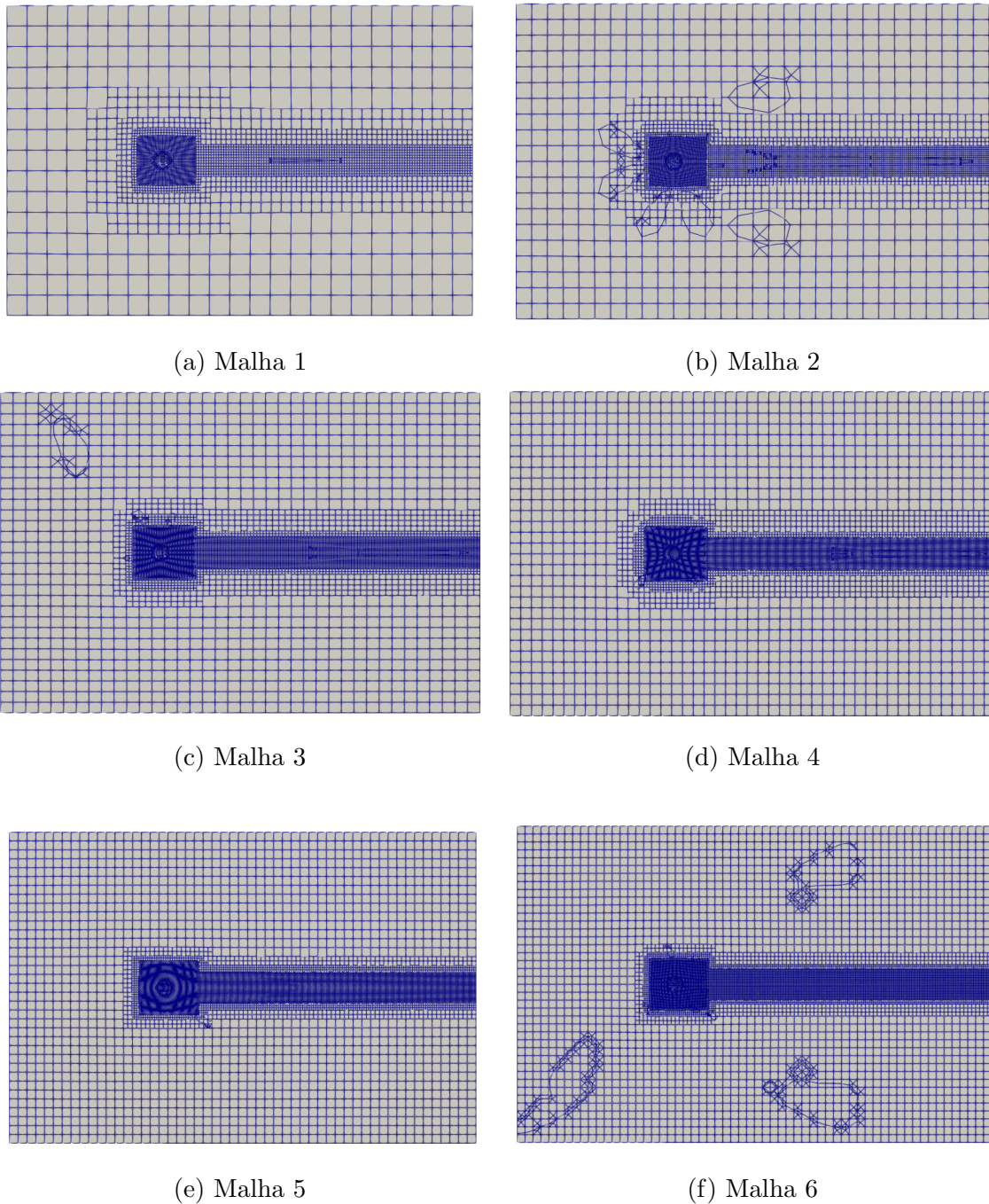


Figura 3.3: Visualização das densidades de malha no plano de simetria da esfera.

3.2.3 Modelos de Correlação para Validação

Para validar os resultados, utilizaram-se três correlações consagradas:

1. A correlação que Morrison [19] consiste em uma equação única para um amplo

intervalo de Reynolds até 10^6 :

$$C_d = \frac{24}{Re} + \frac{2,6 \left(\frac{Re}{5,0}\right)}{1 + \left(\frac{Re}{5,0}\right)^{1,52}} + \frac{0,411 \left(\frac{Re}{2,63 \cdot 10^5}\right)^{-7,94}}{1 + \left(\frac{Re}{2,63 \cdot 10^5}\right)^{-8,00}} + \frac{0,25 \left(\frac{Re}{10^6}\right)}{1 + \left(\frac{Re}{10^6}\right)} \quad (3.5)$$

2. A correlação de Clift *et al.* [18] é composta por sete equações distintas, em função do número de Reynolds; contudo, apresenta pequenas descontinuidades nos pontos de transição entre essas equações. As equações de interesse neste caso são:

$$C_d = \frac{24}{Re} (1 + 0,1935 Re^{0,6305}) \quad (3.6)$$

Para $20 \leq Re \leq 260$, e :

$$\log C_d = 1,6435 - 1,1242 \log Re + 0,1558 (\log Re)^2 \quad (3.7)$$

Para $260 \leq Re \leq 1500$

3. A correlação proposta por Brown e Lawler [1], em 2003, baseia-se em trabalhos anteriores e reproduz a precisão da correlação de Clift *et al.* [18], utilizando uma única equação para $Re \leq 2 \cdot 10^5$:

$$C_d = \frac{24}{Re} (1 + 0,15 \cdot Re^{0,681}) + \frac{0,407}{1 + \frac{8710}{Re}} \quad (3.8)$$

A comparação entre estas correlações é apresentada na Figura 3.4.

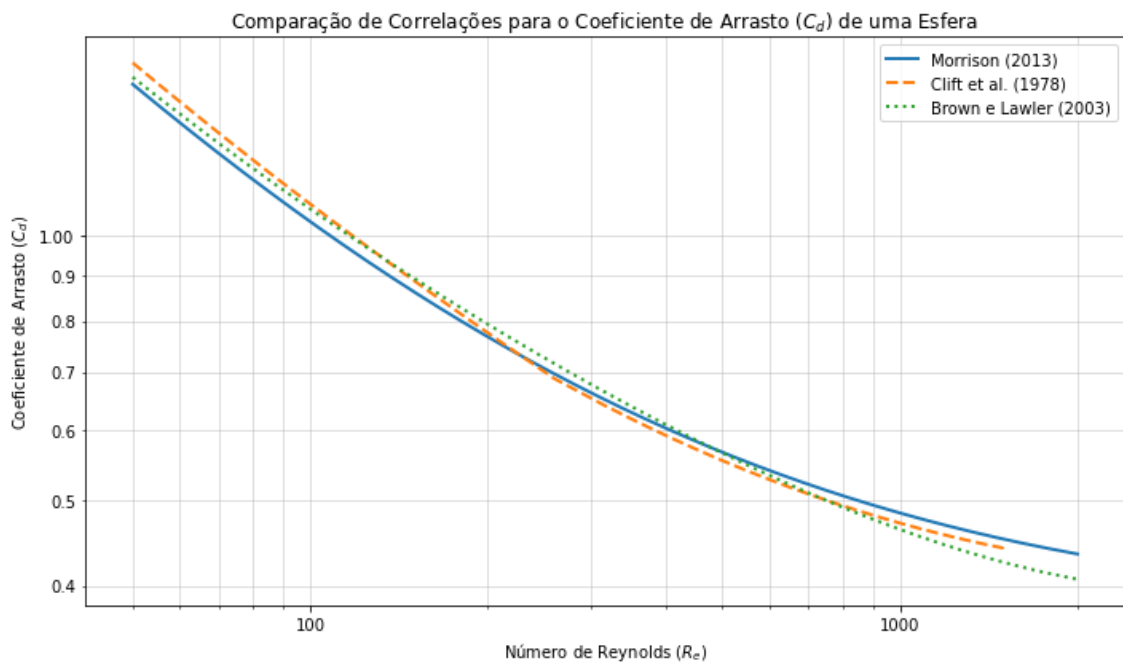


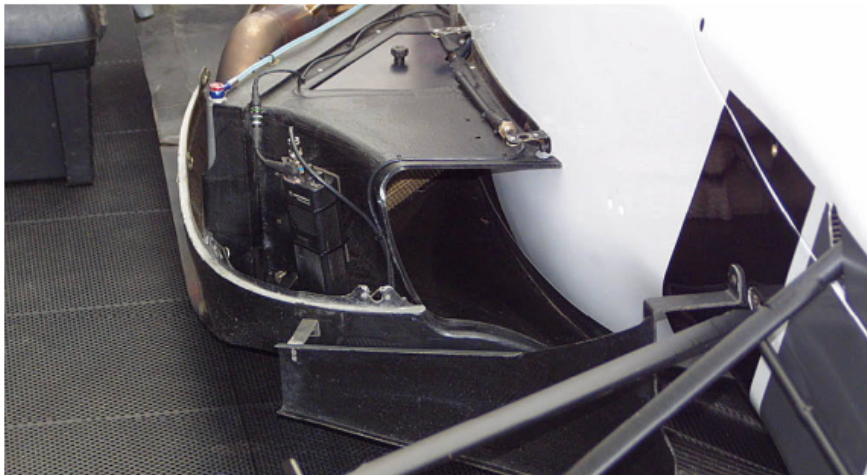
Figura 3.4: Comparação de Correlações para o Coeficiente de Arrasto de uma Esfera

3.3 Projeto dos *Sidepods*

Para o desenvolvimento do projeto, conceberam-se três modelos conceituais de *sidepod*, baseados em proposições de McBeath [2]. O Modelo 1 apresenta seção transversal retangular constante. O Modelo 2 (Figura 3.5) possui seção variável que aumenta e reduz ao longo do fluxo. O Modelo 3 (Figura 3.6) apresenta uma geometria divergente com radiador pivotado internamente.



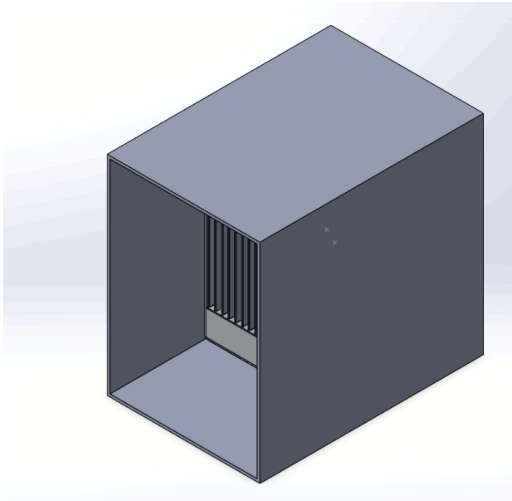
Figura 3.5: Inspiração conceito 2 ([2])



The diffuser section ahead of the Dallara F305's radiator.

Figura 3.6: Inspiração conceito 3 ([2])

As modelagens tridimensionais, realizadas em SolidWorks, são apresentadas nas Figuras 3.7 a 3.9:

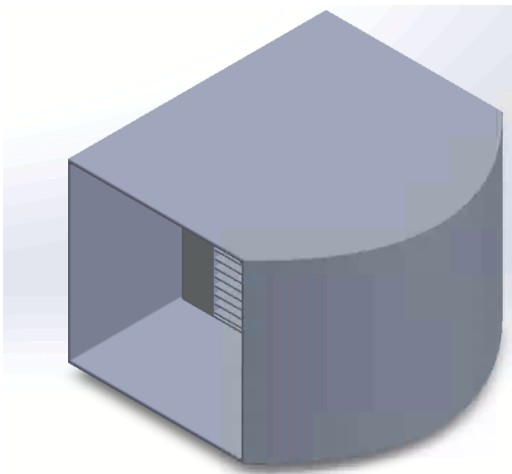


(a) Vista isométrica

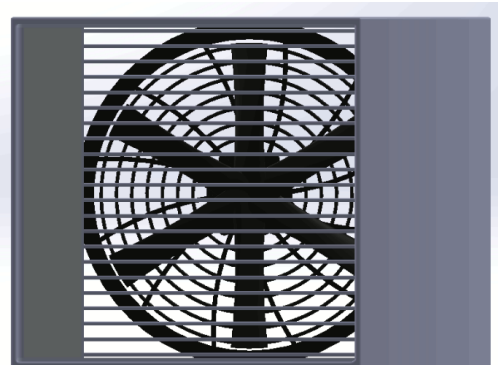


(b) Vista frontal

Figura 3.7: Modelo de *sidepod 1*.

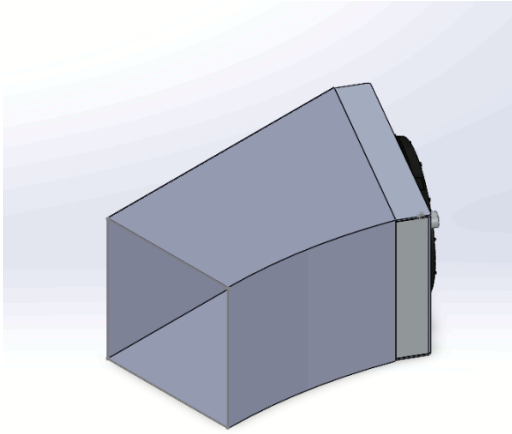


(a) Vista isométrica

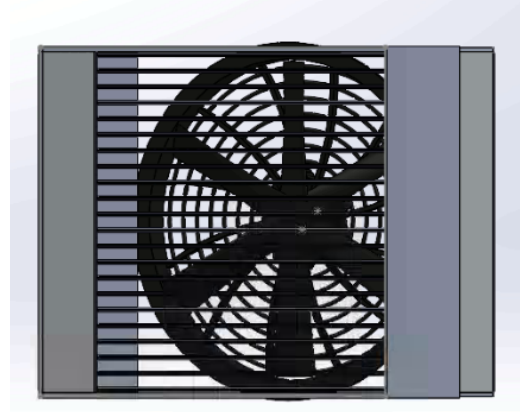


(b) Vista frontal

Figura 3.8: Modelo de *sidepod 2*.



(a) Vista isométrica



(b) Vista frontal

Figura 3.9: Modelo de *sidepod* 3.

As simulações foram configuradas com base em um estudo de escoamento turbulento ($Re = 10.000$) da Wolf Dynamics [20], utilizando o modelo de turbulência $k - \omega$ SST. Os parâmetros adotados foram:

- Velocidade de entrada: $U = (11,4; 0; 0)$ m/s (padrão utilizado pela equipe Icarus UFRJ).
- Viscosidade cinemática do ar (25°C): $\nu = 15,6 \cdot 10^{-6}$ m²/s.
- Área frontal específica de cada conceito para o cálculo de C_d .

O processo de malhagem seguiu a lógica das esferas. Devido ao fato de os *sidepods* possuírem comprimento de 400 mm e a esfera de validação possuir diâmetro de 1 m, aplicou-se um fator de escala de 0,4 a todas as dimensões do domínio, resultando em um paralelepípedo de $12 \times 8 \times 8$ m (Figura 3.10).

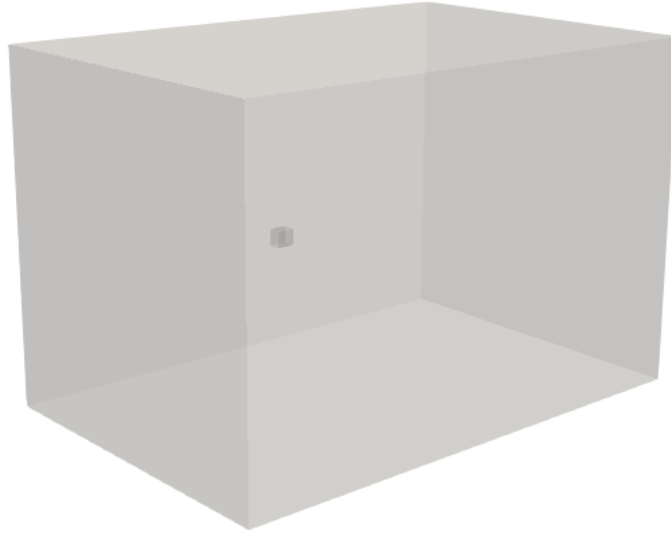


Figura 3.10: Domínio computacional para a simulação dos *sidepods*.

As estatísticas de malha para cada conceito são apresentadas na Tabela 3.3:

Tabela 3.3: Número de elementos das malhas para as simulações dos *sidepods*.

Configuração	blockMesh	N_e (pré-refinamento)	N_e (pós-refinamento)
<i>Sidepod 1</i>	(38 25 25)	23.750	750.022
<i>Sidepod 2</i>	(38 25 25)	23.750	749.621
<i>Sidepod 3</i>	(38 25 25)	23.750	749.347

As malhas são apresentadas nas figuras abaixo. A Figura 3.11 mostra a malha do primeiro *sidepod*, com um corte no plano normal à direção \vec{z} no meio do domínio. A Figura 3.12 apresenta a malha do segundo modelo de *sidepod* na mesma vista, com um *zoom* na região do *sidepod*. Por fim, a Figura 3.13 mostra a malha do terceiro modelo, com cortes nos planos normais às direções \vec{z} , no meio do domínio, e \vec{x} , no meio do *sidepod*.

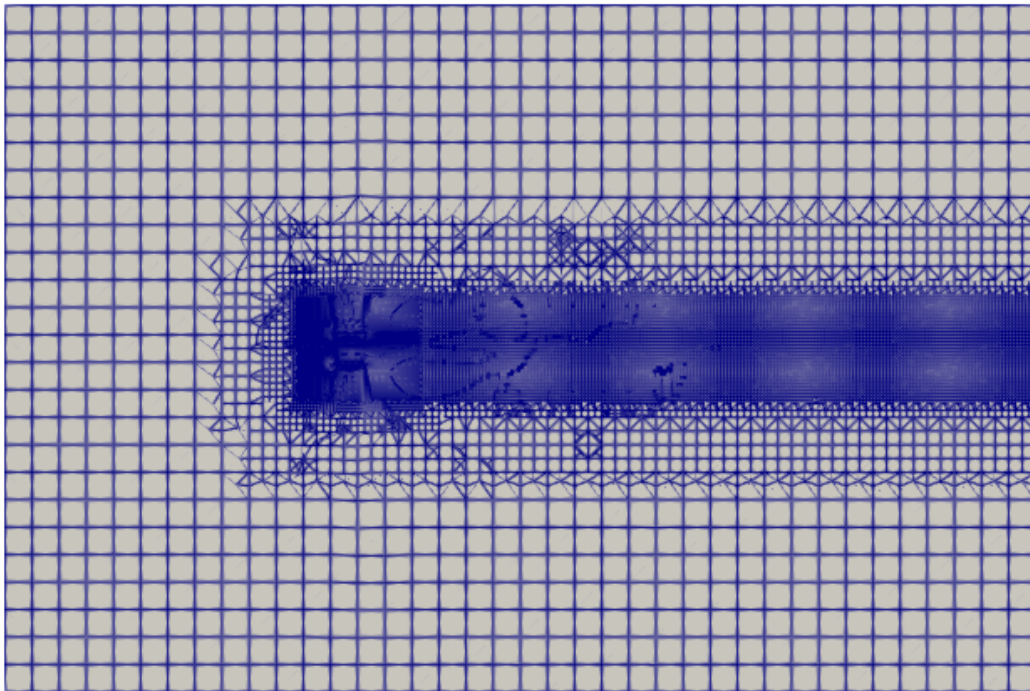


Figura 3.11: Malha do primeiro *sidepod*

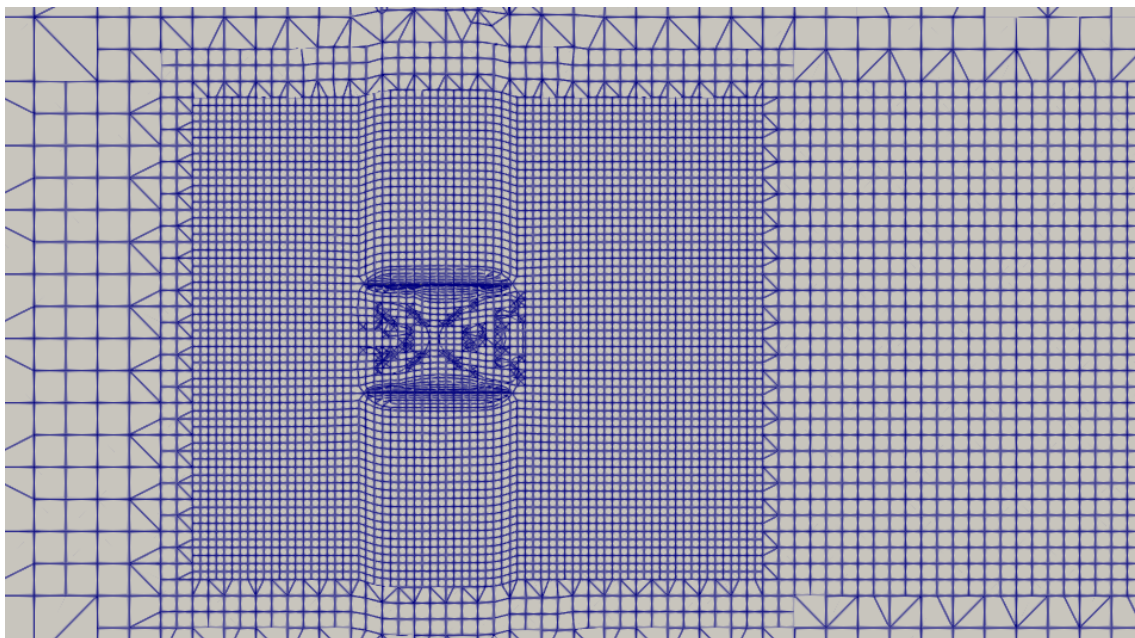


Figura 3.12: Malha do segundo *sidepod*

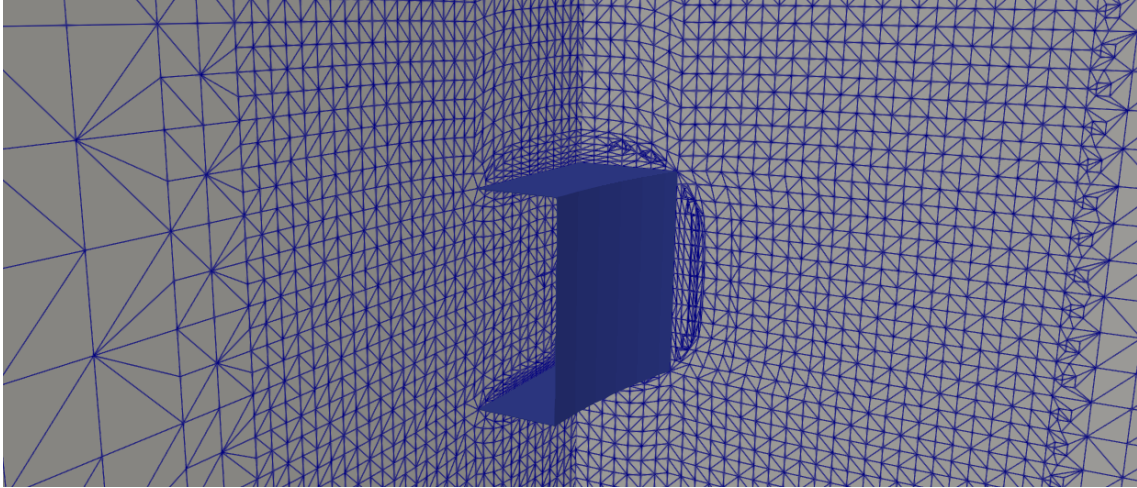


Figura 3.13: Malha do terceiro *sidepod*, zoom na localização do *sidepod*

Para a análise final, utilizou-se o produto do coeficiente de arrasto pela área ($C_d \cdot A$), visto que essa métrica correlaciona-se diretamente com a força de arrasto total exercida sobre o componente, conforme a Equação 3.9. O coeficiente de arrasto é comparado isoladamente na otimização de peças aerodinâmicas quando a área frontal é praticamente igual, mas, no caso deste trabalho, a área frontal difere significativamente entre os conceitos.

$$D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A \cdot C_d \quad (3.9)$$

Onde D é a força de arrasto, ρ a massa específica do fluido e V a velocidade relativa, A a área frontal e C_d o coeficiente de arrasto.

Espera-se um coeficiente de arrasto na ordem de 0,6, em consonância com o estudo de Sasikumar e Rajan [9].

Capítulo 4

Resultados

4.1 Estudo da Esfera

4.1.1 Resultados do Teste de Convergência de Malha

Os resultados obtidos para o coeficiente de arrasto (C_d) em função do tempo são apresentados na Figura 4.1.

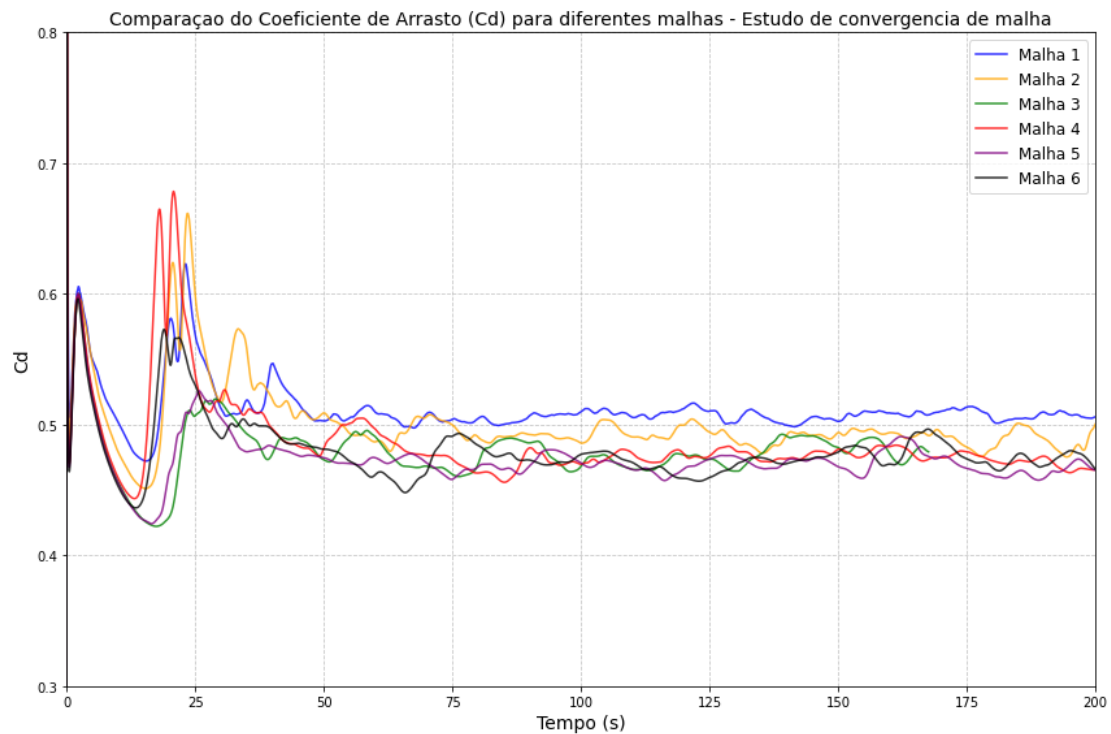


Figura 4.1: Coeficiente de arrasto (C_d) vs. tempo, $Re = 1000$: Estudo de convergência de malha.

A partir da análise de cada caso, extraíram-se os valores médios do coeficiente de arrasto após a estabilização do escoamento. Estes valores, correlacionados com o número de elementos de cada malha, são apresentados na Tabela 4.1:

Tabela 4.1: Resultados, estudo de convergência de malha

Malha	blockMesh	N_e	C_d
1	(23 15 15)	179208	0,506
2	(25 20 20)	202229	0,488
3	(38 25 25)	554956	0,48
4	(50 40 40)	649043	0,475
5	(63 50 50)	1041558	0,47
6	(75 60 60)	1495644	0,475

Observa-se uma convergência satisfatória dos resultados à medida que a densidade da malha aumenta. Além disso, os valores convergem para a faixa esperada na literatura técnica. Para $Re = 1000$, as correlações indicam que o coeficiente de arrasto deve situar-se no intervalo $0,46 \leq C_d \leq 0,485$ (ver Tabela 4.2). Com base nesse critério de precisão e custo computacional, a Malha 3 foi selecionada para as demais simulações da esfera.

4.1.2 Resultados para Diferentes Números de Reynolds

Obtiveram-se os coeficientes de arrasto para as simulações com números de Reynolds 100, 200 e 500. O comportamento temporal do C_d para esses casos é exibido nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4:

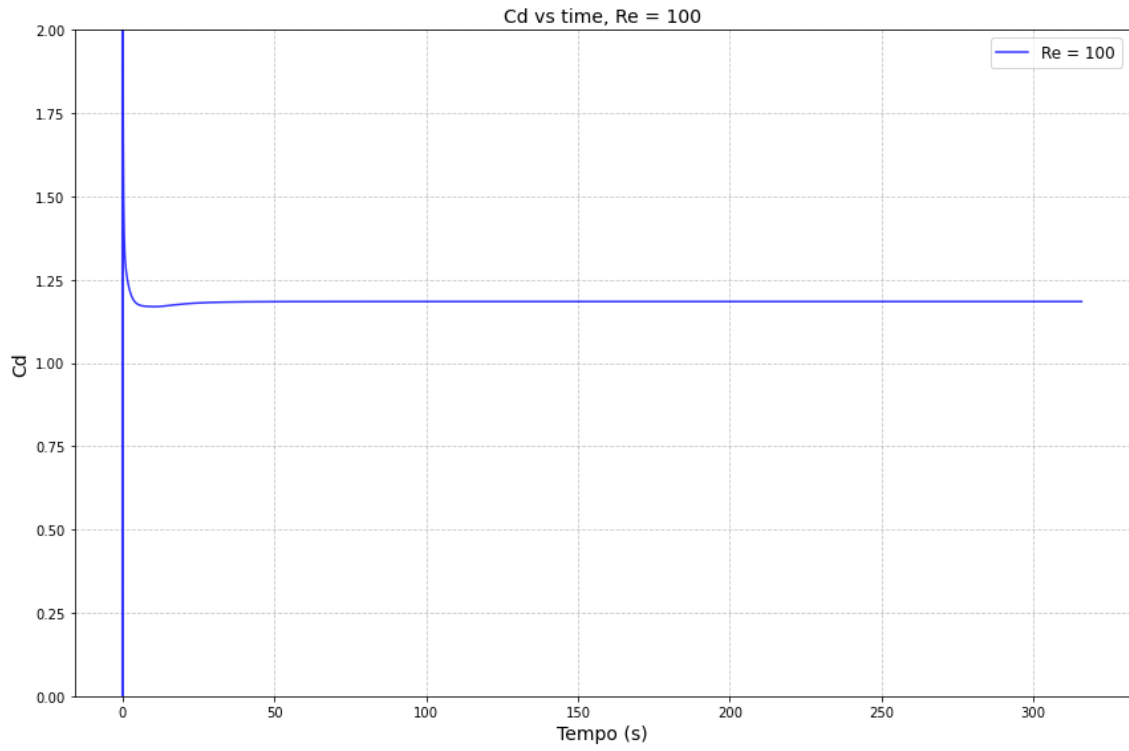


Figura 4.2: C_d vs. tempo para $Re = 100$.

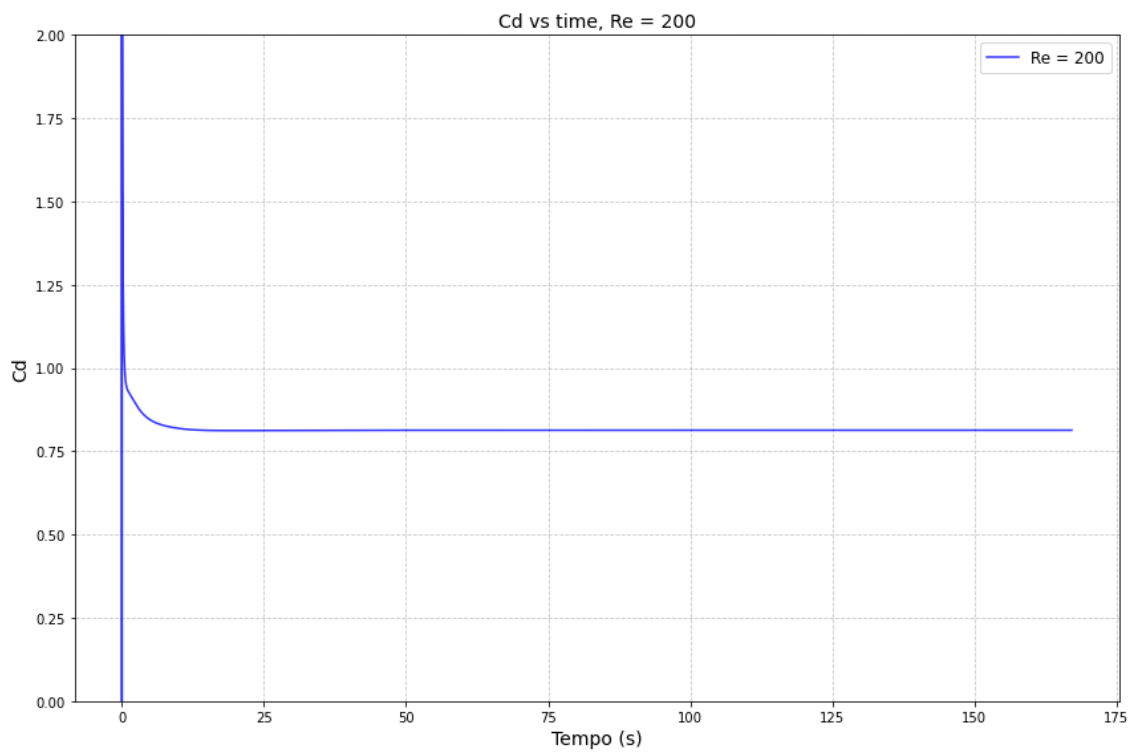


Figura 4.3: C_d vs. tempo para $Re = 200$.

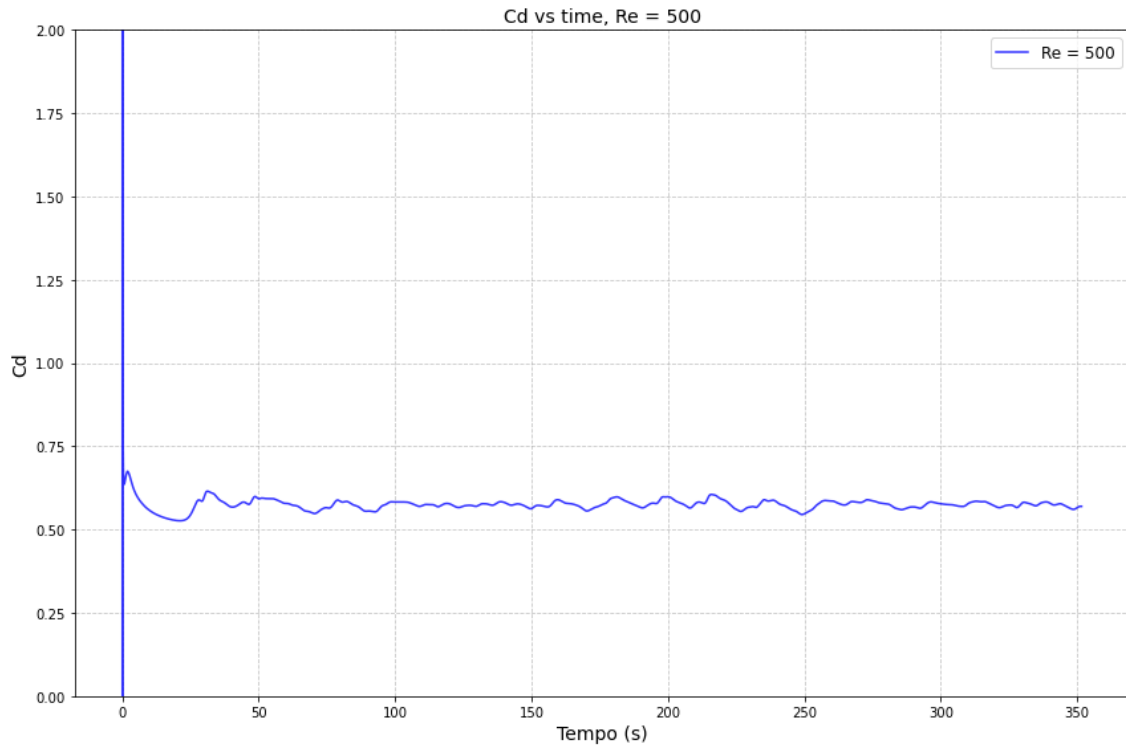


Figura 4.4: C_d vs. tempo para $Re = 500$.

Para $Re = 100$ e $Re = 200$, o coeficiente de arrasto apresenta uma convergência rápida e estável. Contudo, para $Re = 500$, observa-se uma oscilação no valor de C_d decorrente do surgimento de esteiras no escoamento a jusante da esfera. Os valores médios extraídos das simulações são comparados com as correlações da literatura na Tabela 4.2:

Tabela 4.2: Comparação entre os coeficientes de arrasto da esfera.

Re	Morrison [19], $0,1 < Re < 10^6$	Brown and Lawler [1], $Re < 2 \cdot 10^5$	Clift <i>et al.</i> [18], $20 < Re < 260$	Clift <i>et al.</i> [18], $260 < Re < 1500$	Simulação CFD	Erro relativo [min, max (%)]
100	1,038	1,073	1,087	–	1,185	[9,01; 14,16]
200	0,7676	0,7933	0,7756	–	0,813	[2,48; 5,91]
500	0,5672	0,5659	–	0,5549	0,575	[1,38; 3,62]
1000	0,4838	0,4634	–	0,4711	0,48	[0,79; 3,58]

Nota-se que a exatidão das simulações aumenta com a elevação do número de Reynolds dentro do intervalo testado, o que é um pouco contraintuitivo, uma vez que a instabilidade tende a aumentar com o número de Reynolds.

4.2 Análise dos *Sidepods*

Apresentam-se os comportamentos temporais do coeficiente de arrasto para cada conceito de *sidepod* nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7:

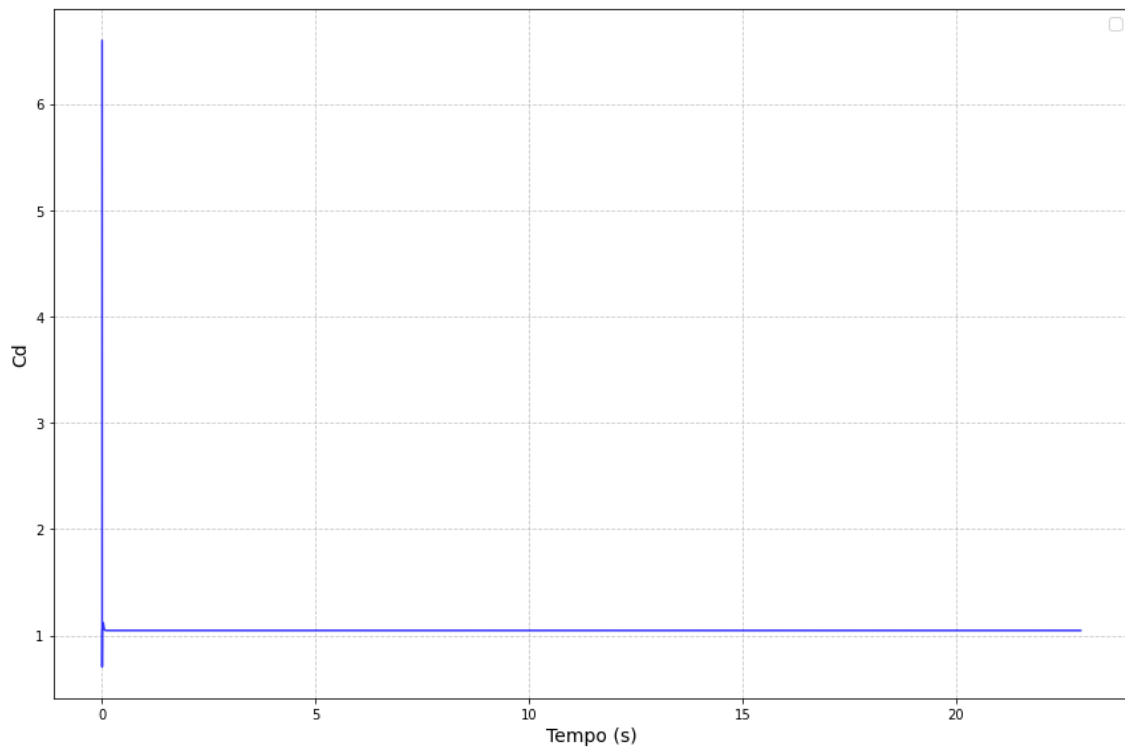


Figura 4.5: C_d vs. tempo: 1º modelo de *sidepod*.

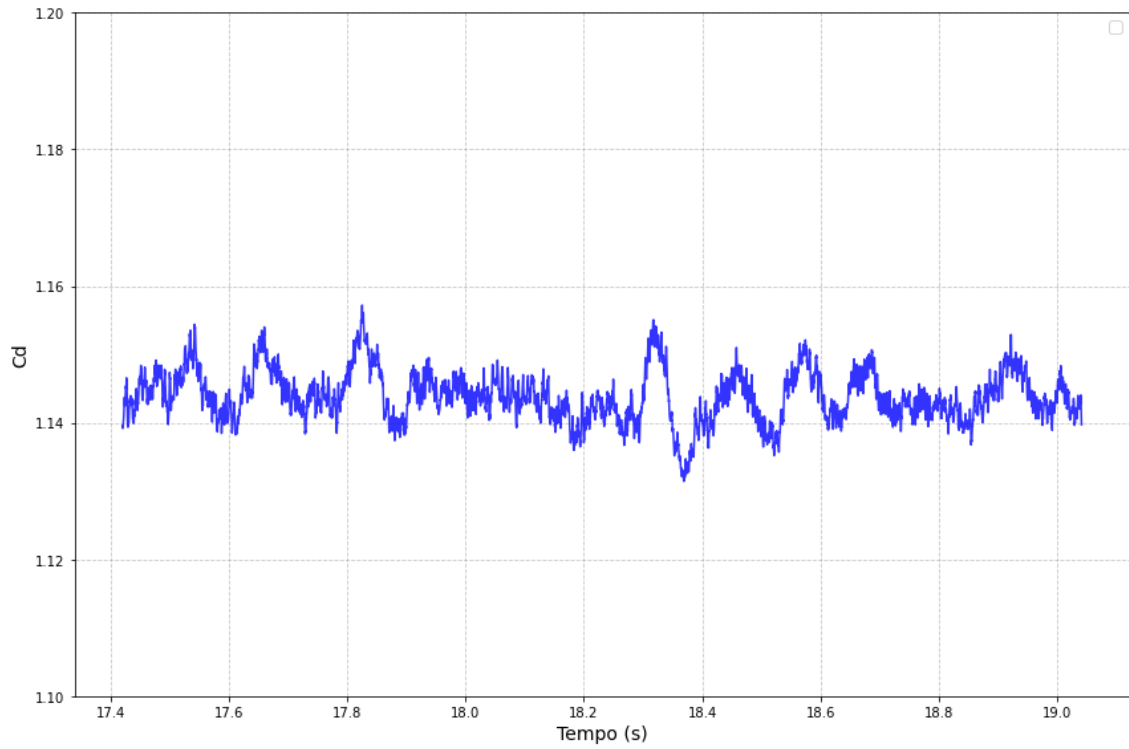


Figura 4.6: C_d vs. tempo: 2° modelo de *sidepod*.

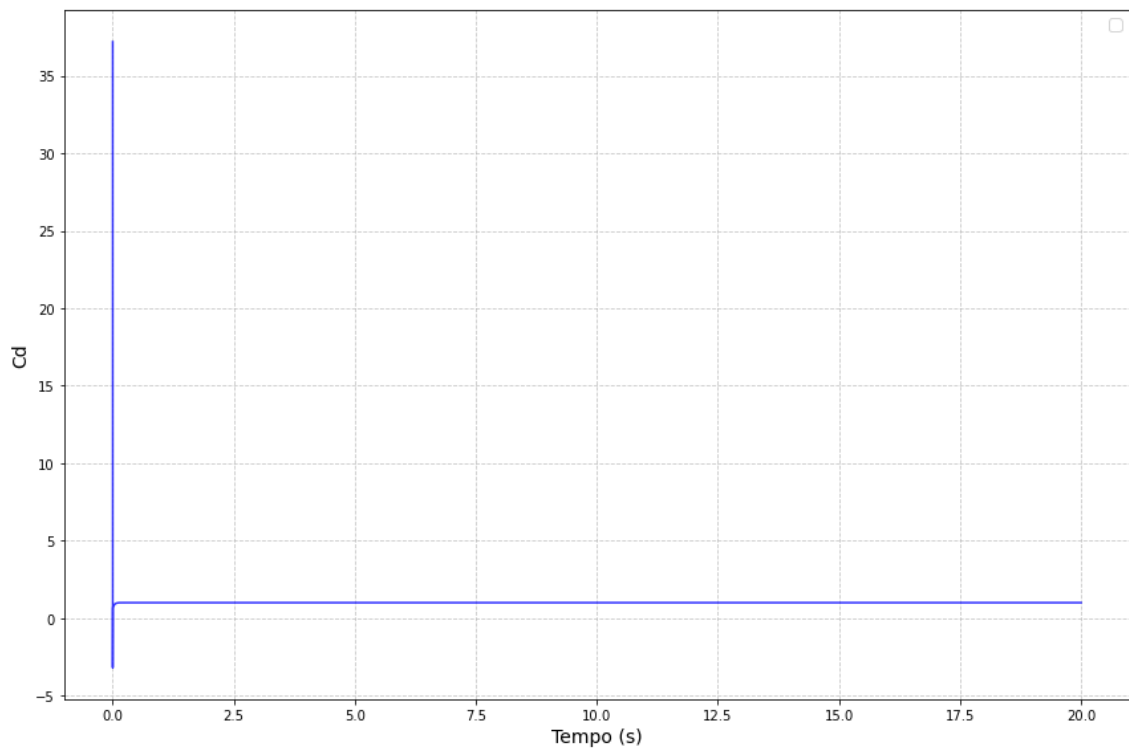


Figura 4.7: C_d vs. tempo: 3° modelo de *sidepod*.

Ressalta-se que a simulação do segundo *sidepod* apresentou uma inconsistência

inicial na definição da área frontal, o que foi corrigido durante a execução; por esse motivo, o gráfico correspondente inicia-se em $t = 17,4$ s, a partir do momento em que o erro foi corrigido.

Os valores médios de C_d foram extraídos e utilizou-se a área frontal projetada de cada geometria para calcular o produto $C_d \cdot A$. A comparação entre os três conceitos é apresentada na Tabela 4.3:

Tabela 4.3: Comparação aerodinâmica entre os conceitos de *sidepod*.

Conceito	C_d	$C_d \cdot A$ [m ²]
<i>Sidepod 1</i>	1,047	0,0066
<i>Sidepod 2</i>	1,144	0,0377
<i>Sidepod 3</i>	1,002	0,0157

Os resultados demonstram que o Modelo 3 possui o menor coeficiente de arrasto intrínseco ($C_d = 1,002$). No entanto, ao analisar a resistência ao avanço total através da métrica $C_d \cdot A$, o Modelo 1 destaca-se como o mais eficiente aerodinamicamente, gerando a menor força de arrasto devido à sua reduzida área frontal em comparação aos demais conceitos.

Capítulo 5

Conclusões

Neste trabalho, apresentou-se o desenvolvimento e a consolidação de uma metodologia voltada ao estudo aerodinâmico de *sidepods*. Por meio de testes de convergência de malha e processos de validação com geometrias simplificadas, foi possível estabelecer um ambiente de simulação confiável para a análise de escoamentos complexos em regime transiente.

A utilização da ferramenta *open-source* OpenFOAM revelou-se um desafio técnico significativo. A curva de aprendizado acentuada do *software*, somada à sensibilidade dos parâmetros numéricos de simulação, exigiu um investimento substancial de tempo em etapas de depuração e refinamento de modelos.

Embora as simulações dos *sidepods* tenham sido executadas com êxito, os resultados obtidos não permitiram uma definição conclusiva sobre a superioridade de um conceito específico. Essa limitação decorre da simplificação do modelo, que não incluiu o chassi completo nem a presença dos radiadores. Tais omissões resultam em um comportamento aerodinâmico que diverge das condições reais de operação, onde a interação entre o fluxo externo e a contrapressão do radiador desempenha um papel determinante.

Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se a modelagem do radiador através da abordagem de meio poroso no OpenFOAM e a integração da geometria do *sidepod* ao modelo completo do veículo de Fórmula SAE. Estas etapas permitirão explorar variadas configurações de posicionamento e orientação do radiador, fornecendo os dados necessários para validar o conceito aerodinâmico de forma mais realista e conclusiva, aproximando os resultados computacionais da performance

observada em pista.

Referências Bibliográficas

- [1] Phillip P. BROWN and Desmond F. LAWLER. Sphere drag and settling velocity revisited. *Journal of Environmental Engineering*, 129(3):222–231, 2003.
- [2] Simon MCBEATH. *Competition Car Aerodynamics: A Practical Handbook*. Veloce Publishing, Dorchester, 3 edition, 2015.
- [3] SAE INTERNATIONAL. *Formula SAE Rules 2026*, 2025. Versão 1.0. Disponível em: <https://www.fsaeonline.com/>. Acesso em: 22 fev. 2026.
- [4] Joseph KATZ. *Race Car Aerodynamics: Designing for Speed*. Bentley Publishers, Cambridge, MA, 2 edition, 2006.
- [5] Derek SEWARD. *Race Car Design*. Palgrave Macmillan, Londres, 2014.
- [6] Punith DODDEGOWDA, Aleksandr L. BYCHKOVSKY, and Albert R. GEORGE. Use of computational fluid dynamics for the design of formula SAE race car aerodynamics. In *SAE Technical Paper Series*, number 2006-01-0807, Detroit, Michigan, 2006.
- [7] Sneha HETAWALA, Mandar GOPHANE, B. K. AJAY, et al. Aerodynamic study of formula SAE car. *Procedia Engineering*, 97:1198–1207, 2014.
- [8] Ioannis OXYZOGLU. *Design and Development of an Aerodynamic Package for a FSAE Race Car*. Projeto de graduação (engenharia mecânica), University of Thessaly, Volos, Grécia, 2017.
- [9] Ashwin SASIKUMAR and Harish RAJAN. Effects of radiator angle and sidepod profile on aerodynamic performance of a race car. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 104(2):139–152, 2023.

- [10] C. M. DE SILVA, M. NOR AZMI, T. CHRISTIE, et al. Computational flow modelling of formula-SAE sidepods for optimum radiator heat management. *Journal of Engineering Science and Technology*, 6(1):94–108, 2011.
- [11] Barbaros ÇETIN, Kadir G. GÜLER, and Mehmet Haluk AKSEL. Computational modeling of vehicle radiators using porous medium approach. In Amirouche Belmiloudi, editor, *Heat Exchangers: Design, Experiment and Simulation*, chapter 11. InTech, Rijeka, 2017.
- [12] Haukur Elvar HAFSTEINSSON. Porous media in OpenFOAM. Dissertação (mestrado em engenharia), Chalmers University of Technology, Gotemburgo, Suécia, 2009.
- [13] Ioannis OXYZOGLU and Ioannis NERANTZIS. Weight optimization of a F1 composite front wing. In *7th Before Reality Conference*, Grécia, 2017.
- [14] W. M. KAYS and A. L. LONDON. *Compact Heat Exchangers*. Krieger Publishing Company, 3 edition, 1984.
- [15] Kuppan THULUKKANAM. *Heat Exchanger Design Handbook*. CRC Press, Boca Raton, 2 edition, 2013.
- [16] Sadik KAKAÇ, Hongtan LIU, and Anchasa PRAMUANJAROENKIJ. *Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design*. CRC Press, Boca Raton, 3 edition, 2012.
- [17] Nor Elyana AHMAD, Essam ABO-SERIE, and Adrian GAYLARD. Mesh optimization for ground vehicle aerodynamics. *CFD Letters*, 2(1):54–65, 2010.
- [18] R. CLIFT, J. R. GRACE, and M. E. WEBER. *Bubbles, Drops and Particles*. Academic Press, Nova York, 1978.
- [19] Faith A. MORRISON. Data correlation for drag coefficient for sphere. Technical report, Michigan Technological University, 2016. Disponível em: <https://pages.mtu.edu/~fmorriso/>. Acesso em: 22 fev. 2026.
- [20] WOLF DYNAMICS. Tutorial 4: Flow past a cylinder from laminar to turbulent flow, 2026. Disponível em: <https://www.wolfdynamics.com/>. Acesso em: 22 fev. 2026.