



**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA  
DE APÊNDICES AERODINÂMICOS  
EM MOTOCICLETAS ESPORTIVAS**

**LUÍS PAULO DE QUEIROZ MOREIRA**

**PROJETO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA  
DE APÊNDICES AERODINÂMICOS  
EM MOTOCICLETAS ESPORTIVAS**

**LUÍS PAULO DE QUEIROZ MOREIRA**

**Orientador: PROF. DR. BRÁULIO GUTIERREZ PIMENTA, ENM/UNB**

**PROJETO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**PUBLICAÇÃO ENM.PG - XXX/2023  
BRASÍLIA-DF, 19 DE 12 DE 2023.**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA  
DE APÊNDICES AERODINÂMICOS  
EM MOTOCICLETAS ESPORTIVAS**

**LUÍS PAULO DE QUEIROZ MOREIRA**

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO MECÂNICO.

**APROVADA POR:**

Prof. Dr. Bráulio Gutierrez Pimenta, ENM/UnB  
Orientador

Prof. Dr. Roberto Francisco Bobenrieth Miserda, ENM/UnB  
Examinador interno

Prof. Dr. Adriano Possebon Rosa, ENM/UnB  
Examinador interno

**BRASÍLIA, 19 DE 12 DE 2023.**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

LUÍS PAULO DE QUEIROZ MOREIRA

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DE APÊNDICES AERODINÂMICOS EM MOTOCICLETAS ESPORTIVAS**

**2023xv, 136p., 201x297 mm**

(ENM/FT/UnB, Engenheiro Mecânico, Engenharia Mecânica, 2023)

Projeto de Graduação - Universidade de Brasília

Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Mecânica

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

LUÍS PAULO DE QUEIROZ MOREIRA (2023) SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DE APÊNDICES AERODINÂMICOS EM MOTOCICLETAS ESPORTIVAS. Projeto de Graduação em Engenharia Mecânica, Publicação xxx/2023, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 136p.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

AUTOR: LUÍS PAULO DE QUEIROZ MOREIRA

TÍTULO: SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DE APÊNDICES AERODINÂMICOS EM MOTOCICLETAS ESPORTIVAS.

GRAU: Engenheiro Mecânico ANO: 2023

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste projeto de graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor se reserva a outros direitos de publicação e nenhuma parte deste projeto de graduação pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

LUÍS PAULO DE QUEIROZ MOREIRA

190016876@aluno.unb.br



# Agradecimentos

Agradeço a todos que me apoiaram em minha jornada até este ponto. Não me sinto confortável nomeando pessoas individualmente em meio público; porém, todos aqueles que acreditam pertencer a esse grupo de fato pertencem. Sua influência provavelmente foi maior do que você imagina. Eu não estaria aqui sem cada um de vocês.

Agradeço também a você, que está lendo este documento agora. Sou grato pela atenção, e espero que a leitura lhe desperte algum tipo de interesse ou lhe agregue novos conhecimentos.

# Resumo

No âmbito do motosport, CFD tem ganhado relevância como ferramenta para análise aerodinâmica de modelos de motocicleta, servindo como uma alternativa mais rápida, simples e barata à realização de testes experimentais em protótipos. O presente trabalho aborda uma rotina de simulação utilizando o pacote de *software* OpenFOAM, objetivando custo computacional relativamente reduzido. É apresentada a teoria relevante ao escoamento estudado e os mecanismos computacionais utilizados, bem como algumas características específicas do OpenFOAM. Configurações de malha são ajustadas de modo a se obter malhas de camada de contorno delgadas, de modo a propriamente simular fenômenos de camada limite. São simuladas diferentes situações e modelos de motocicleta de modo a destacar o efeito do apêndice de asas no comportamento aerodinâmico do escoamento. São obtidos assim os coeficientes aerodinâmicos, bem como parâmetros computacionais como tamanho da malha gerada e tempo de simulação. Os resultados obtidos são comparados ao comportamento teórico esperado, bem como a outros trabalhos realizados sobre o mesmo tema. No pós-processamento, é utilizado o *software* Paraview é utilizado em conjunto com pequenos *scripts* em Python. Simulações com duas motos são realizadas para analisar o efeito da moto dianteira no escoamento em torno da moto traseira. São encontrados efeitos majoritariamente benéficos em contexto de corrida para casos em que a moto traseira não possui asa, mas são encontradas oscilações na sustentação e força lateral para o caso de moto traseira com asa que podem representar riscos de segurança que devem ser estudados em maior detalhe.

**Palavras-chave:** CFD, OpenFOAM, RANS, Aerodinâmica, Motociclismo

# Abstract

In motorsport, CFD has been gaining traction as a tool for aerodynamic analysis of motorbike models, being a faster, simpler and cheaper alternative compared to the experimental testing of prototypes. The current work establishes a simulation workflow using the OpenFOAM software package, aiming for relatively small computational cost. Theory regarding the studied flow and the computational mechanisms used is shown, including a few characteristics specific to OpenFOAM. Meshing settings are adjusted to obtain a thin contour layer mesh, in the interest of properly simulating boundary layer phenomena. Different situations and motorbike models are simulated, highlighting the effect of wings on the aerodynamic behavior of the surrounding flow. This way, the aerodynamic coefficients are determined, along with computational parameters such as mesh size and simulation time. Obtained results are then compared to the expected flow behavior, as well as other works pertaining to the same theme. For post-processing, the software Paraview is used in conjunction with small Python scripts. To determine the effect of a frontal bike on the flow of a rear bike, two-bike simulations are run. Results show mostly positive effects in a race environment if the rear bike sports no wing, but fluctuations found in lift and side force for winged bikes may present safety hazards that ought to be studied in more detail.

**Keywords:** CFD, OpenFOAM, RANS, Aerodynamics, Motorcycling

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	MOTIVAÇÃO	1
1.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
1.3	OBJETIVOS	6
1.4	ESTRUTURA	7
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>8</b>
2.1	MODELAGEM FÍSICA DA SITUAÇÃO	8
2.2	EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO	10
2.2.1	TEOREMA DE TRANSPORTE DE REYNOLDS	10
2.2.2	EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE	11
2.2.3	EQUAÇÃO DE BALANÇO DE MOMENTUM	12
2.2.4	EQUAÇÃO DA ENERGIA	14
2.3	A CAMADA LIMITE	15
2.3.1	DEFINIÇÃO	15
2.3.2	ESCOAMENTO AO REDOR DE CORPOS ROMBUDOS	17
2.4	FORÇAS AERODINÂMICAS	18
2.5	VÓRTICE DE PONTA DE ASA	20
<b>3</b>	<b>ASPECTOS COMPUTACIONAIS</b>	<b>24</b>
3.1	ROTINA GERAL DE CFD	24
3.2	O MÉTODO DE VOLUMES FINITOS	25
3.2.1	OS DIFERENTES MÉTODOS DE DISCRETIZAÇÃO	25
3.2.2	DISCRETIZAÇÃO GEOMÉTRICA NO FVM	27
3.2.3	DISCRETIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES NO FVM	28
3.3	SIMULAÇÃO DE TURBULÊNCIA E O MODELO RANS	29
3.3.1	MÉTODOS DE SIMULAÇÃO DE TURBULÊNCIA	29
3.3.2	DESCRIÇÃO GERAL DO MÉTODO RANS	30
3.3.3	MODELOS DE TURBULÊNCIA	32
3.3.4	O MODELO $k-\omega$ -SST	33
3.4	OPENFOAM	34
3.5	CRIAÇÃO DA MALHA	36
3.6	CONFIGURAÇÕES DE SIMULAÇÃO	41

3.7	PÓS-PROCESSAMENTO .....	43
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>44</b>
4.1	MOTO ISOLADA .....	44
4.1.1	MALHA GERADA .....	44
4.1.2	ESTUDO DO PARTICIONAMENTO.....	45
4.1.3	RESULTADOS DE SIMULAÇÃO .....	46
4.2	SITUAÇÃO DE ULTRAPASSAGEM - DUAS MOTOS SEM ASA.....	54
4.2.1	MALHA GERADA E TEMPO DE SIMULAÇÃO .....	56
4.2.2	ANÁLISE DOS COEFICIENTES - VARIAÇÃO LONGITUDINAL .....	58
4.2.3	ANÁLISE DOS COEFICIENTES - VARIAÇÃO LATERAL .....	62
4.3	SITUAÇÃO DE ULTRAPASSAGEM - MOTO FRONTAL COM ASA, MOTO TRASEIRA SEM ASA .....	68
4.3.1	MALHA GERADA E TEMPO DE SIMULAÇÃO .....	69
4.3.2	ANÁLISE DOS COEFICIENTES - VARIAÇÃO LONGITUDINAL .....	69
4.3.3	ANÁLISE DOS COEFICIENTES - VARIAÇÃO LATERAL .....	78
4.4	SITUAÇÃO DE ULTRAPASSAGEM - DUAS MOTOS COM ASA .....	87
4.4.1	MALHA GERADA E TEMPO DE SIMULAÇÃO .....	87
4.4.2	ANÁLISE DOS COEFICIENTES - VARIAÇÃO LONGITUDINAL .....	87
4.4.3	ANÁLISE DOS COEFICIENTES - VARIAÇÃO LATERAL .....	94
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>101</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>103</b>

# LISTA DE FIGURAS

1.1	Miguel Oliveira em corrida da MotoGP [MotoGP™2023] .....	2
1.2	Primeiro ensaio industrial de túnel de vento em motocicleta [Explorador 2021]	2
1.3	Exemplo de simulação CFD do escoamento em torno de motocicletas esportivas [Gonçalves 2023] .....	3
1.4	Distribuição de pressão e esteira aerodinâmica para uma moto com asa, sem ângulo de inclinação [Gonçalves 2023] .....	4
1.5	Coefficientes aerodinâmicos obtidos com cada modelo de turbulência [Wiński and Piechna 2022] .....	4
1.6	Coefficientes aerodinâmicos obtidos com cada modelo de turbulência [Blocken et al. 2020] .....	5
1.7	Campo de pressão no entorno da motocicleta, representação do plano xy e do plano xz [Blocken et al. 2020] .....	6
2.1	Respresentação gráfica de escoamento (a) laminar e (b) turbulento [Frömmig 2023] .....	9
2.2	Relação entre o perfil de velocidades e a camada limite [Çengel and Cimbala 2012] .....	15
2.3	Relação qualitativa do tamanho de camada limite para um escoamento de (a) $Re=10$ e (b) $Re=10^7$ [White 2011] .....	16
2.4	Variação da velocidade adimensional ao longo da camada limite [Freire 1990]	17
2.5	Descolamento de camada limite (a) laminar e (b) turbulenta no escoamento em torno de uma esfera lisa [Çengel and Cimbala 2012] .....	18
2.6	Respresentação da pressão e das tensões viscosas ao longo de um corpo [Çengel and Cimbala 2012] .....	18
2.7	Respresentação da força de um escoamento sobre um corpo e de sua decomposição em componentes [John D. Anderson 2010] .....	19
2.8	Dimensões geométricas de uma asa [White 2011] .....	21
2.9	Ilustração do processo de formação do vórtice de ponta de asa [Frömmig 2023]	22
2.10	Relação entre o <i>downwash</i> ( $w$ ) e o arrasto induzido ( $D_v$ ) [Houghton et al. 2016]	22
2.11	Efeito de <i>end plates</i> na redução dos vórtices de ponta de asa [Frömmig 2023].	23
3.1	Relação entre flexibilidade e precisão dos métodos de discretização apresentados [Ghaib 2022] .....	26

3.2	Exemplos de escolha para posicionamento dos nós [Versteeg and Malalasekra 2007] .....	27
3.3	Representação da conectividade de um elemento [Moukalled et al. 2015].....	28
3.4	Representação da conectividade de (a) uma face e (b) um vértice [Moukalled et al. 2015].....	28
3.5	Relação entre custo computacional e precisão dos modelos apresentados [Ghaib 2022].....	31
3.6	Relação entre uma variável $\phi$ , sua média temporal e sua flutuação transiente [Ghaib 2022].....	32
3.7	Ilustração da organização dos arquivos em uma pasta de simulação Open-FOAM [OpenCFD 2022] .....	35
3.8	Ilustração e dimensões da malha do BlockMesh, visualizada no Paraview: (a) Volume de controle completo (b) Elemento único .....	37
3.9	Visualização no Paraview do modelo CAD da motocicleta sem asa usado para gerar a malha .....	38
3.10	Visualização das etapas do CastellatedMesh: (a) Refino na superfície (b) Remoção de elementos (c) Refino em região delimitada [OpenCFD 2022] .....	38
3.11	Regiões de refino utilizadas, com dimensões ilustradas em metros, visualizadas no Paraview - vista lateral .....	38
3.12	Regiões de refino utilizadas, com dimensões ilustradas em metros, visualizadas no Paraview - vista frontal .....	39
3.13	Corte transversal de uma malha gerada após a etapa Snap, visualizada no Paraview .....	39
3.14	Corte transversal de uma malha gerada após a etapa addLayers, visualizada no Paraview .....	40
3.15	Malha gerada para caso de duas motos com asa, com distância entre motos (a) longitudinal de 700cm (b) lateral de 60cm.....	41
3.16	Visualização no Paraview das condições de contorno na superfície para a velocidade do escoamento no eixo x.....	42
3.17	Interface de usuário do Paraview .....	43
4.1	Dados obtidos no estudo de independência de malha, apresentados em diferentes escalas .....	45
4.2	Gráfico ilustrando o tempo de simulação para os diferentes tipos de posicionamento. ....	46
4.3	Gráficos de convergência para a moto sem asa - (a) $C_D$ (b) $C_L$ (c) $C_M$ .....	47
4.4	Gráficos de convergência para a moto com asa - (a) $C_D$ (b) $C_L$ (c) $C_M$ .....	48
4.5	Posições do motociclista adotadas por [Wiński and Piechna 2022]; aerodinâmica à esquerda e levantada à direita .....	49
4.6	Valores de $yPlus$ calculados sobre a superfície da moto sem asa - vista isométrica frontal.....	51

4.7	Valores de $y_{Plus}$ calculados sobre a superfície da moto sem asa - vista lateral .	51
4.8	Distribuição de pressão no caso com asa - vista isométrica frontal .....	52
4.9	Distribuição de pressão no caso com asa - vista traseira .....	52
4.10	Distribuição de pressão nos arredores no caso com asa .....	53
4.11	Distribuição de pressão e esteira aerodinâmica para uma moto com asa, sem ângulo de inclinação [Gonçalves 2023] .....	53
4.12	Ilustração da esteira de vórtices por linhas de corrente para o caso sem asa - vista lateral .....	54
4.13	Ilustração da esteira de vórtices por linhas de corrente para o caso sem asa - vista superior .....	54
4.14	Visualização dos vórtices de ponta de asa em vista de rabeira .....	55
4.15	Visualização dos vórtices de ponta de asa em vista isométrica.....	55
4.16	Gráficos de convergência para a distância longitudinal de 50cm - (a) $C_D$ (b) $C_L$ (c) $C_M$ - Situação de duas motos sem asa .....	58
4.17	Gráficos de convergência para a distância lateral de 25cm - (a) $C_D$ (b) $C_L$ (c) $C_M$ (d) $C_S$ - Situação duas motos sem asa .....	59
4.18	Variação do $C_D$ com distância longitudinal - Situação de duas motos sem asa .	60
4.19	Campo de velocidades no plano xz para uma distância longitudinal entre motos de (a) 5cm (b) 50cm (c) 250cm (d) 700cm - Situação de duas motos sem asa.....	61
4.20	Campo de pressão na superfície para uma distância longitudinal entre motos de (a) 5cm (b) 50cm (c) 250cm (d) 700cm - Situação de duas motos sem asa ..	61
4.21	Variação do $C_L$ com distância longitudinal - Situação de duas motos sem asa..	62
4.22	Variação do $C_M$ com distância longitudinal - Situação de duas motos sem asa.	63
4.23	Variação do $C_D$ com distância lateral - Situação de duas motos sem asa.....	65
4.24	Campo de pressão na superfície das motos para distância lateral de (a) 10cm (b) 25cm (c) 35cm - Situação de duas motos sem asa .....	65
4.25	Variação do $C_L$ com distância lateral - Situação de duas motos sem asa .....	66
4.26	Variação do $C_M$ com distância lateral - Situação de duas motos sem asa .....	66
4.27	Variação do $C_S$ com distância lateral - Situação de duas motos sem asa .....	67
4.28	Linhas de corrente indicando a velocidade do escoamento que passa pelos braços do motociclista da moto traseira para uma distância lateral de (a) 10cm (b) 25cm - Situação de duas motos sem asa .....	68
4.29	Variação do $C_R$ com distância lateral - Situação de duas motos sem asa.....	68
4.30	Gráficos de convergência para a distância longitudinal de 125cm - (a) $C_D$ (b) $C_L$ (c) $C_M$ - Situação de moto frontal com asa e moto traseira sem asa .....	71
4.31	Gráficos de convergência para a distância lateral de 20cm - (a) $C_D$ (b) $C_L$ (c) $C_M$ (d) $C_S$ - Situação de moto frontal com asa e moto traseira sem asa .....	72
4.32	Variação do $C_D$ com distância longitudinal - Situação de moto frontal com asa e moto traseira sem asa.....	73



4.33	Diferença relativa no $C_D$ obtida entre as situações de moto frontal com e sem asa, para moto traseira sem asa - Variação longitudinal.....	74
4.34	Campo de velocidades no plano xz para uma distância longitudinal entre motos de (a) 5cm (b) 50cm (c) 250cm (d) 700cm - Situação de moto frontal com asa e moto traseira sem asa .....	74
4.35	Campo de pressão na superfície para uma distância longitudinal entre motos de (a) 5cm (b) 50cm (c) 250cm (d) 700cm - Situação de moto frontal com asa e moto traseira sem asa.....	75
4.36	Variação do $C_L$ com distância longitudinal - Situação de moto frontal com asa e moto traseira sem asa.....	75
4.37	Diferença relativa no $C_L$ obtida entre as situações de moto frontal com e sem asa, para moto traseira sem asa - Variação longitudinal.....	76
4.38	Variação do $C_M$ com distância longitudinal - Situação de moto frontal com asa e moto traseira sem asa.....	76
4.39	Diferença relativa no $C_M$ obtida entre as situações de moto frontal com e sem asa, para moto traseira sem asa - Variação longitudinal.....	77
4.40	Campo de velocidades no plano xz para uma distância longitudinal entre motos de 700cm (a) Situação de duas motos sem asa (b) Situação de moto frontal com asa e moto traseira sem asa.....	77
4.41	Variação do $C_D$ com distância lateral - Situação de moto frontal com asa e moto traseira sem asa.....	78
4.42	Diferença relativa no $C_D$ obtida entre as situações de moto frontal com e sem asa, para moto traseira sem asa - Variação lateral .....	80
4.43	Variação do $C_L$ com distância lateral - Situação de moto frontal com asa e moto traseira sem asa.....	80
4.44	Campo de pressão na superfície e vórtice de ponta de asa para uma distância lateral entre motos de (a, b) 10cm (c, d) 22,5cm (e, f) 35cm (g, h) 60cm - Situação de moto frontal com asa e moto traseira sem asa .....	81
4.45	Diferença relativa no $C_L$ obtida entre as situações de moto frontal com e sem asa, para moto traseira sem asa - Variação lateral .....	82
4.46	Variação do $C_M$ com distância lateral - Situação de moto frontal com asa e moto traseira sem asa.....	82
4.47	Diferença relativa no $C_M$ obtida entre as situações de moto frontal com e sem asa, para moto traseira sem asa - Variação lateral .....	83
4.48	Variação do $C_S$ com distância lateral - Situação de moto frontal com asa e moto traseira sem asa.....	84
4.49	Diferença relativa no $C_S$ obtida entre as situações de moto frontal com e sem asa, para moto traseira sem asa - Variação lateral .....	85
4.50	Variação do $C_R$ com distância lateral - Situação de moto frontal com asa e moto traseira sem asa.....	85

4.51	Gráficos de convergência para a distância longitudinal de 75cm - (a) $C_D$ (b) $C_L$ (c) $C_M$ - Situação de duas motos com asa.....	89
4.52	Gráficos de convergência para a distância lateral de 15cm - (a) $C_D$ (b) $C_L$ (c) $C_M$ (d) $C_S$ - Situação de duas motos com asa.....	90
4.53	Variação do $C_D$ com distância longitudinal - Situação de duas motos com asa.	91
4.54	Campo de velocidades no plano xz para uma distância longitudinal entre motos de (a) 5cm (b) 50cm (c) 250cm (d) 700cm - Situação de duas motos com asa .....	92
4.55	Campo de pressão na superfície para uma distância longitudinal entre motos de (a) 5cm (b) 50cm (c) 250cm (d) 700cm - Situação de duas motos com asa..	92
4.56	Variação do $C_L$ com distância longitudinal - Situação de duas motos com asa .	93
4.57	Campo de velocidades no plano xz e posição -25cm em y para uma distância longitudinal entre motos de (a) 75cm (b) 175cm (c) 300cm - Situação de duas motos com asa.....	93
4.58	Variação do $C_M$ com distância longitudinal - Situação de duas motos com asa	94
4.59	Variação do $C_D$ com distância lateral - Situação de duas motos com asa .....	96
4.60	Variação do $C_L$ com distância lateral - Situação de duas motos com asa.....	96
4.61	Campo de pressão na superfície e vórtice de ponta de asa para uma distância lateral entre motos de (a, b) 10cm (c, d) 22,5cm (e, f) 35cm (g, h) 60cm - Situação de duas motos com asa.....	97
4.62	Variação do $C_M$ com distância lateral - Situação de duas motos com asa .....	98
4.63	Variação do $C_S$ com distância lateral - Situação de duas motos com asa.....	99
4.64	Vórtices de ponta de asa gerados pela moto traseira para uma distância lateral entre motos de (a) 10cm (b) 35cm - Situação de duas motos com asa.....	99
4.65	Variação do $C_R$ com distância lateral - Situação de duas motos com asa.....	100

# LISTA DE TABELAS

3.1	Valores relevantes à simulação .....	42
4.1	Características da malha gerada para cada caso de simulação.....	44
4.2	Tempo de simulação por caso .....	46
4.3	Coefficientes aerodinâmicos calculados .....	48
4.4	Coefficientes aerodinâmicos calculados - Comparação com valores de [Gonçalves 2023].....	49
4.5	Coefficientes aerodinâmicos tridimensionais calculados .....	50
4.6	Características da malha gerada para cada caso de simulação - Situação de duas motos sem asa .....	57
4.7	Coefficientes obtidos para cada caso de simulação de variação longitudinal - Situação de duas motos sem asa .....	60
4.8	Coefficientes obtidos para cada caso de simulação de variação lateral - Situação de duas motos sem asa .....	64
4.9	Características da malha gerada para cada caso de simulação - Situação de moto frontal com asa e moto traseira sem asa .....	70
4.10	Coefficientes obtidos para cada caso de simulação de variação longitudinal - Situação de moto frontal com asa e moto traseira sem asa .....	73
4.11	Coefficientes obtidos para cada caso de simulação - Distância lateral entre duas motos sem asa .....	79
4.12	Características da malha gerada para cada caso de simulação.....	88
4.13	Coefficientes obtidos para cada caso de simulação - Distância longitudinal entre duas motos sem asa.....	91
4.14	Coefficientes obtidos para cada caso de simulação - Distância lateral entre duas motos sem asa .....	95

# Capítulo 1

## Introdução

Todo trabalho requer uma razão para ser realizado, uma metodologia para torná-lo realidade e uma conclusão a ser almejada. Essas informações são apresentadas em detalhe neste capítulo inicial, servindo portanto como ponto de partida para o restante do relatório.

### 1.1 Motivação

O MotoGP é a principal categoria do Campeonato Mundial de Motovelocidade, competição de motocicletas mais antiga e bem estabelecida no mundo. Nela, as motocicletas utilizadas são construídas exclusivamente para a competição, e devem atender a uma série de regulamentos; desse modo, a construção de uma moto de elevada *performance* se mostra tão crucial para obter sucesso no esporte quanto as habilidades do piloto.

Nesse contexto, mostra-se vantajoso a obtenção de uma forma com aerodinâmica apropriada para maximizar a competitividade das motocicletas, visto que o perfil aerodinâmico da geometria irá afetar a aderência dos pneus ao solo, fator de grande importância para boa *performance*. Porém, a obtenção de uma solução analítica para esse tipo de escoamento é inviável. Corpos com geometrias complexas normalmente requerem dados experimentais sobre as forças e momentos causados pelo escoamento [White 2011]. A prática mais comum para obtenção de valores experimentais das forças aerodinâmica é o uso de túneis de vento, como o ilustrado na figura 1.2.

Isso se consolida em um obstáculo ao desenvolvimento do esporte. As equipes de competição requerem tanto acesso a um túnel de vento quanto os meios de produzir protótipos para serem testados. O resultado é perda de tempo e dinheiro por parte das equipes para cada teste realizado, limitando as possibilidades de inovações e melhorias dos aspectos aerodinâmicos das motocicletas.

O uso de CFD, sigla que significa *Computational Fluid Dynamics*, surge como solução para o problema apresentado. Usando apenas um modelo 3d virtual do protótipo e recursos computacionais, é possível obter uma estimativa preliminar do comportamento aerodinâmico



Figura 1.1: Miguel Oliveira em corrida da MotoGP [MotoGP™2023]

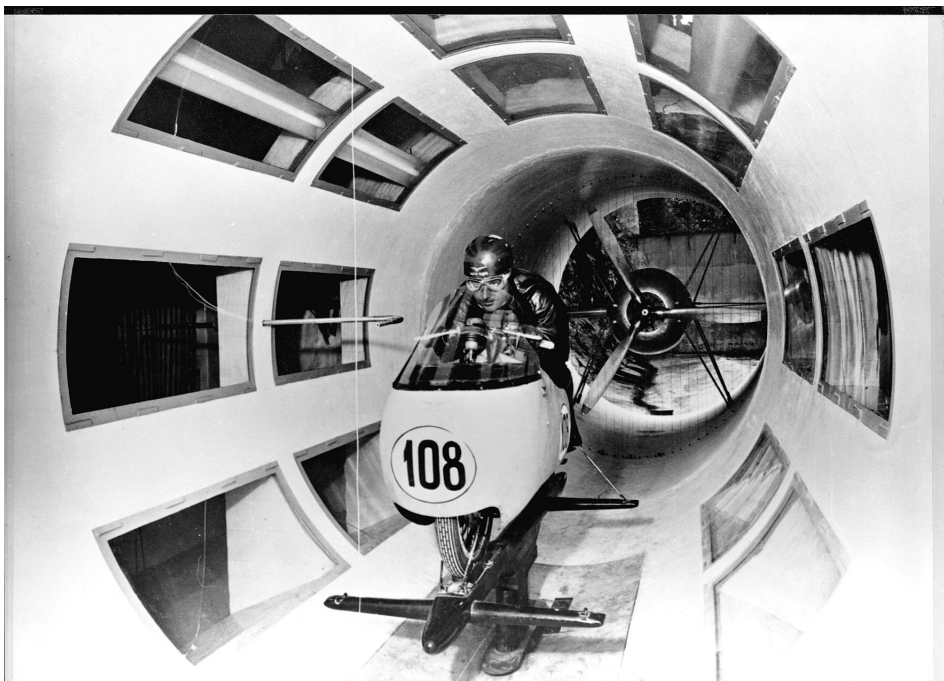


Figura 1.2: Primeiro ensaio industrial de túnel de vento em motocicleta [Explorador 2021]

de um protótipo, dispensando a construção de um protótipo físico e o uso de um ambiente de testes especializado. Assim, são economizados recursos financeiros, além de ser possível testar mais geometrias em um mesmo período de tempo, encorajando assim o desenvolvimento do esporte. Este trabalho almeja somar-se à literatura sobre o uso de pacotes de simulação no contexto do motosport, apresentando uma metodologia para realização desse procedimento.

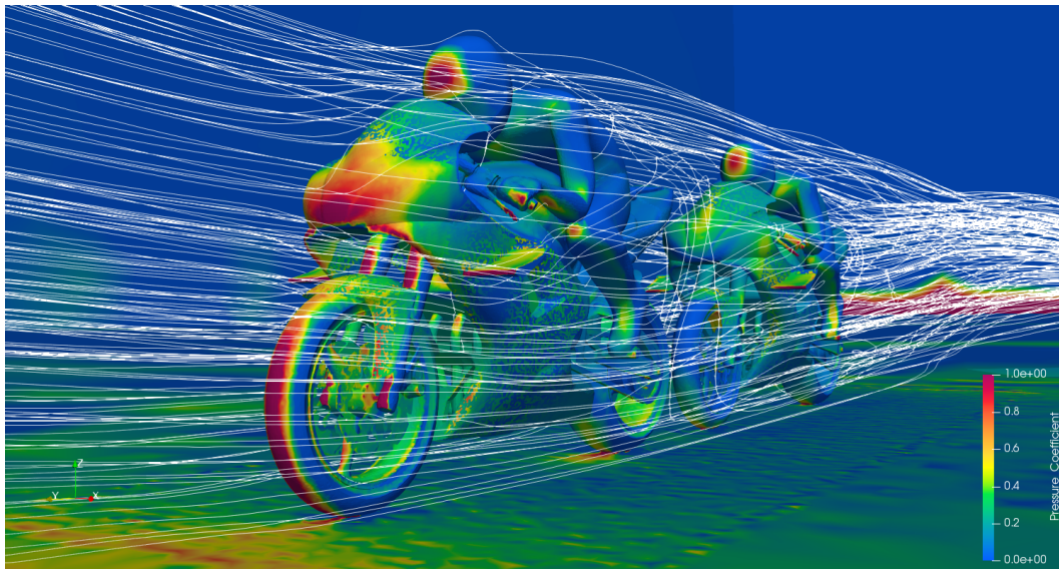


Figura 1.3: Exemplo de simulação CFD do escoamento em torno de motocicletas esportivas [Gonçalves 2023]

Vale notar que otimização aerodinâmica não é a única questão de importância no contexto apresentado; análises de segurança são também fundamentais. Como abordado pela reportagem da revista MotorSport [Otley 2023], corridas de MotoGP tem se tornado mais propensas a acidentes nos últimos anos, com essa afirmação sendo corroborada tanto por estatísticas quanto por relatos dos próprios motociclistas. Como esse aumento no número de acidentes coincide com um aumento no uso de apêndices aerodinâmicos, faz-se necessária uma avaliação dos riscos de segurança que podem surgir neste contexto.

## 1.2 Revisão Bibliográfica

O trabalho de [Gonçalves 2023] serve como ponto de partida para este trabalho, tratando de. Além de comparar coeficientes aerodinâmicos de motos com e sem asa, também simula situações de curva e ultrapassagem. Porém, como pode ser visto na figura 1.4, o campo de pressão obtido no entorno da moto apresentou comportamento instável, prejudicando a qualidade dos resultados. Dado que o trabalho foi realizado com uso dos softwares SU2 e Ansys ICEM, o atual trabalho almeja utilizar outra ferramenta, o OpenFOAM, para realização das mesmas análises, na tentativa de obter melhores resultados.

O trabalho de [Wiński and Piechna 2022] aborda a simulação computacional do escoamento aerodinâmico em torno de uma única moto, sob uma diversidade de enfoques. Uma conclusão interessante vem do estudo dos modelos de turbulência RANS, mostrado na figura 1.5 que mostra os coeficientes aerodinâmicos encontrados com o uso de cada modelo. Os modelos SST-DDES e SST-SAS são modelos híbridos entre RANS e LES, apresentando resultados mais precisos a um maior custo computacional. Tendo isso em mente, o modelo  $k-\omega$ -SST se mostrou um dos mais precisos dentre os modelos RANS abordados.



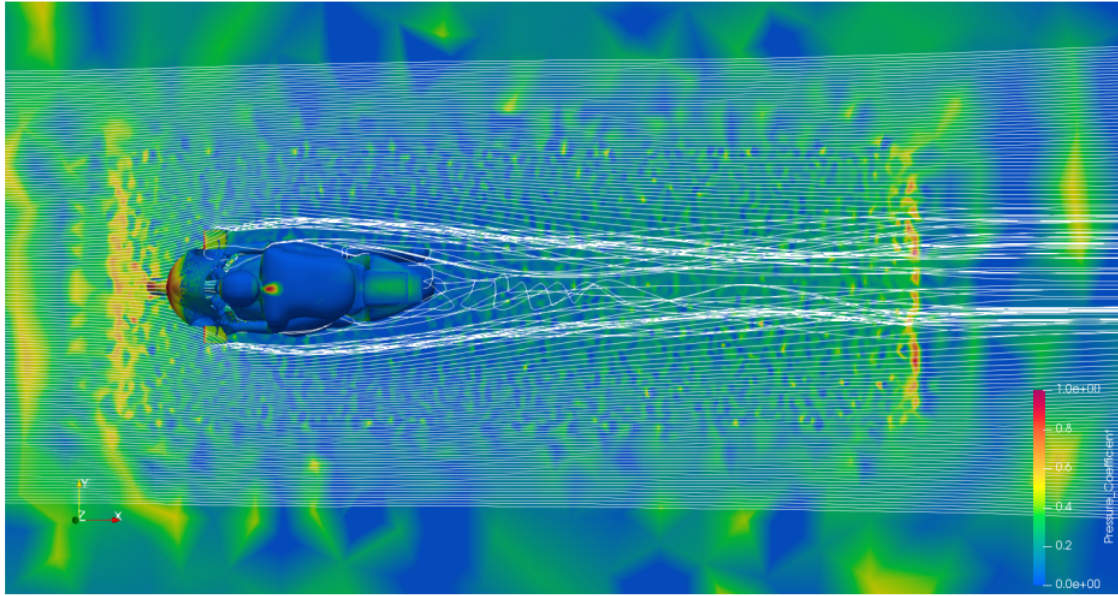


Figura 1.4: Distribuição de pressão e esteira aerodinâmica para uma moto com asa, sem ângulo de inclinação [Gonçalves 2023]

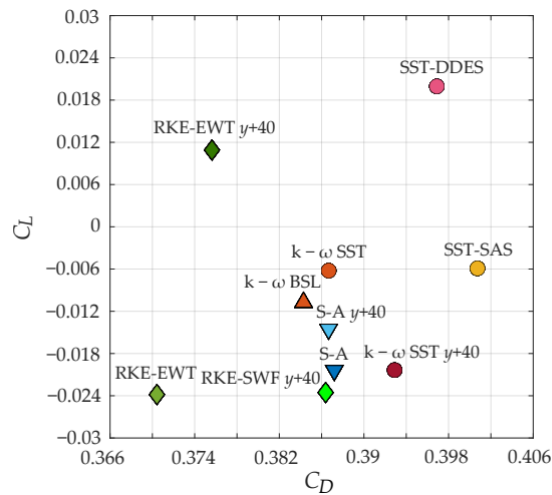


Figura 1.5: Coeficientes aerodinâmicos obtidos com cada modelo de turbulência [Wiński and Piechna 2022]

Para alguns modelos, é feita uma análise comparativa entre resultados obtidos com malhas de  $y+$  médio de 1 e 40, não sendo percebidas diferenças significativas. O trabalho também aborda o efeito da posição do motociclista nos coeficientes aerodinâmicos resultantes, mostrando a importância aerodinâmica desse fator. São feitos estudos da esteira de vórtices gerada no escoamento. Por fim, é analisada a contribuição de cada parte da superfície para o arrasto e a sustentação, com a carenagem frontal sendo principal responsável pelo arrasto e por sustentação negativa, enquanto que o motociclista é o principal responsável por sustentação positiva.

O trabalho de [Peri and Capuana 2021], embora majoritariamente dedicado ao design e seleção de asas para motocicletas, apresenta simulações em OpenFOAM de motos com e sem

asa em movimento retilíneo e em situações de curva. É utilizado o snappyHexMesh para geração de malhas, e o modelo de turbulência RANS  $k-\omega$ -SST para realização das simulações. Também valida os resultados obtidos com experimentos em túnel de vento, relatando uma diferença de 10% entre resultados experimentais e de simulação. Não é possível determinar qual dos valores é superior, contudo, visto que textos e tabelas apresentam informações conflitantes ao longo do trabalho. Além de fornecer valores de coeficientes aerodinâmicos, o trabalho também aborda todas as motos em situações de curva, e analisa mudanças no comportamento aerodinâmico e suas consequências em uma corrida.

O trabalho de [Blocken et al. 2020] analisa os efeitos aerodinâmicos da esteira de vórtices gerada por uma motocicleta sobre uma bicicleta, sem distanciamento lateral mas variando a distância longitudinal. As simulações foram realizadas em Ansys Fluent. O perfil obtido é dado pela figura 1.6, que ilustra dois principais pontos. Primeiramente, a simulação RANS mostra alta precisão para baixas distâncias, mas para altas distâncias passa a sobreestimar os valores, com distâncias acima de 10m sendo consideradas inviáveis para simulação. Além disso, percebe-se que mesmo a distâncias de 40 metros, o efeito de redução no arrasto ainda é significativo. Em razão da vasta diferença entre as áreas frontais de uma bicicleta e uma motocicleta, comparações mais detalhadas com casos envolvendo motocicletas não são razoáveis.

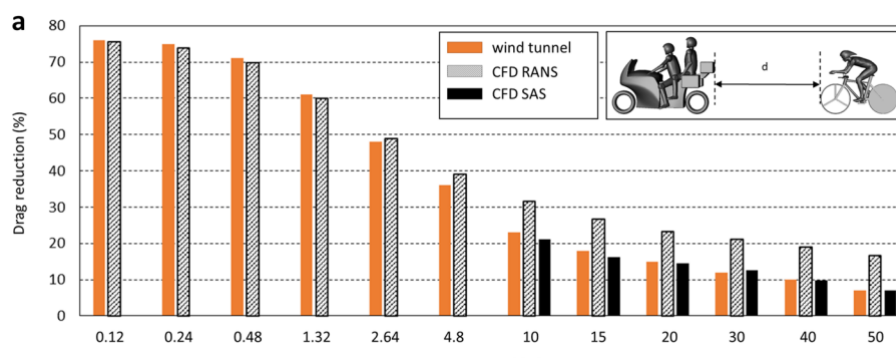


Figura 1.6: Coeficientes aerodinâmicos obtidos com cada modelo de turbulência [Blocken et al. 2020]

O campo de pressão no entorno da motocicleta obtido mostrou perfil mais estável e de variação mais uniforme, podendo portanto ser utilizado como referência para um resultado esperado. O campo em questão é ilustrado na figura 1.7.

Assim, percebe-se a existência de diversos trabalhos abordando a aerodinâmica de motos isoladas em movimento retilíneo, com alguns deles chegando a abordar motos com asa ou em situações de curva. Também é possível notar a prevalência do uso do modelo de turbulência  $k-\omega$ -SST, que apresenta boa relação entre precisão nos resultados e custo computacional. Porém, a aerodinâmica de motos em situação de ultrapassagem, onde as perturbações no escoamento geradas por uma moto posterior afetam a aerodinâmica, é pouco abordada na literatura, sejam as motos com ou sem asa. Considerando a grande frequência dessa situação em contextos de corrida, sua análise é de suma importância. Além disso, há uma grande



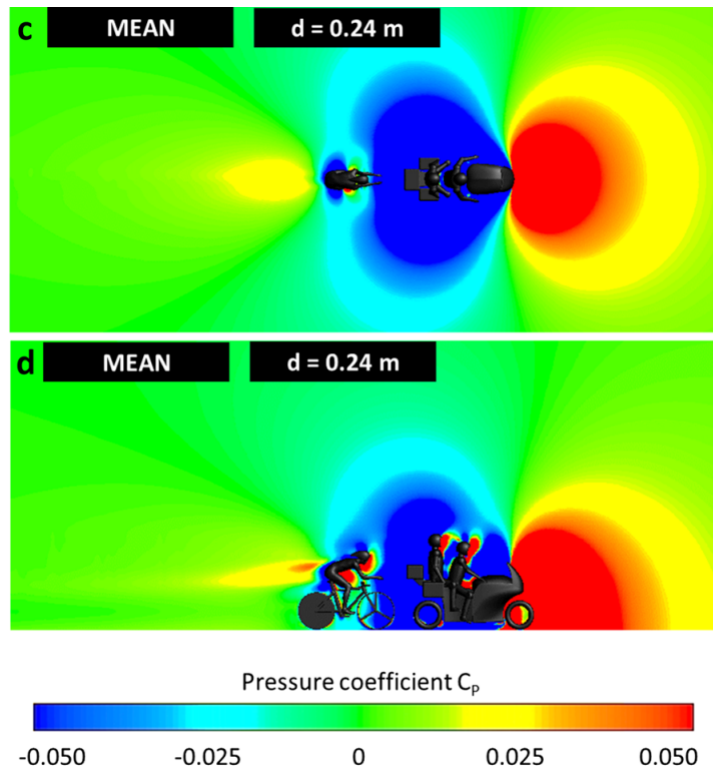


Figura 1.7: Campo de pressão no entorno da motocicleta, representação do plano xy e do plano xz [Blocken et al. 2020]

lacuna no que tange a análises de segurança, com a maior parte dos trabalhos brevemente tangenciando ou sequer citando o tema.

### 1.3 Objetivos

Os principais intuítos do presente trabalho são:

- Elaborar uma rotina de simulação CFD, utilizando os recursos providos pelo pacote OpenFOAM, do escoamento em torno de uma motocicleta Yamaha YZF R1 2004 com velocidade retilínea;
- Comparar os resultados obtidos com resultados obtidos por [Gonçalves 2023], que realizou trabalho similar utilizando os softwares Ansys ICEM e SU2;
- A partir do caso base de única moto, analisar situações de ultrapassagem com duas motos, variando a distância entre elas e a presença ou ausência de asas em cada uma;
- Limitar a quantidade de elementos da malha criada, de modo a manter um custo computacional relativamente baixo;
- Utilizar ferramentas de pós-processamento para realizar análises e observações relativas ao escoamento simulado, com enfoque em *performance* aerodinâmica e segurança

no contexto de motosport;

## 1.4 Estrutura

Além desta introdução, que apresenta a motivação e os objetivos do presente trabalho, o relatório está organizado como segue.

- O capítulo 2 , Fundamentação Teórica, apresenta detalhes da teoria aerodinâmica e de mecânica dos fluidos que regem tanto o processo de simulação numérica quanto a posterior análise dos resultados obtidos. Em particular, são introduzidos conceitos relacionados a forças aerodinâmicas e às equações governantes do problema a ser simulado.
- O capítulo 3, Aspectos Computacionais, apresenta os métodos e programas utilizados para elaborar a rotina de simulação. São feitas introduções à teoria básica de CFD, ao método de volumes finitos, ao método RANS e aos recursos do OpenFOAM utilizados.
- O capítulo 4, Resultados, apresenta os resultados obtidos, bem como análises em torno desses resultados. A partir das ferramentas de pós-processamento que serão apresentadas, é feito um estudo dos aspectos aerodinâmicos do escoamento.
- Por fim, o capítulo 5, Conclusão, apresenta as conclusões atingidas a partir do restante do trabalho.

# Capítulo 2

## Fundamentação Teórica

Um importante fator no sucesso de uma simulação numérica é o conhecimento aprofundado da teoria que rege o fenômeno físico a ser simulado. Aqui, são feitas as considerações dessa teoria julgadas essenciais, apresentando tanto equações quanto conceitos e relações qualitativas.

### 2.1 Modelagem Física da Situação

Na análise de qualquer situação física, é importante que sejam definidos quais serão os fenômenos relevantes. Na mecânica dos fluidos, isso se traduz em diversas classificações do escoamento com base em algumas características. Aqui, serão apresentadas as mais comuns, e definidas quais delas se aplicarão à situação a ser simulada: o escoamento aerodinâmico em torno de uma motocicleta em movimento retilíneo a 70m/s.

- Escoamento **Compressível** *versus* **Incompressível**: Primeiramente, temos a distinção entre escoamentos compressíveis e incompressíveis. A compressibilidade é uma propriedade presente em qualquer fluido, e portanto escoamentos incompressíveis não são um fenômeno físico real. Porém, os efeitos de compressibilidade são irrisórios para escoamentos de velocidade de corrente livre tal que o número de Mach seja inferior a 0,3; nesses casos, é viável aproximar a massa específica do fluido a um valor constante. Para o ar nas condições padrão, um escoamento pode, então, ser considerado incompressível se a velocidade for menor que aproximadamente 100 m/s [White 2011], portanto, o modelo **incompressível** é viável e escolhido.
- Escoamento **Laminar** *versus* **Turbulento**: Escoamentos também podem ser definidos como laminares ou turbulentos. Escoamentos em regime laminar apresentam movimento ordenado das partículas de fluido, enquanto que escoamentos em regime turbulento exibem flutuações drásticas de velocidade e movimentos aleatórios. A diferença entre os dois casos é ilustrada na figura 2.1. A transição de um escoamento do regime

laminar ao turbulento é regida principalmente pelo valor do número de Reynolds e da presença de perturbações no escoamento. O caso aqui estudado se trata de um escoamento de alto número de Reynolds perturbado por um corpo rombudo, de modo que o escoamento certamente se tornará **turbulento**.

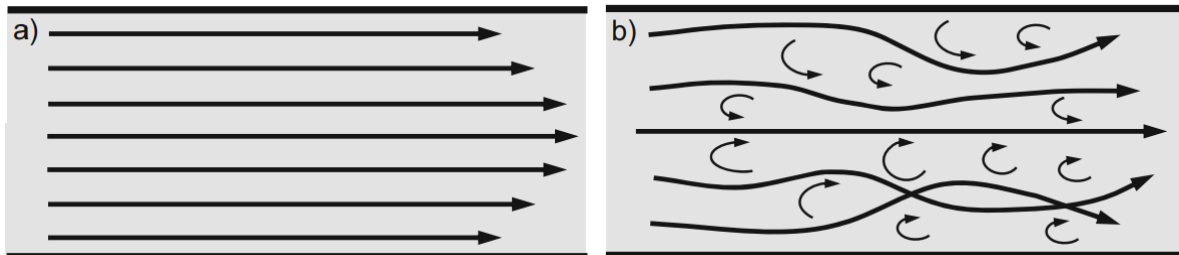


Figura 2.1: Representação gráfica de escoamento (a) laminar e (b) turbulento [Frömmig 2023]

- Escoamento **Interno versus Externo**: Existe também uma distinção entre escoamentos internos e externos. Escoamento externo se refere ao escoamento externo sem limitação de um fluido sobre uma superfície. Já o escoamento interno é caracterizado por um fluido inteiramente limitado por superfícies sólidas [Çengel and Cimbala 2012]. Como o motosport é realizado ao ar livre, é evidente que o problema atual deve ser classificado como um escoamento **externo**.
- Escoamento **Viscoso versus Invíscido**: Modelagens que desprezam as influências da viscosidade em um escoamento são chamadas invíscidas. Embora escoamentos invíscidos não existam como fenômeno físico real, muitos escoamentos aerodinâmicos que ocorrem na prática podem ser modelado como invíscidos [John D. Anderson 2010]. Isso pois, como é comum na aerodinâmica a análise de fluidos pouco viscosos a alta velocidade, os efeitos de viscosidade se mostram praticamente desprezíveis nas regiões externas à camada limite. Porém, como será mostrado na seção 2.3.2, a aproximação invíscida é inválida para o escoamento ao redor de corpos rombudos, como é o caso de uma motocicleta. Portanto, a simulação será realizada adotando um modelo de escoamento **viscoso**.
- Escoamento **Permanente versus Não-permanente**: Há uma distinção referente à variação das propriedades do escoamento com o tempo; escoamentos permanentes são aqueles que possuem derivada parcial com relação ao tempo nula para qualquer propriedade estudada, enquanto que os não-permanentes não satisfazem essa condição. Para o caso estudado, a esteira de vórtices que se formará atrás da motocicleta terá caráter não-permanente. Porém, como o restante do escoamento possui perfil permanente, será utilizada uma solução **permanente** para obter uma condição média, suficiente para análise da *performance* aerodinâmica da motocicleta.
- Escoamento **Monofásico versus Multifásico**: Fase é uma porção homogênea do sistema analisado, com composição e propriedades fixas em seu domínio. Escoamentos

de um fluido com fase única são denominados monofásicos, enquanto que escoamentos de fluidos com múltiplas fases são denominados multifásicos. Como adotam como fluido o ar, que é um gás, escoamentos aerodinâmicos são **monofásicos**.

Em suma, o escoamento a ser simulado será modelado como um escoamento incompressível, turbulento, externo, viscoso, permanente e monofásico. Além disso, serão desprezados os efeitos de quaisquer forças de campo. Essas definições serão utilizadas para escolher adequadamente as equações, relações e aproximações que irão compor a modelagem física da simulação.

## 2.2 Equações de Conservação

### 2.2.1 Teorema de Transporte de Reynolds

Há dois pontos de vista diferentes na análise de problemas em mecânica. O primeiro, apropriado à mecânica dos fluidos, preocupa-se com o campo de escoamento e é chamado de método euleriano de descrição. O segundo método, que segue uma partícula individual movendo-se no escoamento, é chamado de descrição lagrangiana [White 2011]. O Teorema de Transporte de Reynolds entra nesse contexto como relação que liga as duas descrições, tendo como base uma situação em que o sistema lagrangiano ocupa instantaneamente o mesmo volume que o volume de controle euleriano. Dada uma propriedade extensiva  $B$ , o Teorema de Transporte de Reynolds enuncia que sua variação com o tempo no sistema lagrangiano será igual ao fluxo dessa propriedade pela superfície do volume de controle somado à sua variação no interior do volume. A propriedade  $b$  é a equivalente intensiva da propriedade extensiva  $B$ , ou seja,  $b = \partial B / \partial m$ .

$$\left( \frac{dB}{dt} \right)_{sist} = \frac{d}{dt} \left( \iiint_{VC} \rho b dV \right) + \oiint_{SC} \rho b \vec{v} \cdot d\vec{S} \quad (2.1)$$

Aplicando o Teorema de Transporte de Reynolds a alguns princípios físicos gerais, descritos na forma lagrangiana, é possível obter relações que descrevem as propriedades de um escoamento em um volume de controle. Os três princípios comumente utilizados na mecânica dos fluidos são a conservação da massa, o balanço de momento linear e o balanço de energia. Para um estudo de escoamento incompressível, as equações de continuidade e momento são suficientes [John D. Anderson 2010]; porém, como a equação de energia é utilizada no modelo RANS, abordado na seção 3.3, também será abordada nesta seção.

Outros teoremas importantes na dedução das equações de conservação são os teoremas da divergência (equação 2.2) e da localização (equação). O teorema da divergência é aplicável para volume  $V$  de superfície  $S$  e um campo escalar, vetorial ou tensorial  $F$  arbitrário definido

em todo o volume. Já o teorema da localização, dada a condição apresentada em 2.3 com  $f$  sendo um integrando qualquer, afirma que 2.4.

$$\iiint_V \nabla \cdot \vec{F} dV = \oiint_S \vec{F} \cdot d\vec{S} \quad (2.2)$$

$$\iiint_V f dV = 0 \quad (2.3)$$

$$f = 0 \quad (2.4)$$

## 2.2.2 Equação da continuidade

A equação da continuidade surge do princípio físico de conservação da massa. Esse princípio dita que em situações normais de engenharia não há criação ou destruição de matéria [Houghton et al. 2016], e pode ser enunciado matematicamente na visão lagrangeana por

$$\left( \frac{dm}{dt} \right)_{sist} = 0 \quad (2.5)$$

Portanto, aplicando o Teorema de Transporte de Reynolds adotando  $m$  como a propriedade extensiva, obtém-se  $\partial m / \partial m = 1$  como a propriedade intensiva, e portanto a equação

$$\left( \frac{dm}{dt} \right)_{sist} = \frac{d}{dt} \left( \iiint_{VC} \rho dV \right) + \oiint_{SC} \rho \vec{v} \cdot d\vec{S} \quad (2.6)$$

Substituindo a relação 2.5 e adotando um volume de controle fixo, obtém-se a equação

$$0 = \iiint_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \oiint_{SC} \rho \vec{v} \cdot d\vec{S} \quad (2.7)$$

Essa é a forma integral da equação da continuidade. Porém, para um caso incompressível, aproximações adicionais podem ser realizadas, e como resultado é obtida a equação

$$\rho \oiint_{SC} \vec{v} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (2.8)$$

Muitas vezes é interessante o uso da forma diferencial dessa equação. Partindo de 2.7, é aplicado o teorema da divergência sobre a integral de superfície, obtendo portanto a relação

$$\iiint_{VC} \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) \right) dV = 0 \quad (2.9)$$

Em seguida, é aplicado o teorema da localização, e é obtida a relação

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2.10)$$

que representa a forma diferencial da equação da continuidade. Novamente, a suposição de um escoamento incompressível permite simplificações adicionais que resultam na relação

$$\rho(\nabla \cdot \vec{v}) = 0 \quad (2.11)$$

### 2.2.3 Equação de Balanço de Momentum

A equação de balanço de momentum se baseia na Segunda Lei de Newton, enunciada pela equação

$$\sum \vec{F}_{sist} = m_{sist} \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (2.12)$$

A Lei enuncia que o somatório de forças externas sobre um corpo é igual à sua taxa de variação de momento linear no tempo. É possível o uso da regra da cadeia para manipulação dessa expressão, obtendo a forma

$$\sum \vec{F}_{sist} = \frac{d(m_{sist}\vec{v})}{dt} \quad (2.13)$$

que é mais conveniente para os procedimentos seguintes.

Descartando os efeitos de forças de campo, a força resultante sobre o fluido terá duas fontes: o campo de pressão e as tensões viscosas.

$$\sum \vec{F}_{sist} = \vec{F}_p + \vec{F}_v \quad (2.14)$$

A força resultante pode ser obtida pela integração do campo de pressão ao longo da superfície de controle, procedimento mostrado em

$$d\vec{F}_p = -pd\vec{S} \leftrightarrow \vec{F}_p = - \oiint_{SC} pd\vec{S} \quad (2.15)$$

O sinal negativo As forças viscosas podem ser determinadas de forma semelhante abordada em

$$d\vec{F}_v = \vec{\tau} \cdot d\vec{S} \leftrightarrow \vec{F}_v = \oiint_{SC} (\vec{n} \cdot \vec{\tau})dS \quad (2.16)$$

com  $\vec{\tau}$  representando o tensor de tensões viscosas. Definindo o tensor de tensões pela ex-

pressão

$$\vec{\sigma} = -p\vec{I} + \vec{\tau} \quad (2.17)$$

em que  $\vec{I}$  representa a matriz identidade, o somatório de forças é reescrito como

$$\sum \vec{F}_{sist} = \oint_{SC} (\vec{n} \cdot \vec{\sigma}) dS \quad (2.18)$$

Aplicando o Teorema de Transporte de Reynolds adotando a quantidade de momento linear  $m\vec{v}$  como propriedade extensiva, obtém-se  $\partial m\vec{v}/\partial m = \vec{v}$  como a propriedade intensiva, e portanto a relação

$$\frac{d(m_{sist}\vec{v})}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \iiint_{VC} \rho\vec{v} dV \right) + \oint_{SC} (\rho\vec{v})\vec{v} \cdot d\vec{S} \quad (2.19)$$

Substituindo a relação 2.18 e adotando um volume de controle de forma fixa, obtém-se

$$\oint_{SC} (\vec{n} \cdot \vec{\sigma}) dS = \iiint_{VC} \frac{\partial(\rho\vec{v})}{\partial t} dV + \oint_{SC} (\rho\vec{v})(\vec{v} \cdot \vec{n}) dS \quad (2.20)$$

Essa é a forma integral da equação do balanço de quantidade de momento linear. Simplificações adicionais podem ser feitas para um caso incompressível e permanente:

$$\oint_{SC} (\vec{n} \cdot \vec{\sigma}) dS = \rho \oint_{SC} \vec{v}(\vec{v} \cdot \vec{n}) dS \quad (2.21)$$

Novamente, a dedução da forma diferencial da expressão é desejável. O processo é análogo ao realizado para a equação da continuidade, e portanto não será comentado em detalhes. É obtida a relação

$$\iiint_{VC} \left( \nabla \cdot (\vec{\sigma} - \vec{v}(\rho\vec{v})) - \frac{\partial(\rho\vec{v})}{\partial t} \right) dV = 0 \quad (2.22)$$

$$\nabla \cdot (\vec{\sigma} - \vec{v}(\rho\vec{v})) - \frac{\partial(\rho\vec{v})}{\partial t} = 0 \quad (2.23)$$

que para casos incompressíveis e permanentes se transforma em

$$\rho(\nabla \cdot \vec{v})\vec{v} = \nabla \cdot \vec{\sigma} \quad (2.24)$$

Uma consideração importante é que, diferentemente das outras equações abordadas nesta seção, a equação de balanço de momento linear é uma equação vetorial, e não escalar. Portanto, é muitas vezes conveniente decompô-la em componentes ortogonais em sua resolução.



## 2.2.4 Equação da Energia

A equação da energia se baseia na Primeira Lei da Termodinâmica, dada por 2.25.

$$\frac{dE_t}{dt} = \delta\dot{Q} + \delta\dot{W} \quad (2.25)$$

Ela dita que a variação de energia total em um sistema é dado pelo fluxo total de calor e trabalho por suas fronteiras. A potência pode ser obtida por

$$\delta\dot{W} = \left( \sum \vec{F}_{sist} \right) \vec{v} = \iint_{SC} (\vec{n} \cdot \vec{\sigma}) \cdot \vec{v} dS \quad (2.26)$$

a partir de sua definição, visto que o somatório de forças foi obtido na dedução da equação do momento linear. Já o fluxo de calor é dado por sua integração ao longo da superfície do volume de controle em

$$\delta\dot{Q} = - \iint_{SC} \rho \vec{q} \cdot d\vec{S} = \iint_{SC} \rho k \nabla T \cdot \vec{n} dS \quad (2.27)$$

aliado à Lei de Fourier dada por

$$\vec{q} = -k \nabla T \quad (2.28)$$

A variação de energia total pode portanto ser reescrita como

$$\frac{dE_t}{dt} = \iint_{SC} ((\vec{n} \cdot \vec{\sigma}) \cdot \vec{v} + \rho k \nabla T \cdot \vec{n}) dS \quad (2.29)$$

$$E_t = E_i + \frac{mv^2}{2} \leftrightarrow e_t = e_i + \frac{v^2}{2} \quad (2.30)$$

Adotando como variável extensiva a energia total do sistema  $E_t$ , obtém-se  $\partial E_t / \partial m = e_t$  como a propriedade intensiva; ela pode ser decomposta como mostrado em 2.30. A relação obtida é dada por

$$\left( \frac{dE}{dt} \right)_{sist} = \frac{d}{dt} \left( \iiint_{VC} \rho e_t dV \right) + \iint_{SC} \rho e_t \vec{v} \cdot d\vec{S} \quad (2.31)$$

Adotando um volume de controle fixo e substituindo 2.29 é obtida a forma integral da equação da energia, dada por

$$\iint_{SC} ((\vec{n} \cdot \vec{\sigma}) \cdot \vec{v} + \rho k \nabla T \cdot \vec{n}) dS = \iiint_{VC} \frac{d \left( \rho \left( e_i + \frac{v^2}{2} \right) \right)}{dt} dV + \iint_{SC} \rho \left( e_i + \frac{v^2}{2} \right) \vec{v} \cdot d\vec{S} \quad (2.32)$$

que pode ser simplificada em escoamentos permanentes e incompressíveis para a forma

$$\oiint_{SC} ((\vec{n} \cdot \vec{\sigma}) \cdot \vec{v} + \rho k \nabla T \cdot \vec{n}) dS = \rho \oiint_{SC} \left( e_i + \frac{v^2}{2} \right) \vec{v} \cdot d\vec{S} \quad (2.33)$$

A dedução da forma diferencial segue o mesmo padrão das demais equações. É obtida a relação

$$\iiint_{VC} \left( \frac{d \left( \rho \left( e_i + \frac{v^2}{2} \right) \right)}{dt} + \nabla \cdot \left( \rho \left( e_i + \frac{v^2}{2} \right) \vec{v} - \vec{\sigma} \cdot \vec{v} - \rho k \nabla T \right) \right) dV = 0 \quad (2.34)$$

$$\frac{d \left( \rho \left( e_i + \frac{v^2}{2} \right) \right)}{dt} + \nabla \cdot \left( \rho \left( e_i + \frac{v^2}{2} \right) \vec{v} \right) = \nabla \cdot \left( \vec{\sigma} \cdot \vec{v} + \rho k \nabla T \right) \quad (2.35)$$

que em casos permanentes e incompressíveis assume a forma

$$\rho \left( \nabla \cdot \left( e_i + \frac{v^2}{2} \right) \vec{v} \right) = \nabla \cdot \left( \vec{\sigma} \cdot \vec{v} \right) + \rho k \nabla^2 T \quad (2.36)$$

## 2.3 A Camada Limite

### 2.3.1 Definição

A camada limite é uma fina região de um escoamento adjacente a uma superfície, em que o escoamento é retardado pela influência de fricção entre a superfície sólida e o fluido [John D. Anderson 2010]. Pela condição de não-escorregamento, a velocidade da porção de fluido em contato direto com a superfície será nula; a camada limite é a região em que ocorre a transição desse valor nulo de velocidade até o valor esperado por aproximações invíscidas, como ilustrado na figura 2.2.

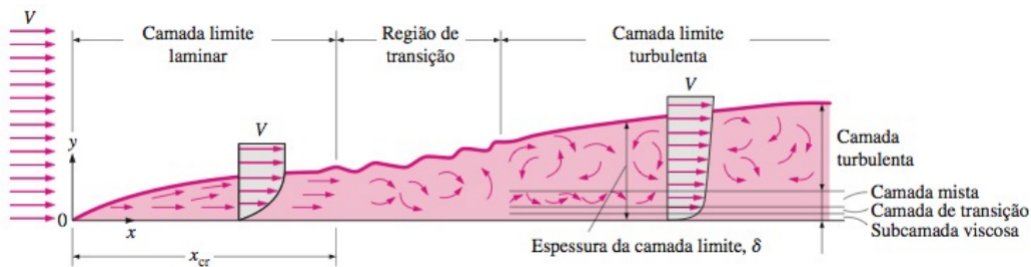


Figura 2.2: Relação entre o perfil de velocidades e a camada limite [Çengel and Cimbala 2012]

A simplificação do problema do escoamento, consequente desse conceito de camada limite, se dá no fato de que equações de escoamento viscoso precisam ser aplicadas apenas às regiões limitadas da camada limite, onde diversas simplificações se aplicam [Houghton et al. 2016]. Como ilustrado em 2.3, o tamanho da camada limite decresce com

o aumento do número de Reynolds. Assim, para a maioria dos problemas aerodinâmicos de interesse, a camada limite é extremamente esbelta comparada às demais dimensões do escoamento [John D. Anderson 2010], visto que o número de Reynolds nessas situações é elevado.

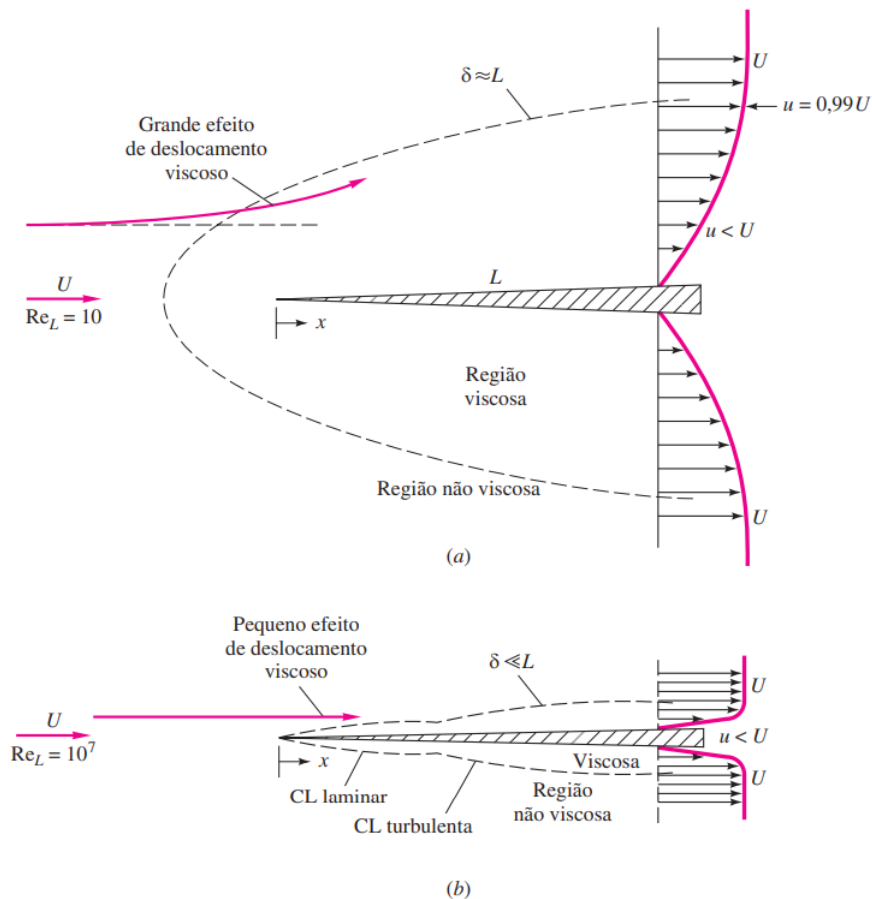


Figura 2.3: Relação qualitativa do tamanho de camada limite para um escoamento de (a)  $Re_L = 10$  e (b)  $Re_L = 10^7$  [White 2011]

Uma importante relação relativa ao comportamento da camada limite turbulenta é a Lei da Parede, dada por

$$\frac{\bar{u}}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{yu_\tau}{\nu} + A \quad (2.37)$$

que modela o perfil de velocidades na região turbulenta da camada limite turbulenta (ou seja, não se aplica à subcamada viscosa, região mais próxima da parede). Sua importância reside no fato de que pode ser deduzida por simples argumentos dimensionais e, principalmente, por ela ter sido confirmada por centenas de experimentos realizados sob diferentes condições por diferentes pesquisadores [Freire 1990]. A partir dela, se define o parâmetro  $y^+$  como uma distância adimensional como relação à superfície do corpo, calculada por

$$y^+ = \frac{yu_\tau}{\nu} \quad (2.38)$$

Como mostra a figura 2.4, esse parâmetro age como coordenada no perfil de velocidades da camada limite turbulenta, e portanto uma análise . Isso será relevante na montagem da malha computacional, abordada na seção 3.5, onde a espessura do elemento de contorno deve ser tal que um valor reduzido de  $y^+$  é obtido.

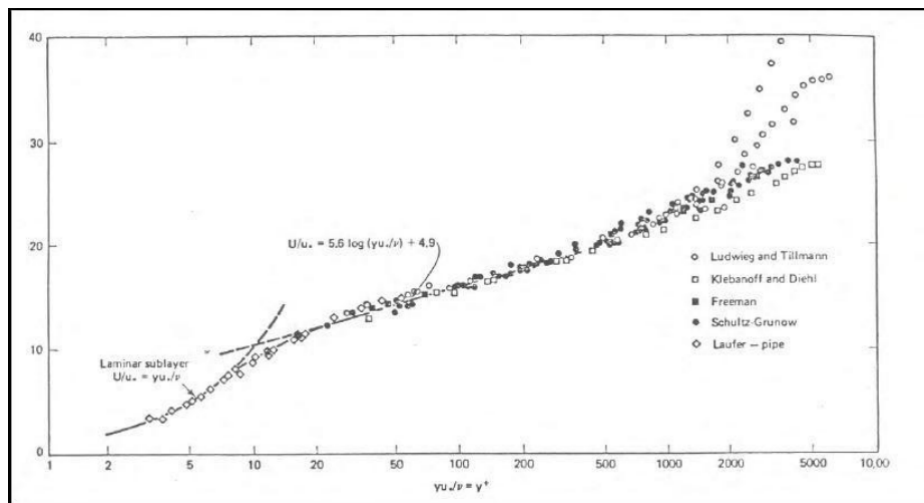


Figura 2.4: Variação da velocidade adimensional ao longo da camada limite [Freire 1990]

### 2.3.2 Escoamento ao Redor de Corpos Rombudos

Como previamente mencionado, a aproximação invíscida é muitas vezes apropriada no estudo do escoamento em torno de perfis aerodinâmicos. Porém, para corpos rombudos, ocorre o fenômeno de separação da camada limite. Esse fenômeno ocorre pois um fluido percorrendo a porção posterior de um corpo rombudo estará submetido a um gradiente de pressão adverso. Logo, a energia e a quantidade de movimento destas partículas podem não ser o suficiente para fazê-las resistirem por muito tempo contra um gradiente de pressão adverso. Elas são, então, após algum tempo, levadas ao repouso e a seguir a um escoamento reverso na direção do gradiente de pressão. Nestas condições, o escoamento que permanecia ainda no sentido original é forçado a deixar a parede [Freire 1990].

Uma consequência da separação da camada limite é a formação da chamada esteira de vórtices, uma região de escoamento turbulento e a baixa pressão localizada atrás do corpo. Ela pode ser visualizada na figura 2.5. O escoamento principal é defletido por essa esteira, de modo que o escoamento externo é bem diferente daquele previsto pela teoria não viscosa com a inclusão de uma camada limite delgada [White 2011].

Como ilustrado pela figura 2.5, o descolamento da camada limite é atrasado em escoamentos turbulentos. Tal atraso é causado pelas rápidas flutuações do fluido na direção transversal, o que permite que a camada limite turbulenta avance mais ao longo da superfície antes de ocorrer a separação, resultando em uma esteira mais estreita e um arrasto de pressão menor [Çengel and Cimbala 2012].

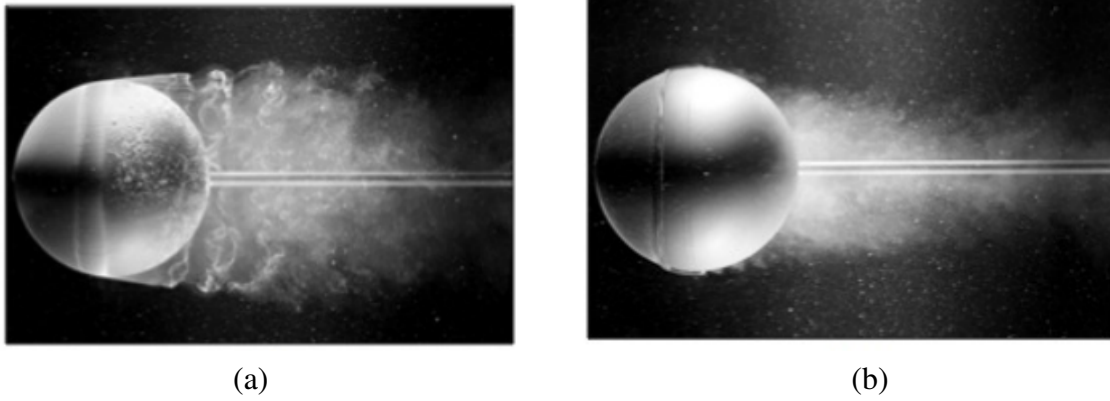


Figura 2.5: Descolamento de camada limite (a) laminar e (b) turbulenta no escoamento em torno de uma esfera lisa [Çengel and Cimbala 2012]

## 2.4 Forças Aerodinâmicas

Considere um corpo submetido ao escoamento de um fluido. Em sua superfície, surgirá um campo de pressão e outro de distribuição de tensões viscosas, como na figura 2.6. Como mostrado no desenvolvimento da equação de transporte de momento linear na seção 2.2, a integração desses campos ao longo das superfícies de interesse fornece a intensidade das forças exercidas pela superfície sobre o fluido; logo, pela Terceira Lei de Newton, será exercida sobre o corpo uma força de igual intensidade e sentido oposto.

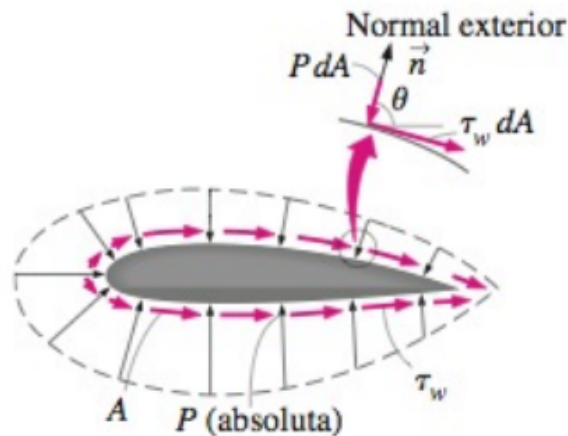


Figura 2.6: Representação da pressão e das tensões viscosas ao longo de um corpo [Çengel and Cimbala 2012]

A força resultante pode ser decomposta em componentes ortogonais para facilitar a análise de sua influência sobre o corpo, como mostrado na figura 2.7. Na aerodinâmica, essa decomposição tende a ser feita com relação à direção da velocidade de corrente livre. O arrasto  $D$  é a componente que atua na mesma direção do escoamento não perturbado, e é a força que resiste o movimento do veículo [Houghton et al. 2016]. Já a sustentação  $L$  é a componente perpendicular ao arrasto, contida no plano 2D da seção de asa. É possível que essas forças gerem um momento em torno da direção longitudinal, o chamado momento

de arfagem  $M$ , que será referido neste trabalho como momento de empinamento devido ao efeito que causa em uma motocicleta. Em situações tridimensionais assimétricas, surgem também a força lateral  $S$ , o momento de rolamento  $R$  (em torno do eixo paralelo ao arrasto) e o momento de guinada  $G$  (em torno do eixo paralelo à sustentação). Dentre estes, o momento de guinada será pouco relevante ao presente trabalho, e portanto não será abordado.

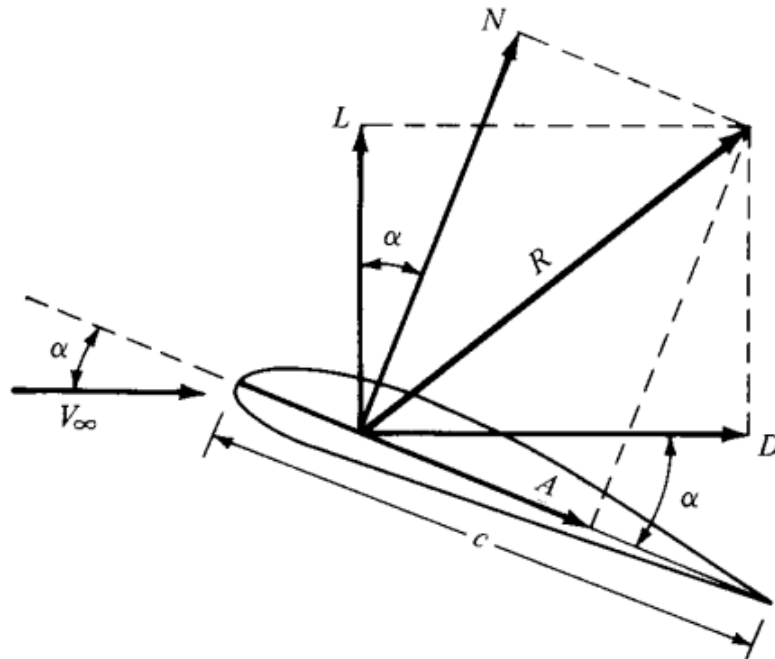


Figura 2.7: Representação da força de um escoamento sobre um corpo e de sua decomposição em componentes [John D. Anderson 2010]

É importante notar que, nos casos de uso mais comum para asas, o efeito desejado é uma sustentação positiva, como é o caso em veículos aéreos. Porém, em veículos terrestres, o uso de perfis aerodinâmicos almeja atingir uma sustentação negativa, o chamado *downforce*, de modo a melhorar a aderência dos pneus à pista.

Alguns dos principais parâmetros que influenciam as forças e momentos aerodinâmicos aos quais um corpo é submetido são levantados por [Bertin and Cummings 2008] e listados abaixo:

- Configuração geométrica (do corpo e de seus arredores);
- Ângulo de ataque;
- Tamanho do corpo;
- Valor de velocidade de corrente livre;
- Massa específica do ar não perturbado;
- Número de Reynolds;

- Número de Mach.

Na aerodinâmica, essas forças são comumente analisadas por meio dos chamados coeficientes adimensionais aerodinâmicos, dados pelas equações

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A_R} \quad (2.39)$$

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A_R} \quad (2.40)$$

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A_R l_R} \quad (2.41)$$

$$C_S = \frac{S}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A_R} \quad (2.42)$$

$$C_R = \frac{R}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A_R l_R} \quad (2.43)$$

Nesse contexto, surge também o conceito do coeficiente de pressão dado por

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} \quad (2.44)$$

É conveniente o trabalho com pressões adimensionais usando a pressão de escoamento livre como ponto de referência [Houghton et al. 2016].

No cálculo dos coeficientes aerodinâmicos, a escolha da área de referência é variável de caso a caso, e portanto deve ser explicitada em cada um [Houghton et al. 2016]; o mesmo pode ser dito para o comprimento característico. Em geral, são estabelecidas convenções para casos similares, de modo a manter uma consistência quantitativa que facilita comparações. No motociclismo, é convencionado o uso do comprimento entre rodas como comprimento de referência e da área de seção frontal como área de referência, e portanto foram esses os valores adotados no presente trabalho.

Por fim, são apresentadas algumas definições geométricas relativas a asas na figura 2.8. A partir dessas definições surge uma definição adicional: a razão de aspecto, que é a razão entre os comprimentos de envergadura e corda. Esse valor é de suma importância aos fenômenos apresentados na seção 2.5.

## 2.5 Vórtice de Ponta de Asa

O escoamento em torno de uma seção de asa é analisado de forma bidimensional. Porém, uma asa real é um corpo tridimensional, de modo que o escoamento em torno dela também se tornará tridimensional, com uma componente na direção do comprimento [John D. Anderson 2010]. Como visto na seção anterior 2.4, a sustentação em uma asa surge

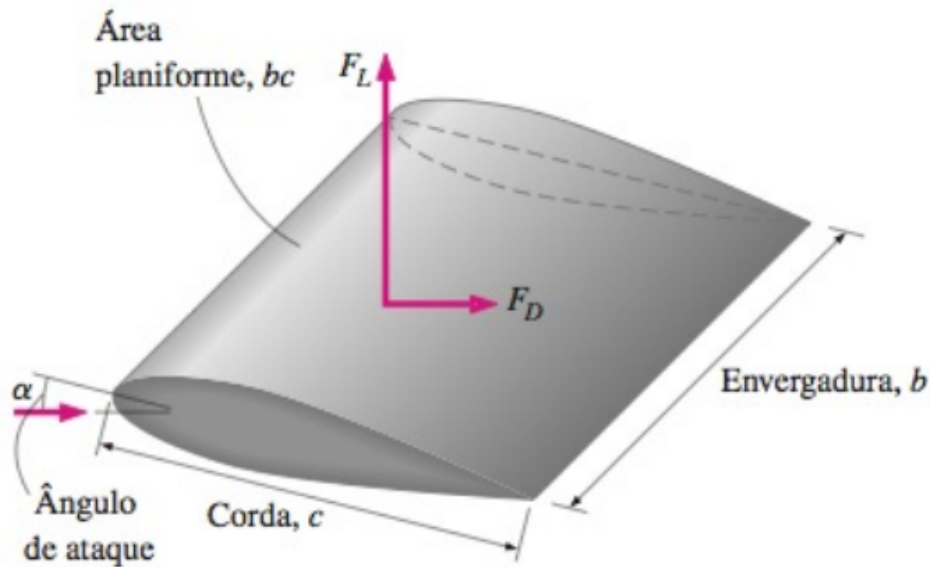


Figura 2.8: Dimensões geométricas de uma asa [White 2011]

da diferença de pressão entre seus lados superior e inferior, mantida pela presença da própria asa como obstáculo ao escoamento. Porém, como a pressão nas faces da asa possui valor distinto da pressão da atmosfera vizinha, surgirá uma tendência de escoamento na direção longitudinal da asa, de modo a atingir equilíbrio de pressão. Logo, haverá escoamento de ar ao redor da ponta da asa, do lado de pressão alta para o de pressão baixa, gerando dois fortes vórtices [Katz 2003], os chamados vórtices de ponta de asa. Esse fenômeno é ilustrado na figura 2.9.

Esse fenômeno possui dois principais efeitos de interesse para o atual trabalho. Primeiramente, visto que os vórtices são estruturas permanentes com decaimento lento, é esperado que afetem as propriedades do escoamento em regiões posteriores à asa, incluindo o restante da motocicleta e outras motocicletas em situação de ultrapassagem. Além disso, há também o fenômeno do *downwash* e o conseqüente arrasto induzido.

A presença dos vórtices induz uma componente vertical de velocidade sobre o escoamento próximo a asa, levando a uma velocidade resultante que não é perfeitamente horizontal. Essa componente vertical é chamada de *downwash*, e possui sentido contrário à sustentação. Isso reduz a incidência efetiva sobre a asa, de tal modo que para obter a sustentação gerada por uma seção de asa bidimensional a ângulo de ataque  $\alpha_\infty$ , é necessário um ângulo de  $\alpha = \epsilon + \alpha_\infty$  para uma asa finita [Houghton et al. 2016], como ilustrado pela figura 2.10. A sustentação gerada é perpendicular à velocidade resultante, e portanto não é perfeitamente vertical; sua componente horizontal é o chamado arrasto induzido. Como conseqüência disso, além do aumento do arrasto total, a sustentação efetivamente gerada é apenas a componente vertical da sustentação real, e portanto inferior à prevista em situações bidimensionais equivalentes.

Pela própria natureza do fenômeno, o vórtice de ponta de asa não se manifestaria em



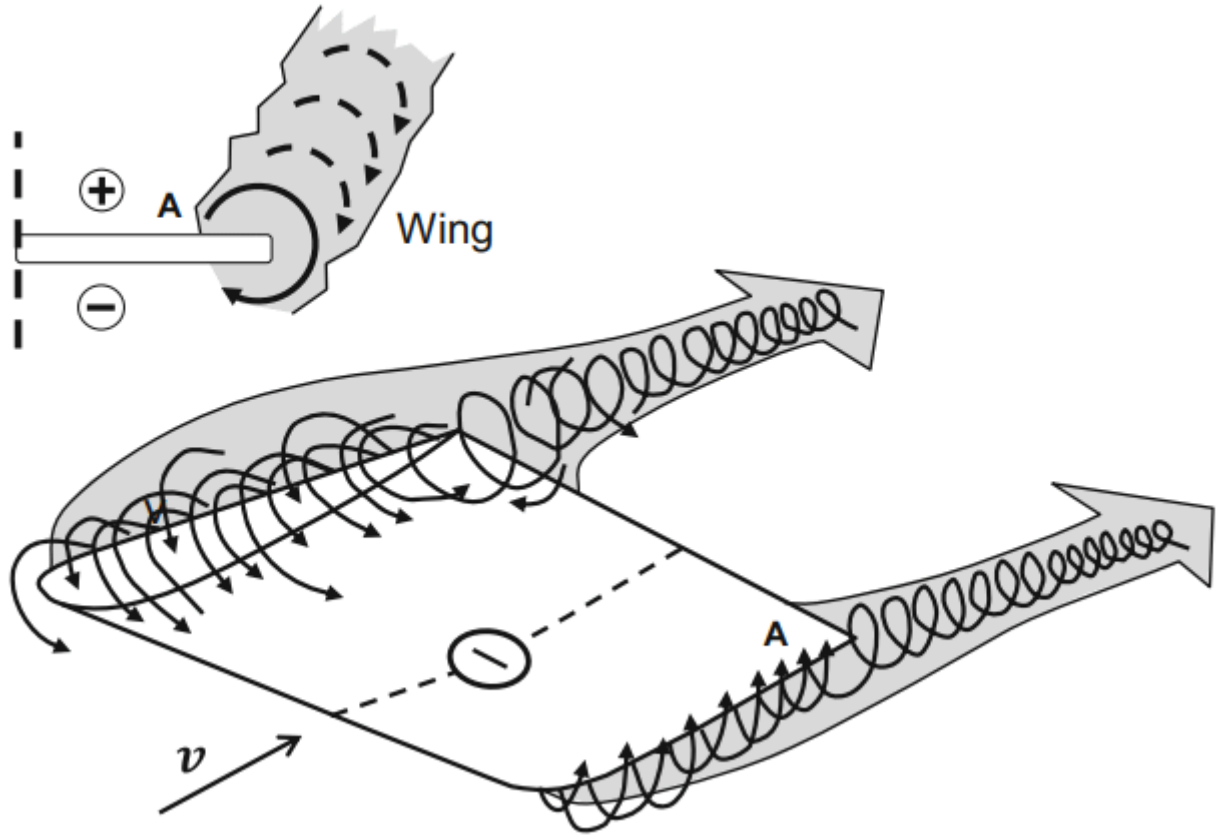


Figura 2.9: Ilustração do processo de formação do vórtice de ponta de asa [Frömmig 2023]

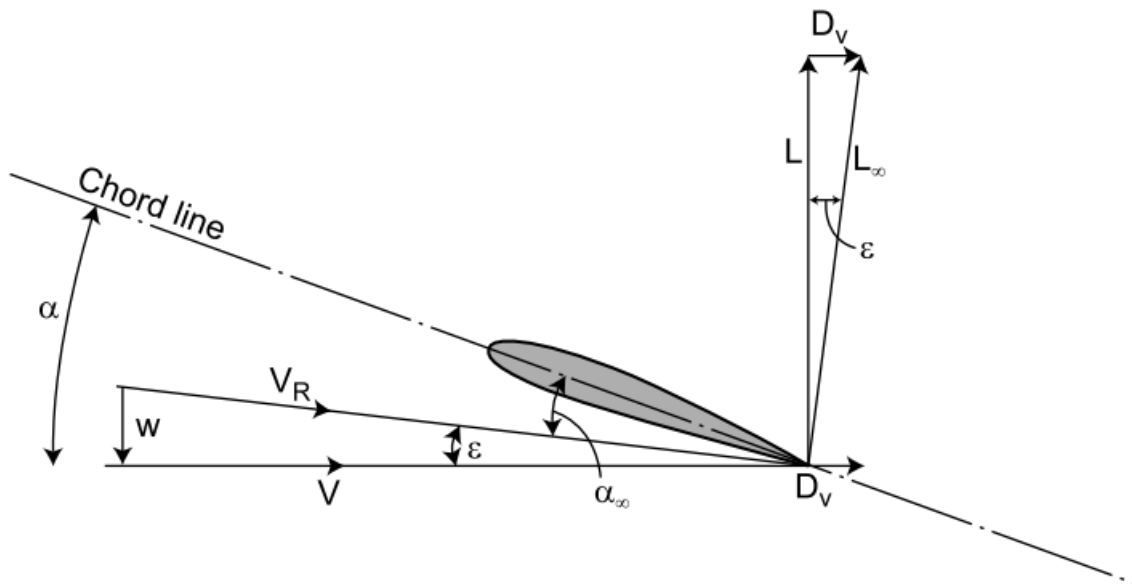


Figura 2.10: Relação entre o *downwash* ( $w$ ) e o arrasto induzido ( $D_v$ ) [Houghton et al. 2016]

uma asa tridimensional infinita; uma solução impossível de implementar em um caso real. Porém, partindo dessa observação é possível constatar que o fator de *design* mais crítico

para redução do arrasto induzido é o uso de razões de aspecto o quão elevadas quanto possível [John D. Anderson 2010]. Outra solução é o uso de dispositivos como as *end plates* ilustradas na figura 2.11, que obstruem o escoamento na direção longitudinal, dificultando a formação dos vórtices de ponta de asa. Basicamente, *end plates* aumentam a razão de aspecto efetiva da asa [Katz 2003]. Vale ressaltar que ambas essas soluções tendem a ser limitadas não apenas pela integridade estrutural da asa, mas também pelos regulamentos das competições de motosport.

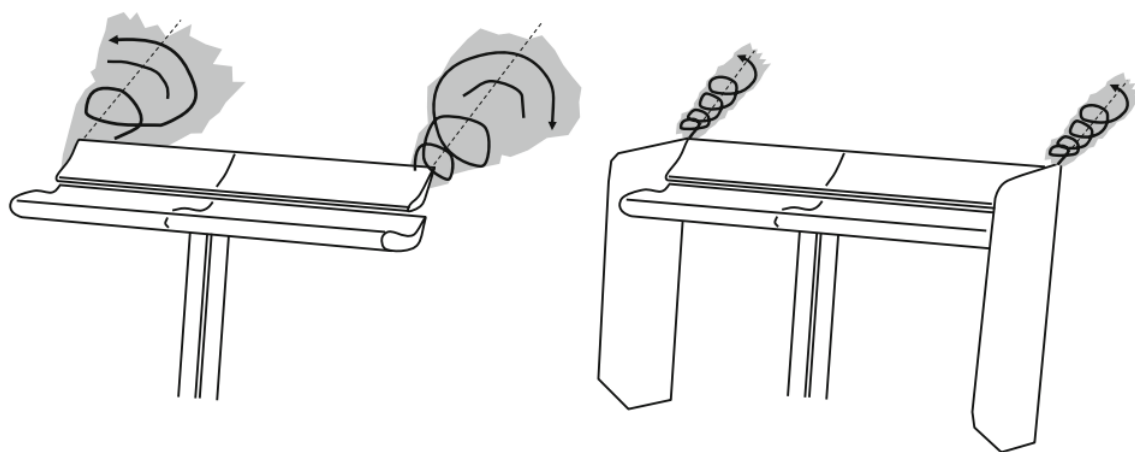


Figura 2.11: Efeito de *end plates* na redução dos vórtices de ponta de asa [Frömmig 2023]

# Capítulo 3

## Aspectos Computacionais

É importante notar que, em qualquer simulação numérica, a relevância científica dos resultados obtidos depende principalmente da adoção de uma metodologia coerente, com uma descrição precisa dos fenômenos físicos estudados e a correta representação dos mesmos no espaço computacional. Portanto, este capítulo irá apresentar tanto a teoria por trás da metodologia computacional adotada quanto os detalhes da simulação realizada nesse trabalho, etapa por etapa.

### 3.1 Rotina Geral de CFD

Embora métodos computacionais sejam muitas vezes associados ao uso de programas para realização de cálculos iterativos, é necessário mais do que isso para elaborar uma simulação CFD. De acordo com [Versteeg and Malalasekra 2007], esse processo pode ser dividido em três etapas: pré-processamento, simulação e pós-processamento. Pacotes comerciais tendem a oferecer todas essas três funcionalidades em um mesmo produto, prezando pela conveniência de seus usuários. Porém, é também possível realizar cada uma dessas etapas em programas distintos, em casos onde isso trará algum tipo de vantagem. Neste trabalho, o pacote OpenFOAM foi utilizado na realização do pré-processamento, da simulação em si e de partes do pós processamento.

Na etapa de **pré-processamento**, são definidas e registradas as informações necessárias para realização da simulação. Isso inclui o modelo físico utilizado, parâmetros do escoamento, condições de contorno, domínio de simulação e criação da malha (discretização do domínio). Em suma, é uma etapa em que é definido o que será simulado e sob quais condições, requerindo assim um estudo da teoria física do fenômeno a ser simulado e da teoria computacional por trás da metodologia de simulação escolhida.

Aqui, vale destacar a criação da malha como um procedimento de complexidade particularmente elevada. Pela própria natureza do procedimento de simulação computacional, que almeja discretizar o domínio em elementos de tamanho reduzido de modo a emular um

meio contínuo, tem-se que uma maior quantidade de elementos na malha leva a uma maior fidelidade física nos resultados obtidos. Porém, o custo computacional de simulação também aumenta, de modo que se torna necessário uma otimização para obter-se uma solução com tanto precisão quanto custo satisfatórios. Uma das soluções amplamente utilizadas é o uso de malhas não-uniformes com uma maior quantidade de elementos em regiões com elevados gradientes de grandezas, como no entorno de superfícies.

O *solver* é o programa que irá, de fato, realizar a simulação. Para isso, ele realiza cálculos iterativos de acordo com a metodologia numérica escolhida, de modo a obter uma solução numérica aproximada das equações governantes que regem o problema estudado. Esse cálculo é realizado sobre cada elemento discretizado da malha, motivo pelo qual o número de elementos afeta o custo computacional de simulação.

Detalhes sobre a operação do solver dependem do método de discretização do domínio utilizado. Neste trabalho, faz-se uso do método de volumes finitos, que será abordado em detalhe na seção seguinte 3.2.

Por fim, é no **pós-processamento** que os dados da simulação são convertidos para um formato passível de análise humana. Podem ser gerados *spreadsheets*, figuras, animações e quaisquer outros recursos relevantes à visualização dos resultados obtidos pela simulação. Também pode ser feito o cálculo de grandezas relevantes ao estudo realizado que não sejam determinadas diretamente pelo *solver*, como os coeficientes adimensionais aerodinâmicos. Com base em tais recursos, são feitas conclusões relativas ao fenômeno físico estudado e à validade física dos resultados obtidos, pela comparação com modelos teóricos, resultados experimentais e mesmo outras simulações. Neste trabalho, além do OpenFOAM, foi utilizado para pós-processamento o programa Paraview, que será introduzido na seção 3.7.

## 3.2 O Método de Volumes Finitos

### 3.2.1 Os Diferentes Métodos de Discretização

Existem três principais métodos de discretização usados em simulações computacionais: diferenças finitas, volumes finitos e elementos finitos. Embora cada método possua suas respectivas vantagens e desvantagens, o método de volumes finitos prevalece em uso códigos CFD por exibir boa flexibilidade e precisão [Ghaib 2022], e é o utilizado pelo OpenFOAM. Antes de elaborar sobre esse método, contudo, serão feitas breves apresentações de cada método.

O **método das diferenças finitas, FDM**, é um método antigo de solução de equações diferenciais parciais. Em suma, o método se baseia na resolução de equações pela substituição de termos de derivada por termos baseados nos valores nodais de funções (ou seja, aproximações do tipo  $\partial/\partial x = \Delta/\Delta x$ ), aplicando as equações de conservação entre pontos. É um método de maior precisão que os demais; porém, seu uso se restringe a malhas estruturadas

de alta qualidade. Em CFD, tal restrição ao uso de geometrias simples é uma desvantagem significativa na simulação de escoamentos complexos [Ferziger and Peric 2002].

O **método de volumes finitos, FVM**, se baseia na discretização do espaço em volumes de controle, com posterior aplicação das equações de conservação em cada um desses volumes, sendo mais conveniente portanto o uso das equações em forma integral. A possibilidade de aplicação desse método a malhas arbitrárias lhe rende maior flexibilidade que o FDM, mantendo ainda assim um bom nível de precisão. Como desvantagem, tem-se que métodos de ordem superior a segunda são mais difíceis de desenvolver no espaço tridimensional [Ferziger and Peric 2002].

O **método de elementos finitos, FEM**, é similar ao FVM no que tange ao uso das formas integrais de equações e possibilidade de uso de malhas com geometria arbitrária. Porém, nele também é feito uso de uma função de ponderação. Em termos simplificados, a solução é aproximada por uma função de forma linear em cada elemento, de tal forma que a continuidade da solução é garantida através das fronteiras dos elementos. Tal função pode ser construída a partir dos valores de propriedades nos cantos dos elementos [Ferziger and Peric 2002]. É uma metodologia em geral mais utilizada para simulações em outros campos de estudo, como na análise de tensões em estruturas sólidas.

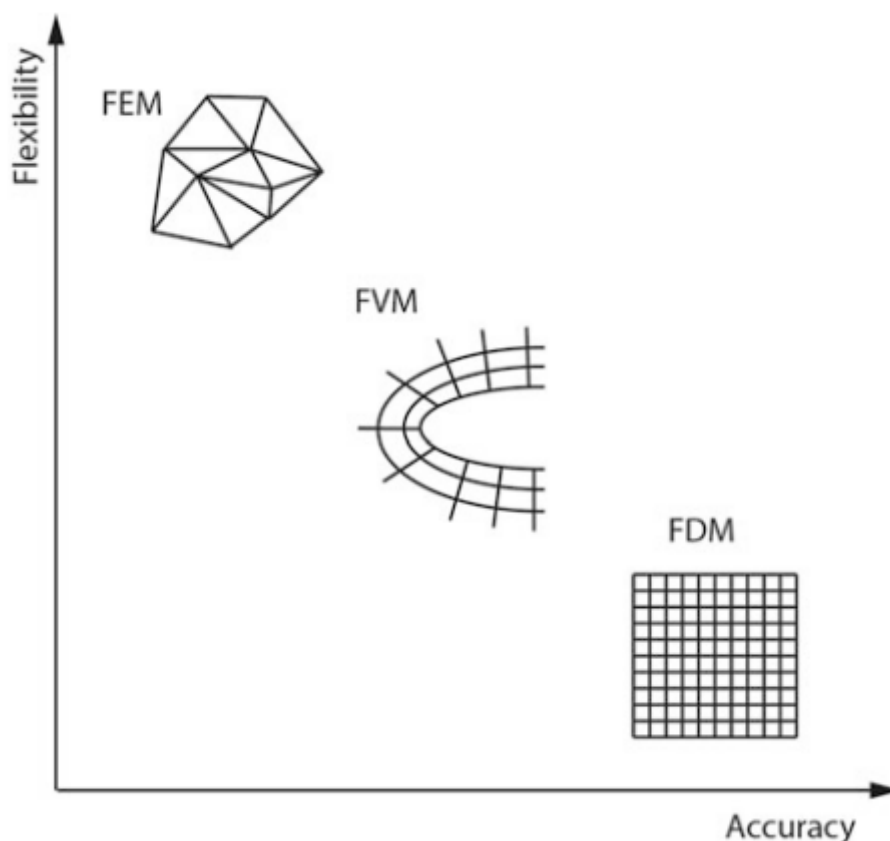


Figura 3.1: Relação entre flexibilidade e precisão dos métodos de discretização apresentados [Ghaib 2022]

Em qualquer desses métodos, é realizada a discretização tanto geométrica (do domínio

computacional) quanto das equações governantes a serem calculadas. Abaixo, serão feitas considerações sobre esses procedimentos para o método FVM, que é o que se aplica ao presente trabalho.

### 3.2.2 Discretização Geométrica no FVM

A discretização geométrica consiste no processo de subdividir o domínio de cálculo de modo a gerar a malha em que serão aplicadas as equações de conservação. Essa divisão se dá por elementos não sobrepostos e discretos que, juntos, preenchem completamente o domínio; a chamada malha [Moukalled et al. 2015]. Em cada elemento, as equações governantes são aplicadas de modo a calcular as propriedades do escoamento em alguns pontos específicos, denominados nós. Esses nós podem se localizar em pontos arbitrários do elemento; geralmente são escolhidos pontos característicos como centroides ou vértices, vide figura 3.2, mas outras opções também são passíveis de implementação.

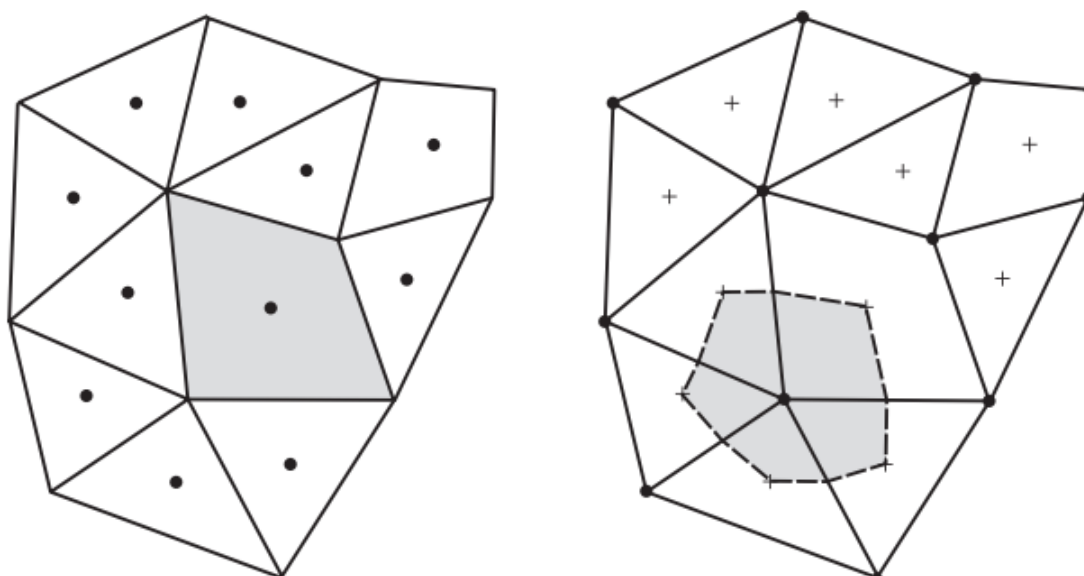


Figura 3.2: Exemplos de escolha para posicionamento dos nós [Versteeg and Malalasekra 2007]

A malha resultante pode ser estruturada ou não estruturada. Em malhas estruturadas, é possível definir os elementos vizinhos a um dado elemento a partir de seu índice; malhas não estruturadas não apresentam essa relação. Como a integração das equações governantes envolve dados dos elementos vizinhos, enquanto que a montagem da solução final se dá um função do índice do elemento, é necessário estabelecer uma relação entre esses parâmetros. Essa relação é a chamada conectividade de elementos, e envolve o registro de elementos, faces e vértices vizinhos, como ilustrado na figura 3.3.

Pode também ser relevante determinar a conectividade de faces e vértices. A conectividade de faces aumenta a eficiência computacional da solução. Nela também é definida a

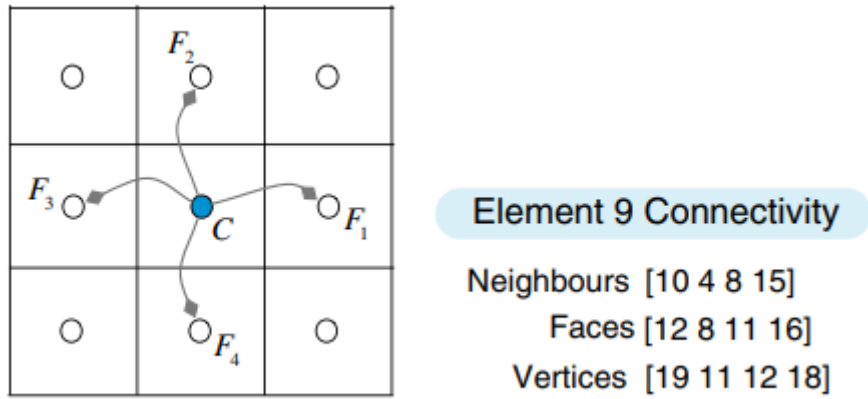


Figura 3.3: Representação da conectividade de um elemento [Moukalled et al. 2015]

orientação da face, de tal forma que o vetor normal aponte do elemento dono ao elemento vizinho; faces no contorno do domínio, que não possuem elemento vizinho, tem sua normal orientada para fora do domínio. Já a conectividade de vértices é útil para operações de pós-processamento e para computar gradientes [Moukalled et al. 2015]. Ambos os tipos de conectividade são ilustrados na figura 3.4.

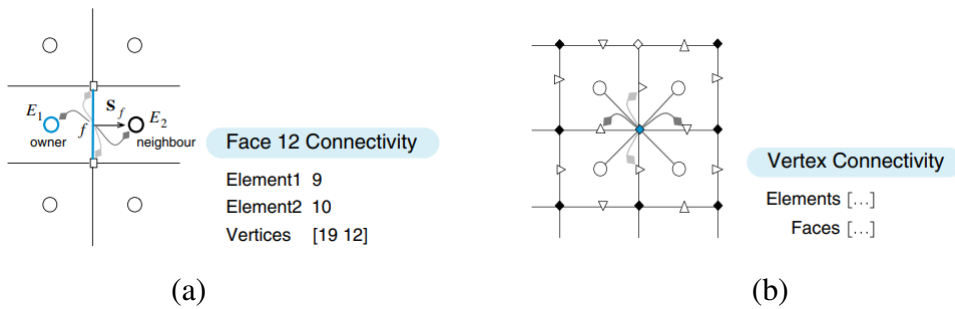


Figura 3.4: Representação da conectividade de (a) uma face e (b) um vértice [Moukalled et al. 2015]

### 3.2.3 Discretização das Equações no FVM

Já a discretização das equações governantes no FVM começa pela integração das equações de conservação nos volumes de controle da malha. O ponto de partida é a forma integral das equações de conservação; uma representação genérica dessas expressões é dada pela equação

$$\iiint_{VC} \dot{Q} dV + \iint_{SC} \vec{\nabla} \cdot \Gamma \vec{\nabla} \phi d\vec{S} = \iint_{SC} \vec{\nabla} \cdot (\rho \phi \vec{v}) d\vec{S} \quad (3.1)$$

em que  $VC$  representa o volume de controle,  $SC$  a superfície desse volume,  $\Gamma$  é o coeficiente de difusão,  $\dot{Q}$  é o termo de fonte,  $\vec{v}$  é o vetor velocidade,  $\rho$  é a massa específica e  $\phi$  é a variável analisada.

A integral do termo de fonte é tomada como a média volumétrica de seu valor no VC, como mostrado em

$$\iiint_{VC} \dot{Q} dV = \bar{Q}V \quad (3.2)$$

Já as integrais de superfície são aproximadas pelos valores das propriedades nas faces do elemento, como mostram as equações

$$\oiint_{SC} \vec{\nabla} \cdot \Gamma \vec{\nabla} \phi d\vec{S} = \sum_{f \sim nf} (\vec{\nabla} \cdot \Gamma \vec{\nabla} \phi)_f \vec{S}_f \quad (3.3)$$

$$\oiint_{SC} \vec{\nabla} \cdot (\rho \phi \vec{v}) d\vec{S} = \sum_{f \sim nf} (\vec{\nabla} \cdot (\rho \phi \vec{v}))_f \vec{S}_f \quad (3.4)$$

onde  $nf$  é o número de faces do elemento. A equação 3.1 é portanto reescrita como:

$$\bar{Q}V + \sum_{f \sim nf} (\vec{\nabla} \cdot \Gamma \vec{\nabla} \phi)_f \vec{S}_f = \sum_{f \sim nf} (\vec{\nabla} \cdot (\rho \phi \vec{v}))_f \vec{S}_f \quad (3.5)$$

Os procedimentos seguintes irão depender do método numérico utilizado para as aproximações, e portanto não serão abordados em detalhe nesta seção.

A solução das equações pode ser feita de duas principais formas. No método direto, partindo de uma representação genérica do sistema de equações dada por

$$\mathbf{A}\vec{x} = \vec{b} \quad (3.6)$$

é realizada a inversão da matriz  $\mathbf{A}$  para obter as variáveis desejadas pela equação

$$\vec{x} = \mathbf{A}^{-1}\vec{b} \quad (3.7)$$

Métodos iterativos, por outro lado, se aproximam da solução realizando correções a partir de um chute inicial. Aqui, o uso de algoritmos iterativos se mostra mais eficiente. O aumento no esforço de cálculo advindo da realização de múltiplas iterações é pequeno comparado ao esforço do elevado número de operações em *solvers* diretos clássicos [Ghaib 2022].

## 3.3 Simulação de Turbulência e o Modelo RANS

### 3.3.1 Métodos de Simulação de Turbulência

Dada a importância de efeitos turbulentos em diversos escoamentos de interesse acadêmico e industrial, não é surpreendente que um esforço de pesquisa significativo é dedicado ao desenvolvimento de métodos numéricos que capturem os importantes efeitos da turbu-



lência. Aqui, são apresentados os principais modelos de método numérico utilizados para escoamentos com efeitos de turbulência. A figura 3.5 apresenta uma relação simplificada entre o custo computacional dos métodos apresentados e sua precisão.

- **Direct Numerical Simulation** ou **DNS**: Se trata da solução direta das equações governantes, visto que são adequadas para descrição de fenômenos de turbulência. Porém, em escoamentos turbulentos, uma resolução de escoamento extremamente alta é necessária para captura de pequenos turbilhões, o que requer uma malha extremamente refinada, levando a custo computacional muito elevado [Ghaib 2022]. Devido ao seu custo computacional proibitivo, o método DNS não é atualmente viável na solução de problemas industriais [Moukalled et al. 2015].
- **Large Eddy Simulation** ou **LES**: É uma forma intermediária de cálculo de turbulência que acompanha o comportamento dos maiores turbilhões [Versteeg and Malalasekra 2007]. Uma função de filtro é aplicada às equações de Navier-Stokes, rejeitando vórtices menores mas mantendo os demais. O efeito dos vórtices menores é incluído usando modelos de escala de sub-malhas. Esse método faz uso de equações não-permanentes, aumentando assim seu custo computacional, mas já é mais acessível que o DNS.
- **Reynolds-Averaged Navier-Stokes** ou **RANS**: É um método que se baseia na tomada de média das variáveis com relação ao tempo, realizando a decomposição das propriedades do escoamento em uma componente média e outra flutuante. Os recursos computacionais requeridos para computação razoavelmente precisa do escoamento são modestos, e portanto esse método tem sido o principal utilizado para cálculo de escoamentos em engenharia nas últimas década [Versteeg and Malalasekra 2007].

### 3.3.2 Descrição Geral do Método RANS

Nas simulações deste trabalho, foi utilizado o método RANS. Nele, as variáveis do escoamento, aqui denotadas por uma variável genérica  $\phi$ , são divididas em uma componente de média temporal  $\bar{\phi}$  e uma flutuação transiente  $\phi'$ ; essa é a chamada média de Reynolds. A média temporal, no caso permanente, é dada pela expressão

$$\bar{\phi} = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \phi dt \right) \quad (3.8)$$

equanto que a flutuação transiente é a diferença entre a média temporal e o valor real. A relação entre os valores para um caso permanente é ilustrada pela figura 3.6. Nesse contexto,

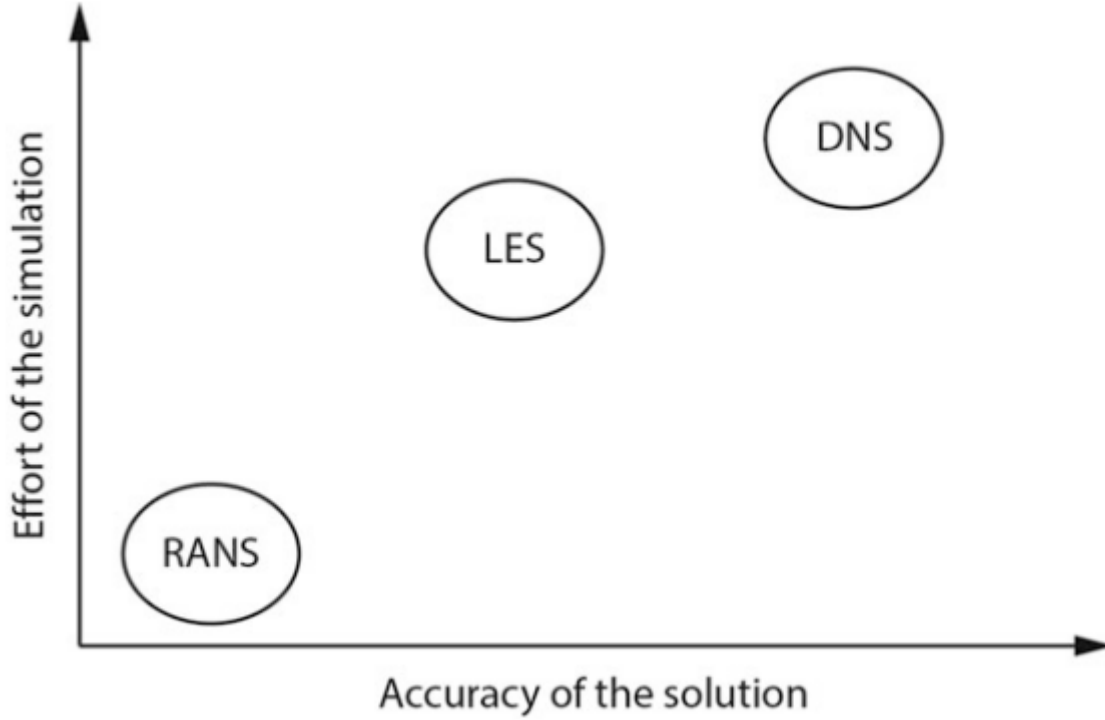


Figura 3.5: Relação entre custo computacional e precisão dos modelos apresentados [Ghaib 2022]

valem diversas regras de cálculo; algumas são apresentadas nas equações:

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (3.9)$$

$$\bar{\phi}' = 0 \quad (3.10)$$

$$\overline{\phi\phi'} = 0 \quad (3.11)$$

$$\overline{\phi'\phi'} \neq 0 \quad (3.12)$$

O método RANS foi desenvolvido para escoamentos incompressíveis [Ghaib 2022], e portanto vale ressaltar que o método aqui aplicado não é válido para escoamentos compressíveis. Existem adaptações do modelo para uso em escoamentos compressíveis, envolvendo o conceito de média de Favre, mas elas não serão abordadas neste trabalho.

Aplicando a média de Reynolds às equações de transporte, surgem seis novos termos desconhecidos ( $\overline{\rho v_x'^2}$ ,  $\overline{\rho v_y'^2}$ ,  $\overline{\rho v_z'^2}$ ,  $\overline{\rho v_x' v_y'}$ ,  $\overline{\rho v_x' v_z'}$  e  $\overline{\rho v_y' v_z'}$ ) que irão compor o chamado tensor de tensões de Reynolds, dado por

$$\vec{\tau}^R = -\rho \overline{\vec{v}'\vec{v}'} \quad (3.13)$$

Também surgem três termos relativos a transferência de calor ( $\overline{\rho v_x' q}$ ,  $\overline{\rho v_y' q}$  e  $\overline{\rho v_z' q}$ ). Como consequência, o conjunto de equações RANS não é fechado, e para sua solução ser possível são requeridas equações adicionais relativas aos termos desconhecidos do tensor de tensões

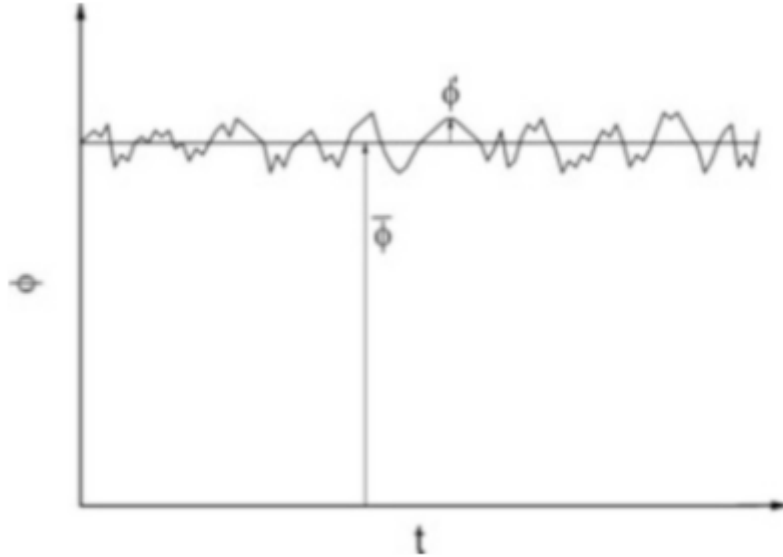


Figura 3.6: Relação entre uma variável  $\phi$ , sua média temporal e sua flutuação transiente [Ghaib 2022]

de Reynolds. O processo de cálculo das tensões de Reynolds é chamado na literatura de modelagem de turbulência[Moukalled et al. 2015].

### 3.3.3 Modelos de Turbulência

A modelagem direta do tensor de tensões de Reynolds é baseada na hipótese de Boussinesq, que em analogia a escoamentos newtonianos adota a tensão de Reynolds como função linear da média dos gradientes de velocidade [Moukalled et al. 2015], e é representada pela expressão

$$\vec{\tau}^R = \mu_t \left[ \nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T \right] - \frac{2}{3} \rho k \vec{I} \quad (3.14)$$

para escoamentos incompressíveis. O termo  $k$  é definido como a energia cinética turbulenta, dado por

$$k = \frac{1}{2} \overline{\vec{v}' \cdot \vec{v}'} \quad (3.15)$$

A viscosidade turbulenta,  $\mu_t$ , é uma quantidade que não é uma propriedade do material, mas da própria turbulência do escoamento [Moukalled et al. 2015]. Diversos modelos de turbulência se baseiam no estabelecimento de uma relação do tipo

$$\mu_t = \rho l \sqrt{k} \quad (3.16)$$

Os modelos de turbulência RANS mais comuns são classificados pelo número de equa-

ções de transporte adicionais que devem ser resolvidas [Versteeg and Malalasekera 2007], com modelos de zero, uma, duas e sete equações adicionais. Os modelos de duas equações são os mais populares em termos de uso na simulação de aplicações industriais, requerendo a resolução de duas equações de transporte adicionais e fornecendo resultados precisos o suficiente [Moukalled et al. 2015].

### 3.3.4 O Modelo $k$ - $\omega$ -SST

O modelo utilizado para as simulações é o modelo  $k$ - $\omega$ -SST (em que SST significa transporte de esforços cisalhantes), um modelo de duas equações. Ele utiliza o modelo  $k$ - $\epsilon$  no escoamento livre e  $k$ - $\omega$  no entorno de superfícies, além de uma relação modificada para a viscosidade turbulenta que [Ghaib 2022]. Se trata, portanto, de um modelo híbrido que combina as vantagens dos modelos  $k$ - $\epsilon$  (mais preciso em escoamento livre) e  $k$ - $\omega$  (mais preciso no entorno de superfícies). A viscosidade turbulenta nesse modelo é dada por

$$\mu_t = \frac{a_1}{\max(a_1\omega, \sqrt{2S_{ij}S_{ij}F_2})} \quad (3.17)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.18)$$

$$(3.19)$$

em que  $a_1$  é uma constante e  $F_2$  é uma função de mistura, cuja forma é complexa e não será apresentada. Instabilidades numéricas podem surgir das diferenças entre os valores computados pelo modelo de escoamento livre e o de parede [Versteeg and Malalasekera 2007]; o papel das funções de mistura no modelo é garantir uma transição suave entre os dois modelos.

As equações de transporte para  $k$  e  $\omega$  apresentam a forma dada pelas equações

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho k v_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \left( 2\mu_t S_{ij} - \frac{2\mu_t}{3} \nabla \cdot \vec{v} \delta_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \right) - \beta^* \rho k \omega \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho \omega v_i}{\partial x_i} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2\rho(1 - F_1) \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \\ & + \alpha_3 \frac{\omega}{k} \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \left( 2\mu_t S_{ij} - \frac{2\mu_t}{3} \nabla \cdot \vec{v} \delta_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \right) - \beta_3 \rho \omega^2 \end{aligned} \quad (3.21)$$

em notação indicial. Os termos  $\beta^*$  e  $\sigma_{\omega 2}$  são constantes, enquanto que  $\beta_3$ ,  $\alpha_3$ ,  $\sigma_{\omega 3}$  e  $\sigma_{k3}$  são valores definidos pela aplicação da função de mistura  $F_1$  a valores constantes. Para as constantes, foram utilizados os valores padrão do OpenFOAM, listados abaixo sob a nomenclatura utilizada pelo programa.

- $\alpha_{k1} = 0,85$

- $\alpha_{k2} = 1,0$
- $\alpha_{\omega 1} = 0,5$
- $\alpha_{\omega 2} = 0,856$
- $\beta_1 = 0,075$
- $\beta_2 = 0,0828$
- $\gamma_1 = 5/9$
- $\gamma_2 = 0,44$
- $\beta^* = 0,09$
- $a_1 = 0,31$
- $b_1 = 1,0$
- $c_1 = 10,0$

### 3.4 OpenFOAM

O OpenFOAM (Open Source Field Operation and Manipulation) é uma biblioteca em C++ utilizada para criar executáveis denominados aplicações [OpenCFD 2022]. A biblioteca, juntamente com diversas dessas aplicações, é distribuída como um pacote de *software* gratuito de código aberto; desse modo, um usuário versado pode desenvolver e distribuir suas próprias aplicações. As aplicações oferecidas são divididas em duas categorias: os *solvers*, encarregados de realizar a simulação numérica em si, e os utilitários, que realizam operações de pré ou pós-processamento. A versão do pacote utilizada neste trabalho foi a 2112.

O OpenFOAM oferece uma vasta gama de *solvers*, cada um se especializando na simulação de certos tipos de problemas. Existem *solvers* focados em problemas de transferência de calor, escoamentos multifásicos, escoamentos supersônicos, e até mesmo alguns especializados em situações particulares como cavitação. Assim, a escolha do *solver* requer compreensão dos fenômenos físicos relevantes à situação a ser simulada, bem como de aproximações válidas. O problema abordado neste relatório é, como definido na seção 2.1, um escoamento aproximadamente incompressível, turbulento, permanente, viscoso, monofásico e sem transferências de calor ou reações químicas. Portanto, o simpleFOAM foi adotado para todas as simulações apresentadas nesse relatório. Em trabalhos posteriores, será relevante o uso de um *solver* transiente para visualização dos vórtices de ponta de asa que surgem em modelos de moto com asa.

O OpenFOAM não possui interface gráfica; suas aplicações devem ser executadas em linha de comando, e a configuração do caso é feita pela edição de arquivos de texto denominados dicionários. No apêndice são apresentados os dicionários utilizados nas simulações deste trabalho. A organização dos arquivos em uma simulação no OpenFOAM pode ser caracterizada por três grupos, descritos abaixo:

- A pasta **system** contém os arquivos de dicionário, que como já mencionado agem como meio de configurar a operação das diversas aplicações do OpenFOAM. Cada programa utilizado tem seu próprio dicionário, que é requerida para sua utilização. Porém, alguns dicionários são necessários em praticamente qualquer problema: o `controlDict`, que rege a marcha temporal, o número de iterações e o formato de registro dos resultados da simulação; o `fvSchemes`, que define o algoritmo utilizado para cálculo de termos envolvendo derivadas, gradientes, divergências e laplacianos; e o `fvSolution`, que define o *solver* a ser utilizado, bem como as margens de tolerância para convergência.
- A pasta **constant**, como já insinua o nome, armazena parâmetros que se mantêm constantes durante toda a simulação. Isso inclui a geometria do problema, propriedades do fluido, parâmetros relativos a turbulência, entre outros.
- Os **diretórios de tempo** são pastas criadas ao longo da simulação, com arquivos que descrevem os campos de pressão, velocidade e demais variáveis relevantes em todo o volume de controle para um dado instante da simulação. Mesmo em simulações de regime permanente, são criados diversos diretórios de tempo; porém, nesse caso cada um deles representa uma etapa de iteração do *solver*. Dentre eles, vale destacar a exceção: a pasta de tempo 0, que armazena as condições iniciais e de contorno do escoamento e é portanto necessária para iniciar uma simulação.

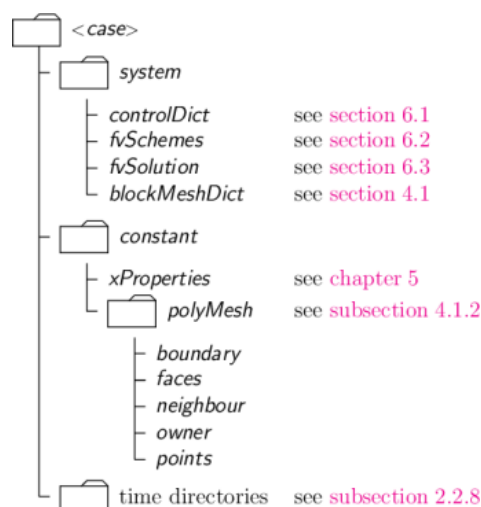


Figura 3.7: Ilustração da organização dos arquivos em uma pasta de simulação OpenFOAM [OpenCFD 2022]

### 3.5 Criação da Malha

Antes de detalhar o processo de criação de malha, é importante descrever algumas características gerais sobre a geração de malhas no OpenFOAM. Malhas geradas pelas utilidades do OpenFOAM mencionadas neste trabalho são não estruturadas e possuem elementos hexaédricos. Malhas não estruturadas, embora mais complexas geometricamente, oferecem maior flexibilidade quanto à forma e concentração de elementos [Moukalled et al. 2015], o que muitas vezes reduz o custo computacional da simulação. Quanto à forma do elemento, a hexaédrica é uma das mais comuns em casos 3D, juntamente com a tetraédrica [Versteeg and Malalasekra 2007].

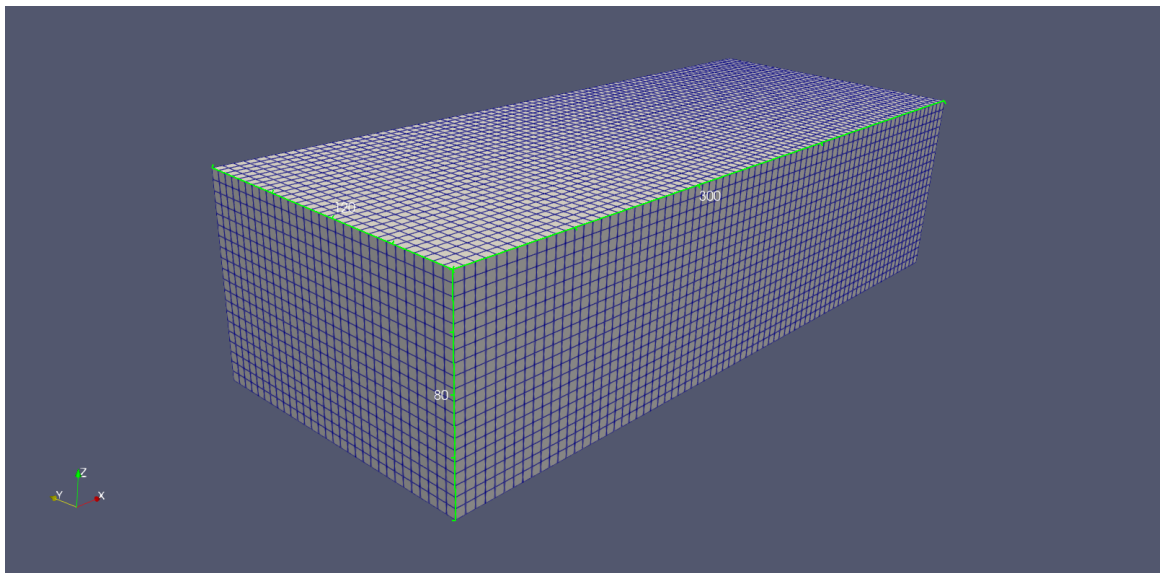
Para gerar a malha a ser usada na simulação, foram utilizadas três aplicações do OpenFOAM: o `blockMesh`, o `surfaceFeatureExtract` e o `snappyHexMesh` (referido a partir desse ponto como SHM).

O `blockMesh` é uma utilidade capaz de gerar malhas hexaédricas, com elementos de arestas retas ou curvas, baseadas em geometrias paramétricas descritas pelo usuário. Dado devido esforço e tempo, é uma ferramenta que pode ser utilizada para gerar malhas com geometrias demasiadamente complexas; porém, em geral, essa é um tarefa para qual o SHM é mais apropriado. Neste trabalho, ele é utilizado apenas para gerar a malha do volume de controle, que servirá como base para o SHM. O volume de controle adotado é um paralelepípedo de dimensões 300x120x80m, visando obter uma simulação similar à de [Gonçalves 2023]. A malha gerada é composta por elementos cúbicos de 0,5m de lado. Essas dimensões são ilustradas na figura 3.8. O `blockMesh` também nomeia e delimita regiões de superfície da malha, o que será importante posteriormente na definição das condições de contorno.

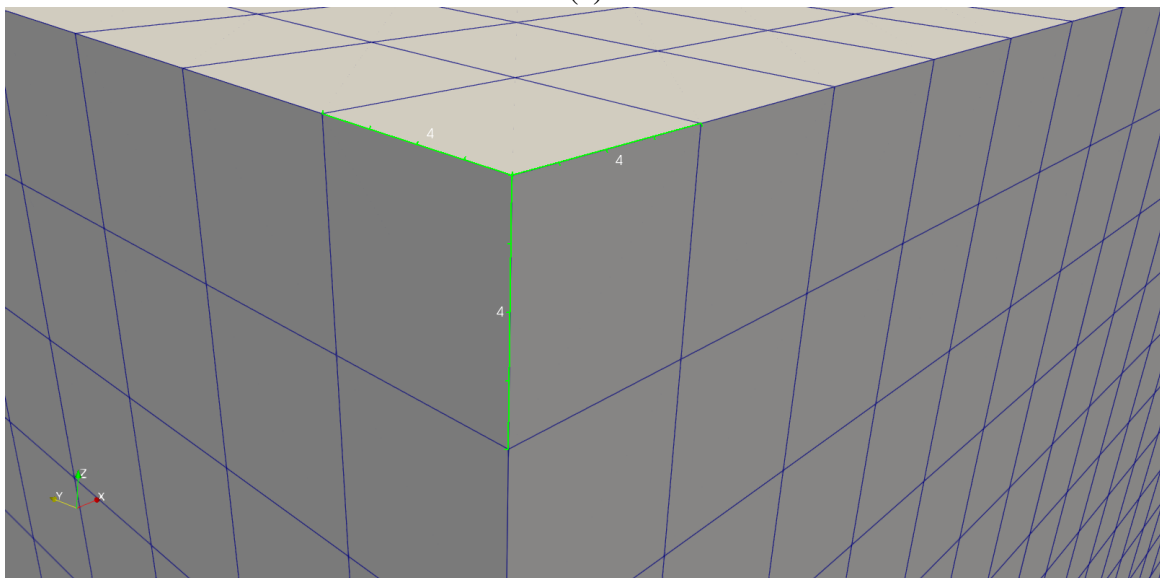
O `surfaceFeatureExtract` gera uma superfície a partir de um modelo sólido 3D, fornecido em arquivos de formato `.stl` ou `.obj`. Essa superfície permite que o SHM incorpore o sólido à malha gerada pelo `BlockMesh`. Neste trabalho, a utilidade foi aplicada ao modelo CAD da Yamaha YZF R1 2004, que também inclui o motociclista e é ilustrado na figura 3.9 abaixo.

O SHM é a utilidade mais complexa das três, sendo inclusive a única delas que suporta execução em paralelo. Como mencionado no parágrafo anterior, o papel do SHM é gerar malhas hexaédricas com geometria que se conforma à superfície de um modelo 3D fornecido pelo usuário. Para isso, o SHM requer uma malha hexaédrica utilizada como base (geralmente gerada pelo `BlockMesh`, mas malhas geradas por outros programas também podem ser utilizadas) e dados de superfície obtidos pelo `SurfaceFeatureExtract`. Ele é dividido em três etapas: `castellatedMesh`, `snap` e `addLayers`. Essas etapas podem ser desabilitadas individualmente, ou executadas em conjunto.

A primeira etapa, `castellatedMesh`, é a mais extensa, sendo essencialmente composta por três sub-etapas ilustradas na figura 3.10. Primeiramente, é realizado um refino das células no entorno da superfície do sólido utilizado. O método de refino utilizado é uniforme nos três



(a)



(b)

Figura 3.8: Ilustração e dimensões da malha do BlockMesh, visualizada no Paraview: (a) Volume de controle completo (b) Elemento único

eixos cartesianos e aplicável apenas a hexaedros, por isso a malha de base utilizada deve ser hexaédrica [Maric et al. 2014]. Em seguida, esses elementos são analisados, e aqueles cujo volume esteja majoritariamente contido no interior da superfície são removidos. Elementos não refinados no interior da superfície são também removidos.

Por fim, é possível delimitar parametricamente regiões volumétricas de refino, não relacionadas com a geometria do sólido utilizado. Foram utilizadas três regiões de refino distintas, com forma de paralelepípedo e de dimensões ilustradas nas figuras 3.11 e 3.12.

Ambas as etapas de refino diminuem as dimensões de cada elemento pela metade por nível de refino; por exemplo, um elemento cúbico de 1m de lado, ao ser refinado até o nível 3, será substituído por elementos cúbicos de lado 0,125m. Aqui foram adotados níveis de



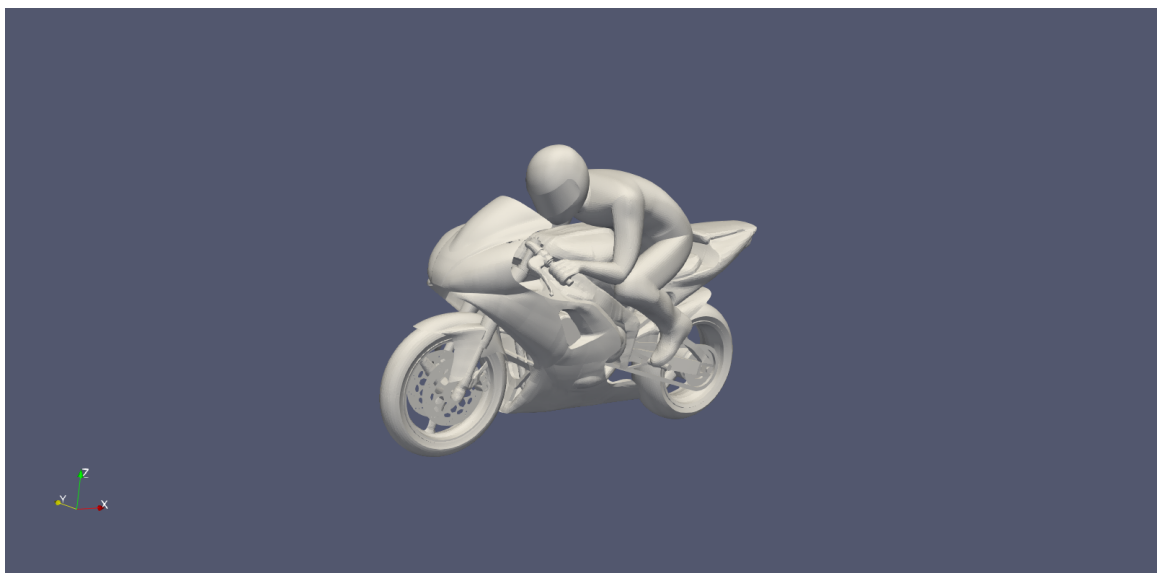


Figura 3.9: Visualização no Paraview do modelo CAD da motocicleta sem asa usado para gerar a malha

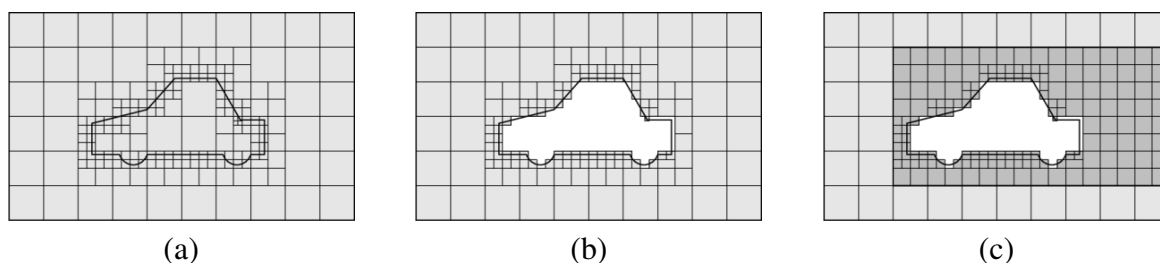


Figura 3.10: Visualização das etapas do CastellatedMesh: (a) Refino na superfície (b) Remoção de elementos (c) Refino em região delimitada [OpenCFD 2022]

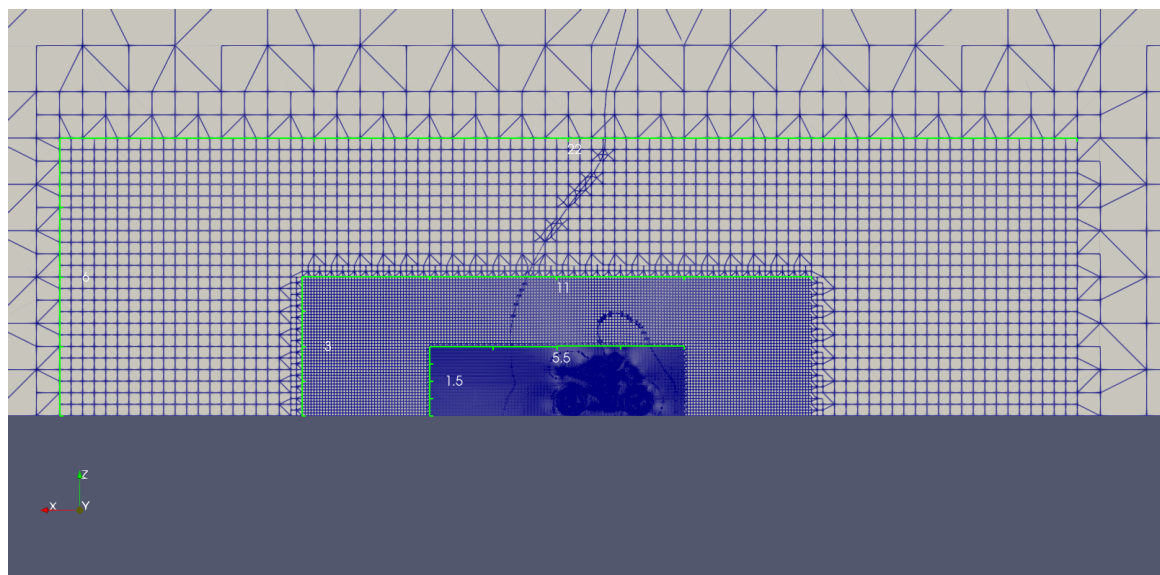


Figura 3.11: Regiões de refino utilizadas, com dimensões ilustradas em metros, visualizadas no Paraview - vista lateral

refino de 10 para a superfície e 7, 6 e 4 para as diferentes regiões de refino. Por fim, o castellatedMesh gera regiões nomeadas que poderão ser referenciadas pelo próprio SHM ou

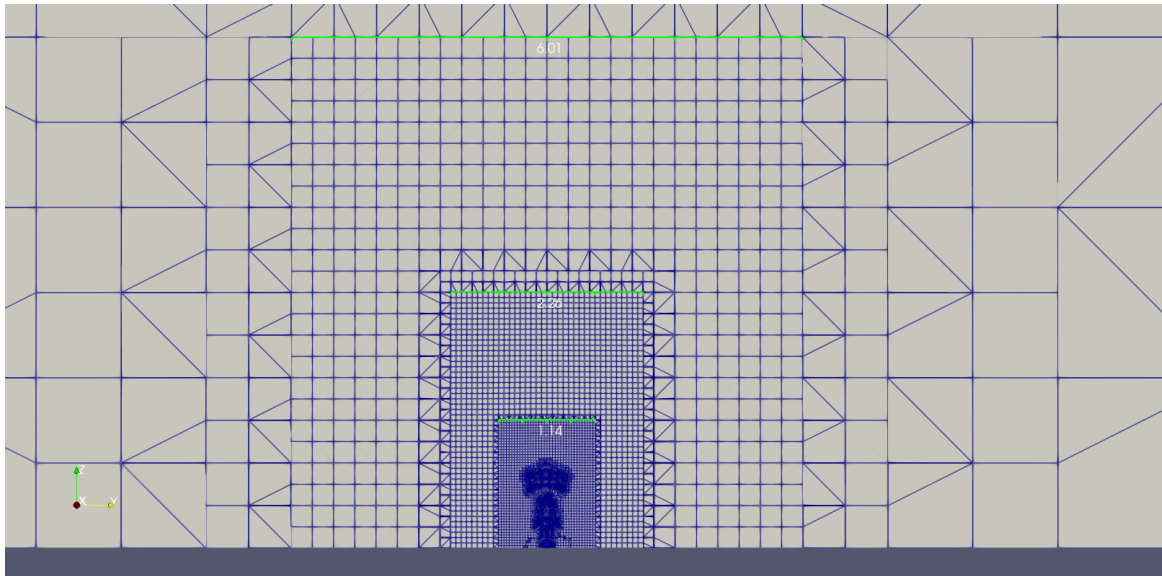


Figura 3.12: Regiões de refino utilizadas, com dimensões ilustradas em metros, visualizadas no Paraview - vista frontal

outros utilitários do OpenFOAM, assim como o blockMesh. Além de regiões definidas pelo próprio usuário, também são criadas regiões com base nas superfícies nomeadas já presentes no arquivo CAD.

A segunda etapa, **snap**, almeja conformar a malha obtida na etapa anterior à superfície do sólido utilizado como base, obtendo assim uma superfície mais lisa. Para tal fim, ela desloca os vértices dos elementos de superfície da malha até a superfície da geometria, deformando esses elementos no processo. A figura 3.13 ilustra o resultado dessa etapa de geração da malha, ilustrando a conformação dos elementos à superfície da moto.

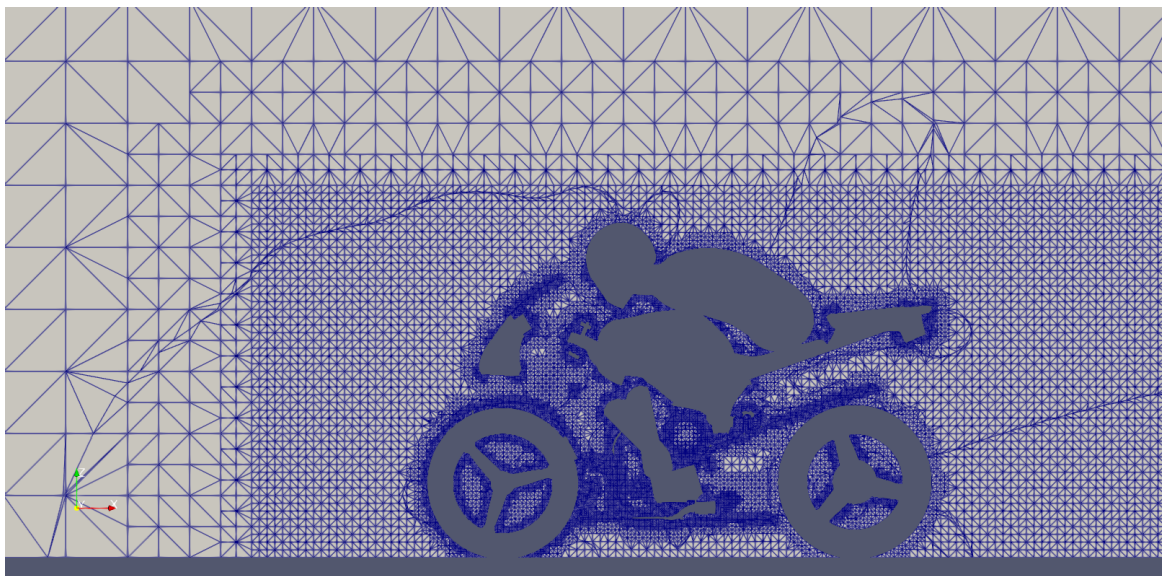


Figura 3.13: Corte transversal de uma malha gerada após a etapa Snap, visualizada no Paraview

A etapa final, **addLayers**, adiciona camadas de células hexaédricas paralelas à superfície

especificada. Embora seja opcional no que tange a gerar uma malha, é uma etapa importante para permitir que a simulação capture efeitos da camada limite sobre o escoamento. Foram geradas cinco camadas de malha sobre a superfície da motocicleta; a malha de camada é ilustrada na figura 3.14.

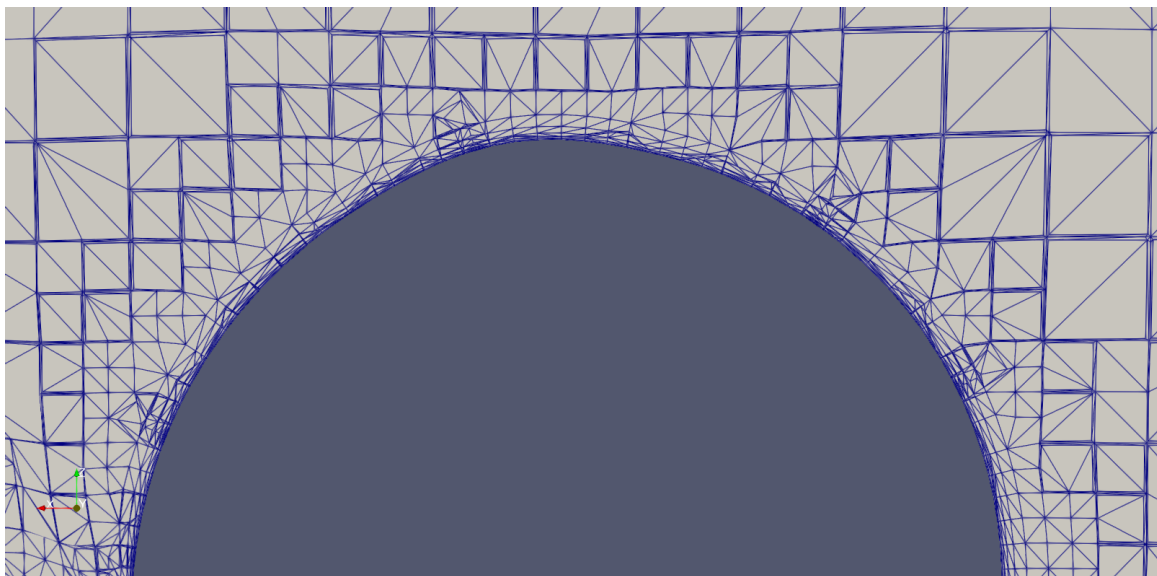


Figura 3.14: Corte transversal de uma malha gerada após a etapa `addLayers`, visualizada no Paraview

Vale observar que o número de camadas utilizado não é ideal para simulação da camada limite; seria necessário um maior número de camadas para cobrir toda a espessura esperada da camada limite. Porém, dois limitantes impediram o uso de um número maior de camadas. Primeiramente, o número de elementos se tornaria excessivo para malhas que retratam duas motocicletas. Além disso, o SHM apresenta dificuldade em gerar um número elevado de camadas de malha com qualidade aceitável, e portanto a cobertura obtida seria precária.

Embora o procedimento apresentado gere a malha para simulação de situações com uma única moto isolada, o procedimento para gerar malhas com duas motos é idêntico, necessitando apenas dos arquivos `.stl` ou `.obj` referentes à modelagem da segunda moto. Porém, para casos de duas motos com alto distanciamento entre as motos (acima de 200cm na direção  $x$ , ou acima de 30cm na direção  $y$ ), a região de refino de nível 7 foi dividida de modo a encobrir por completo ambas as motos. A figura exemplifica a divisão realizada. Foram criadas regiões de 3m de comprimento para a moto frontal e 2,5m para a traseira, com espaçamento 50cm menor que o espaçamento entre motos para distâncias longitudinais, e igual ao espaçamento entre motos para distâncias laterais.

As malhas foram geradas no nó de visualização do *cluster* Amadea, localizado no Laboratório de Aeroacústica Computacional (CAA lab) da Universidade de Brasília. O *cluster* conta com nove nós; um para visualização, e os oito restantes para cálculo. O nó de visualização conta com uma placa de vídeo Nvidia Quadro P5000, 256GB de memória RAM e dois processadores Xeon E5 2620V4 totalizando 32 *threads*. Quanto aos nós de cálculo, cada um conta com 116GB de RAM e um processador Intel Xeon Phi 7230, de modo que cada nó

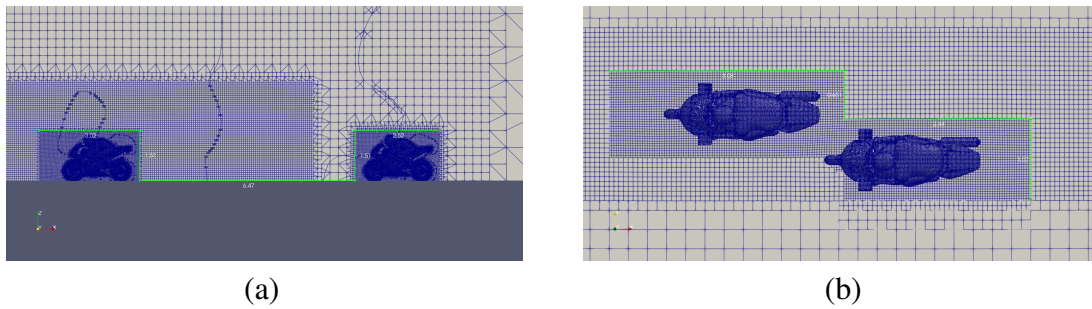


Figura 3.15: Malha gerada para caso de duas motos com asa, com distância entre motos (a) longitudinal de 700cm (b) lateral de 60cm

possui 256 *threads* e 64 *cores*. O conjunto conta ainda com 1TB de memória SSD e 1TB de memória HDD.

### 3.6 Configurações de Simulação

Antes de descrever a simulação em si, serão mostradas as condições de contorno utilizadas. A superfície do volume de controle perpendicular ao eixo  $x$  e anterior à motocicleta foi tratada como uma entrada uniforme de ar com valor fixo; a posterior foi denominada a saída. O chão foi tratado como uma parede sólida, submetido à condição de parede móvel de velocidade igual à do escoamento. Às demais superfícies do volume de controle foi aplicada uma condição de escorregamento, Sobre a motocicleta, foi aplicada uma condição de não escorregamento; ou seja, de parede com velocidade nula. A exceção é a superfície das rodas, onde foi aplicada uma condição de parede rotativa, com velocidade angular tal que a velocidade tangencial na extremidade inferior do pneu equivale à velocidade do escoamento, de modo a representar sua rotação no movimento real do veículo. Os valores utilizados são ilustrados na figura 3.16 abaixo.

Vale notar que essas condições de contorno para a velocidade adotam o motociclista como referencial; isso é interessante pois ele é mantido fixo na malha, permitindo simular um estado de escoamento permanente. Caso fosse considerado um referencial sobre a pista de corrida, seria necessário o uso de uma malha dinâmica, movendo a porção da malha referente à moto ao longo do tempo e requerindo portanto uma abordagem transiente, aumentando drasticamente o custo computacional e a complexidade do caso. Como condições iniciais, são adotados campos uniformes de pressão, velocidade e dos parâmetros de turbulência, com a velocidade do campo sendo igual à do escoamento livre.

A tabela 3.1 mostra os valores adotados para algumas propriedades importantes do escoamento. Vale notar que os *solvers* incompressíveis do OpenFOAM, por padrão, trabalham com uso de pressão relativa, e não absoluta. Portanto, não foi necessário definir o nível de pressão atmosférica adotado.

O solver adotado, simpleFOAM, tem como base o algoritmo SIMPLE (*Semi-Implicit*



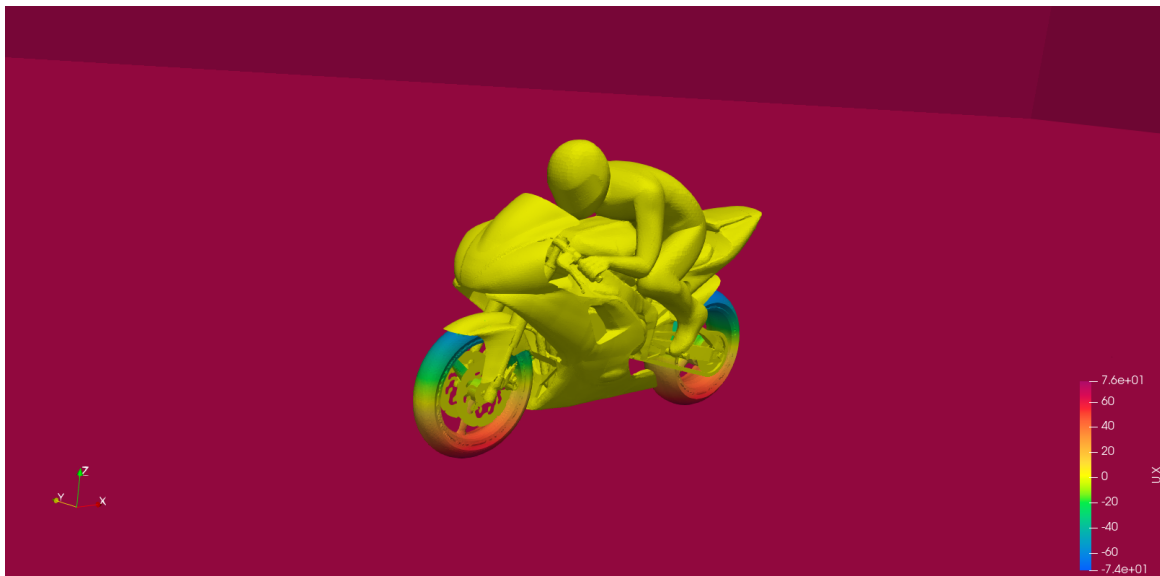


Figura 3.16: Visualização no Paraview das condições de contorno na superfície para a velocidade do escoamento no eixo x

Velocidade do Escoamento	70 m/s
Rotação da Roda Dianteira	-225,8064 rad/s
Rotação da Roda Traseira	-229,5081 rad/s
Viscosidade Cinemática	1,436E-5 Pa.s
Massa Específica	1,2886 kg/m <sup>3</sup>
Comprimento Característico	1,42 m
Área de seção frontal	0,644384 m <sup>2</sup>
Número de Reynolds	6,92E+6

Tabela 3.1: Valores relevantes à simulação

*Method for Pressure-Linked Equations*); especificamente, a variante SIMPLEC. Nele, a solução do escoamento é encontrada de forma iterativa pela geração de campos de pressão e velocidade que consecutivamente satisfazem as equações de momento e continuidade, gradualmente se aproximando da solução final que satisfaz ambas [Moukalled et al. 2015]. A variante SIMPLEC estima o valor de correção de velocidade, desprezado no método original, com base em valores de correção de elementos vizinhos. Assim, o procedimento geral é mantido, mas uma taxa de convergência superior é obtida. O simpleFOAM utiliza o método RANS para simulação de turbulência, com suporte a diversos modelos de turbulência; como abordado em 3.3, nas simulações deste trabalho foi adotado o modelo  $k-\omega$ -SST.

O *cluster* Amadea, descrito no fim da seção 3.5 e utilizado na etapa de geração de malhas, foi também utilizado para rodar o *solver*. Porém, a presente etapa foi realizada em um nó de cálculo do *cluster*, que como já descrito possui capacidade computacional vastamente superior. Isso contribui para a agilidade na realização dos testes, visto que a etapa de simulação é a que mais demanda tempo e poder computacional.

## 3.7 Pós-processamento

Algumas utilidades de pós-processamento são fornecidas já por aplicações do próprio OpenFOAM. Por exemplo, foram utilizadas nas simulações desse relatório as utilidades *yPlus* e *forceCoeffs*, que calculam respectivamente o coeficiente  $y^+$  e os coeficientes adimensionais aerodinâmicos do escoamento. Porém, para visualização do escoamento em modelo tridimensional, é necessário utilizar outro programa. Embora o OpenFOAM apresente métodos de exportar os resultados da simulação para diversos programas, a maior compatibilidade é apresentada pelo programa Paraview, que foi portanto escolhido.

O Paraview é um *software* de código aberto de visualização de pós-processamento, e é compatível com diversas ferramentas de simulação numérica. É um programa com aplicações em simulações relativas a diversas áreas, e portanto uma discussão extensa sobre todas as suas funcionalidades foge ao escopo deste relatório. Ele será usado principalmente para visualização gráfica da malha (como já ilustrado em seção anterior), dos campos de velocidade e pressão do escoamento e de algumas linhas de corrente. O Paraview possui integração direta com o OpenFOAM por meio da utilidade *paraFoam*, mas também pode ser utilizado para visualizar casos OpenFOAM mesmo sem uso dessa utilidade.

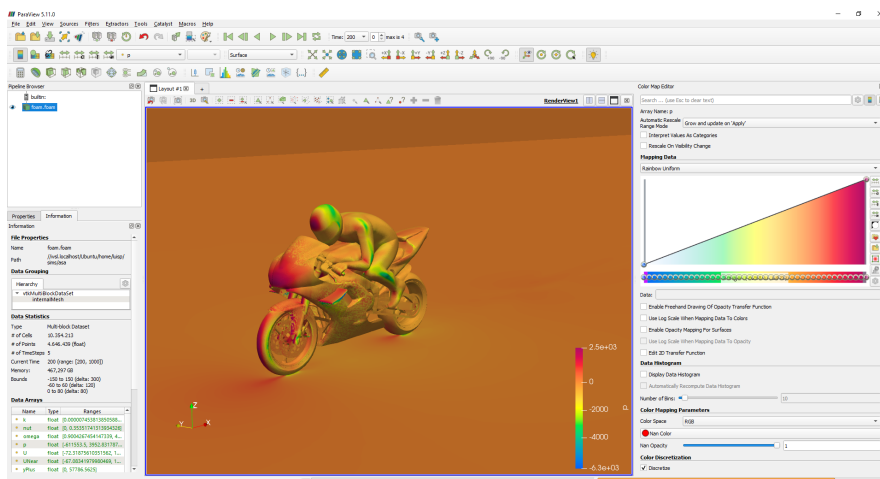


Figura 3.17: Interface de usuário do Paraview

Por fim, foram utilizados alguns simples *scripts* programados em Python para tratar os dados fornecidos pelos *logs* do *simpleFoam*, permitindo uma estimativa mais precisa dos coeficientes aerodinâmicos obtidos.

# Capítulo 4

## Resultados e Discussões

Agora que foram apresentadas tanto a teoria física por trás do fenômeno estudado quanto a metodologia de simulação adotada durante o trabalho, resta apenas apresentar e interpretar os resultados obtidos. É a isso que se dedica este capítulo.

### 4.1 Moto Isolada

Primeiramente, é realizada a simulação do escoamento em torno de uma única moto isolada. Essa simulação base tem dois principais objetivos. Primeiro, verificar a coerência do escoamento gerado pela simulação, por meio de um caso mais simples que os demais, permitindo verificar fenômenos já esperados. Segundo, obter os valores dos coeficientes aerodinâmicos, de modo a permitir comparação com valores calculados em situações mais complexas.

#### 4.1.1 Malha Gerada

As características das malhas geradas são representadas pela tabela 4.1. O critério de cobertura da malha de camada representa a fração da malha de camada desejada que o SHM foi capaz de gerar atendendo os critérios de qualidade delimitados. Elementos que não atendem a ditos critérios de qualidade não são gerados.

Caso	Nº de elementos	Nº de nós	Cobertura da malha de camada (%)
Sem asa	12.918.230	6.132.328	79,9931
Com asa	10.525.297	4.770.152	76,3435

Tabela 4.1: Características da malha gerada para cada caso de simulação

O maior número de elementos gerados no caso da moto sem asa se deve ao volume ocupado pela asa. Como os elementos são gerados no espaço externo à superfície da motocicleta, todo o volume ocupado pela asa é volume no qual elementos não precisam ser gerados para

a moto com asa, reduzindo portanto o número total. A menor cobertura na malha de camada também contribui para a diferença, embora ela ainda seja satisfatória em ambos os casos.

É importante constatar que, para obter uma malha de camada satisfatória, foi necessário relaxar os critérios de qualidade de malha aplicados durante a etapa final do SHM. Isso resulta em duas principais consequências. Primeiramente, há a possibilidade de surgimento de erro numérico em decorrência da qualidade de malha reduzida. Além disso, para maximizar a qualidade da malha final, se torna necessário a execução do SHM duas vezes distintas para gerar uma única malha, com a etapa de `addLayers` sendo executada separadamente com os critérios de qualidade relaxados.

Foi também realizado um estudo de independência de malha para o caso da moto sem asa. Foram criadas malhas com diferentes números de elementos variando o nível de refino na superfície, nas regiões de refino, e o número de malhas de camada. Os resultados, analisados pelo valor de  $C_D$  (cujo cálculo é elaborado em 4.1.3.1) obtido em cada simulação. Os resultados são apresentados na figura 4.1.

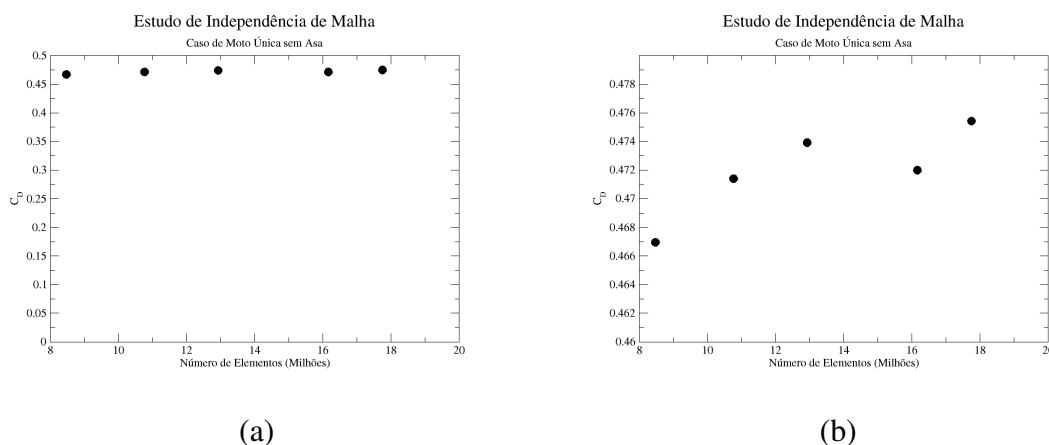


Figura 4.1: Dados obtidos no estudo de independência de malha, apresentados em diferentes escalas

Com exceção da malha de 8 milhões de elementos, todas as malhas testadas apresentaram diferença inferior a 1% no valor do  $C_D$ , o que indica a convergência. Assim, a malha de 12,9 milhões de elementos escolhida é válida. Além disso, como é a malha mais compacta na região de convergência que apresenta 5 malhas de camada (a de 10 milhões de elementos apresenta apenas 4), é também a melhor escolha dentre as malhas analisadas.

## 4.1.2 Estudo do Particionamento

Idealmente, em situações de processamento paralelo, haveria uma relação diretamente proporcional entre número de *cores* utilizados e velocidade de processamento. Porém, na prática, essa relação não se mostra verdadeira. Em alguns casos, a necessidade de comunicação entre os processos paralelos pode até mesmo fazer com que um particionamento excessivo leve a prejuízos no tempo de computação.



No intuito de otimizar simulações futuras, foi feita uma breve análise do efeito do particionamento na velocidade da simulação. Para isso, foram realizadas simulações de 100 iterações para o caso de moto sem asa, utilizando diferentes quantidades de partições. O tempo de simulação para cada caso foi registrado, e o resultado é apresentado na figura 4.2. Os valores testados foram potências de 2 e múltiplos de 50, até o limite de *cores* de um único nó do *cluster* Amadea, que é 256. Porém, a simulação utilizando 256 partições falhou, possivelmente por limitações de RAM.

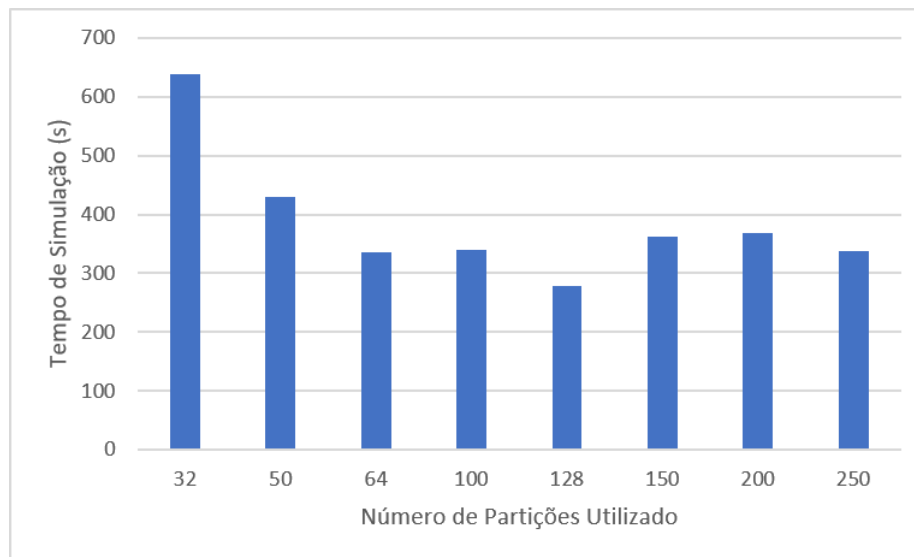


Figura 4.2: Gráfico ilustrando o tempo de simulação para os diferentes tipos de particionamento.

Conclui-se que o uso de 128 partições é o mais favorável para uma simulação com número total de elementos na faixa adotada neste trabalho. Esse resultado é coerente, visto que apesar de que cada nó possua 256 *cores*, apenas 128 destes são de cálculo vetorial.

### 4.1.3 Resultados de Simulação

#### 4.1.3.1 Tempo de Simulação e Coeficientes Aerodinâmicos

Em razão da natureza complexa da geometria do caso, não haverá convergência total da solução da simulação; ela irá convergir a uma faixa de soluções, dentro da qual ficará oscilando. Tendo isso em mente, foram inicialmente realizadas simulações de 1000 iterações para cada caso. O tempo de simulação é representado na tabela 4.2.

Caso	Nº de iterações	Tempo decorrido (s)
Sem asa	1000	2725
Com asa	1000	2085

Tabela 4.2: Tempo de simulação por caso

A convergência da simulação é apresentada na figura 4.3 para a moto sem asa e 4.4 para a moto com asa. Vemos que o número inicial de 1000 foi suficiente, com a convergência no arrasto sendo atingida em cerca de 200 iterações, e nos demais coeficientes em cerca de 500 iterações. Logo, os coeficientes foram calculados pela média do valor nas 500 iterações finais.

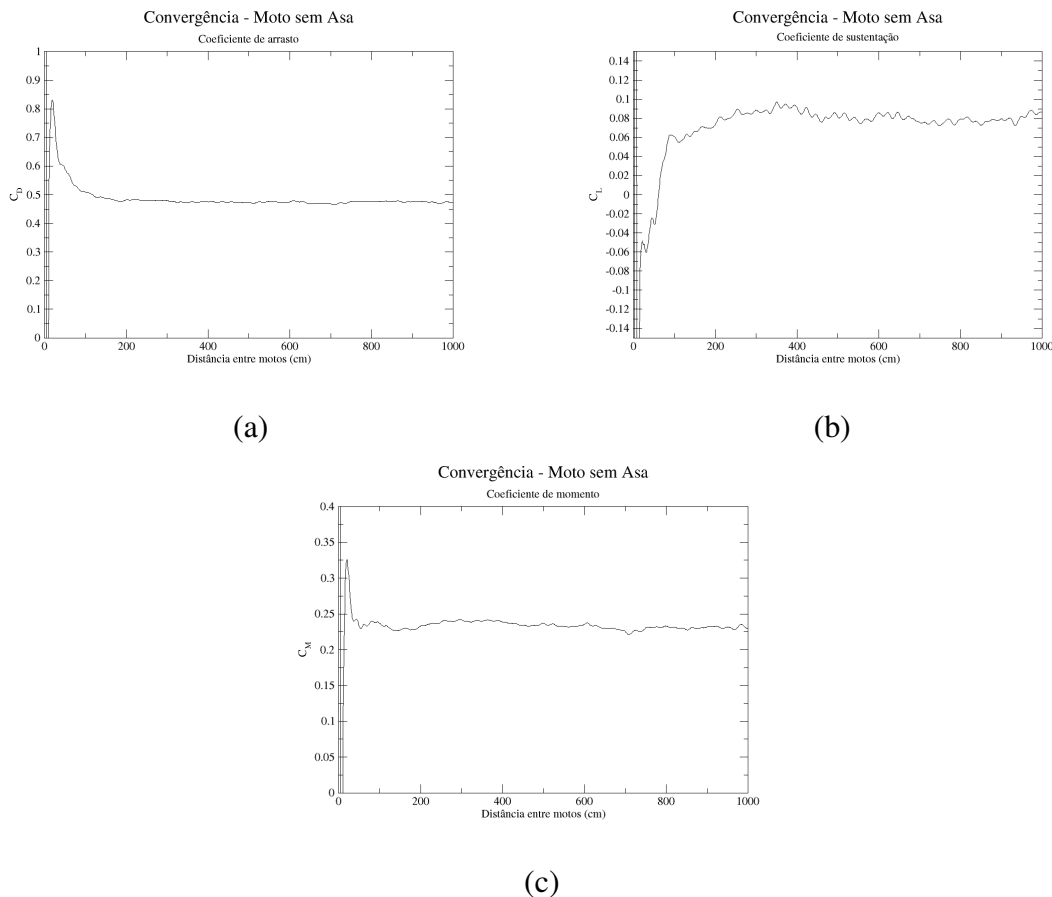


Figura 4.3: Gráficos de convergência para a moto sem asa - (a)  $C_D$  (b)  $C_L$  (c)  $C_M$

Como o `forceCoeffs` fornece tanto o coeficiente total quanto as parcelas originárias de efeitos de pressão e viscosos, todos esses valores foram listados na tabela 4.3. Vale apontar que o momento de arfagem foi calculado usando o centro de rotação da roda traseira, e portanto representa uma tendência de empinamento por parte da motocicleta. Também se constata a dominância dos efeitos de pressão sobre os de viscosidade, tal como esperado para um escoamento de número de Reynolds elevado.

Os coeficientes aerodinâmicos obtidos podem agora ser comparados aos obtidos por [Gonçalves 2023], apresentados na tabela 4.4 juntamente aos valores obtidos no presente trabalho. Evidentemente, apesar de valores próximos de coeficiente de arrasto, há uma discrepância drástica entre os valores obtidos para os coeficientes de sustentação e momento de um mesmo caso. Isso sugere que ao menos uma das simulações não resultou em uma representação fiel da realidade. É válido notar, porém, que tanto os valores obtidos pelo presente trabalho quanto aqueles obtidos por [Gonçalves 2023] seguem relações coerentes com

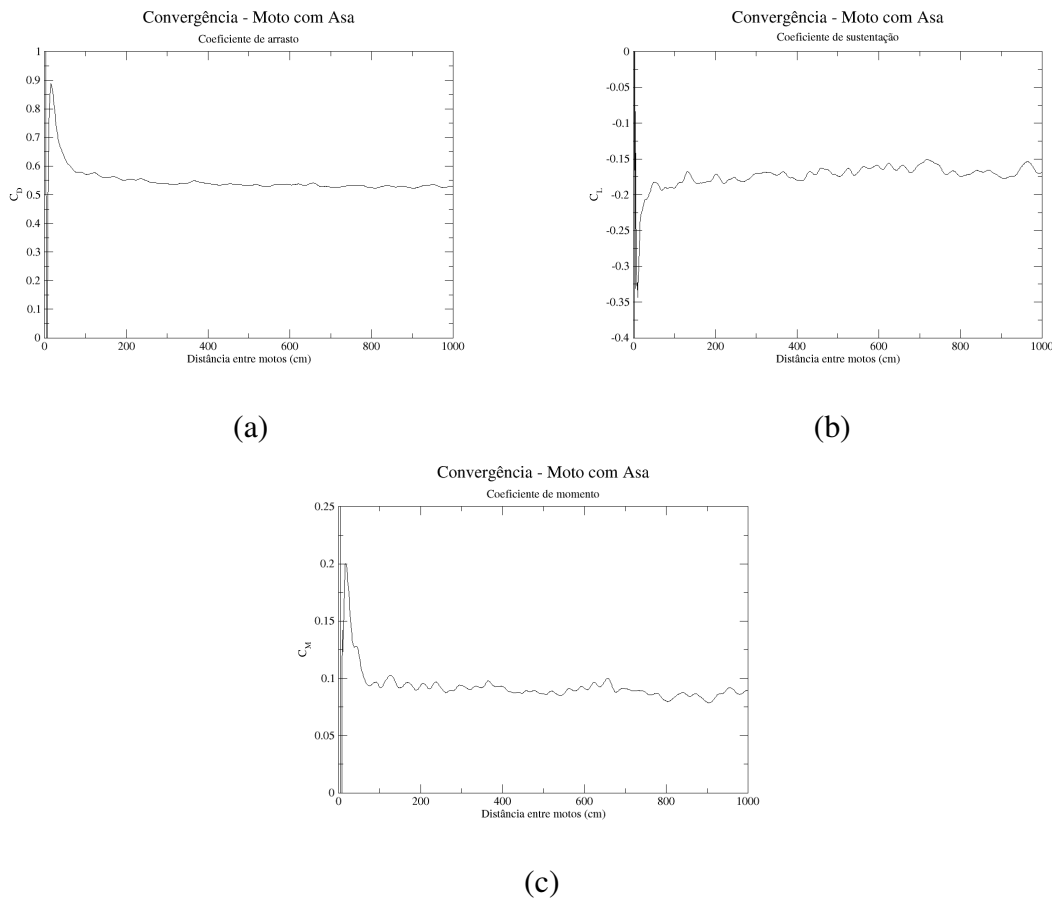


Figura 4.4: Gráficos de convergência para a moto com asa - (a)  $C_D$  (b)  $C_L$  (c)  $C_M$

Caso	$C_D$	$C_L$	$C_M$
Sem asa	0,47394 (total)	0,07928 (total)	0,23099 (total)
	0,45733 (pressão)	0,07999 (pressão)	0,22298 (pressão)
	0,01661 (viscoso)	-0,00071 (viscoso)	0,00801 (viscoso)
Com asa	0,53056 (total)	-0,16545 (total)	0,08791 (total)
	0,51329 (pressão)	-0,16609 (pressão)	0,07873 (pressão)
	0,01727 (viscoso)	0,00064 (viscoso)	0,00919 (viscoso)

Tabela 4.3: Coeficientes aerodinâmicos calculados

a teoria apresentada:

- O coeficiente de arrasto possui dado valor para o caso sem asa, e um valor superior para o caso com asa. Isso é esperado, pois a adição da asa leva ao surgimento de arrasto induzido.
- O coeficiente de sustentação é positivo para o caso de moto sem asa, e negativo para o de moto com asa. Visto que a asa é adicionada com intuito de gerar *downforce*,
- O coeficiente de momento mostra uma tendência de empinamento da moto, amenizada pela adição da asa. Novamente, em se tratando de uma asa que gera *downforce*, esse comportamento segue a expectativa teórica.

Caso	$C_D$	$C_L$	$C_M$
Sem asa	0,47394	0,07928	0,23099
Sem asa - Gonçalves	0,47212	0,04197	0,11457
Com asa	0,53056	-0,16545	0,08791
Com asa - Gonçalves	0,55385	-0,12160	0,01682

Tabela 4.4: Coeficientes aerodinâmicos calculados - Comparação com valores de [Gonçalves 2023]

Portanto, não é possível determinar qual conjunto de valores é uma melhor representação da realidade sem acesso a dados experimentais para validação. Porém, resultados apresentados nas seções seguintes mostram que os resultados obtidos neste trabalho são de maior qualidade.

Comparando coeficientes obtidos com outros trabalhos, os valores de  $C_D$  obtidos por [Wiński and Piechna 2022] para uma moto sem asa foram de 0,3867 para o motociclista em posição aerodinâmica e 0,5330 para o motociclista levantado. Pela visualização dessas posições na figura 4.5, nota-se que a posição adotada pelo motociclista do modelo utilizado neste trabalho é uma posição intermediária entre essas duas, e portanto um valor de arrasto intermediário entre os dois é coerente. O valor de  $C_L$ , porém, é de -0,0062 para o motociclista em posição aerodinâmica e 0,0194 para o motociclista levantado, havendo portanto forte discrepância com o valor de 0,07928 encontrado neste trabalho. Esta diferença, porém, pode ser consequência das diferentes motos utilizadas em cada trabalho.

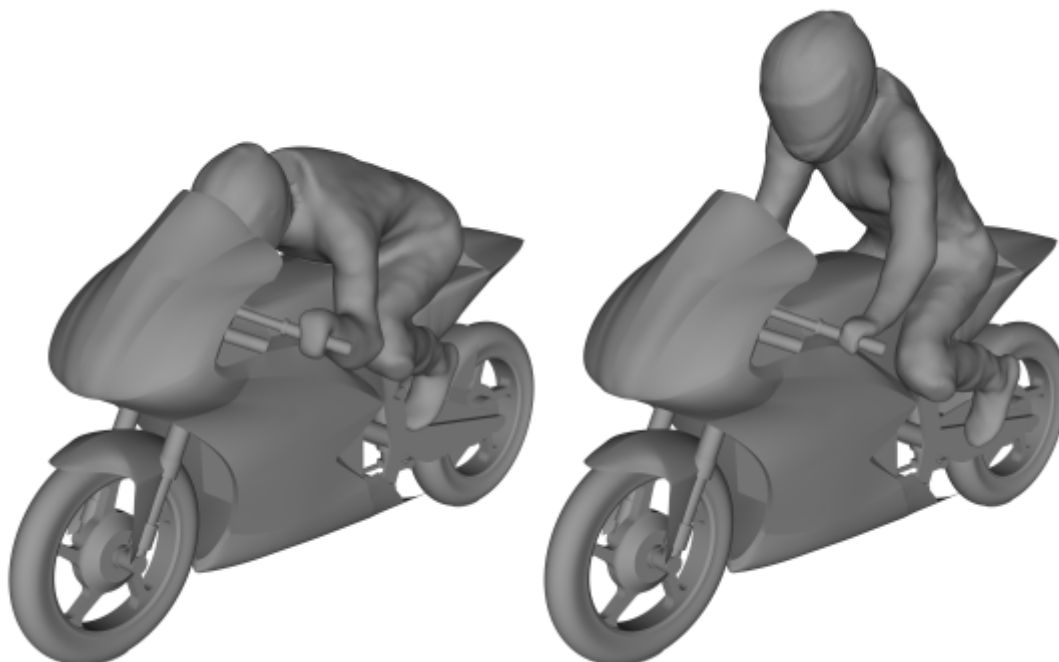


Figura 4.5: Posições do motociclista adotadas por [Wiński and Piechna 2022]; aerodinâmica à esquerda e levantada à direita

Já os coeficientes obtidos por [Peri and Capuana 2021] são de 0,43 em  $C_D$  e -0,045 em  $C_L$  para motos sem asa. Para motos com asa, diversas, foram obtidos valores entre 0,46 e 0,48 para o  $C_D$ , e entre -0,15 e -0,27 para o  $C_L$ . Esses valores já divergem mais dos obtidos neste trabalho; porém, a motocicleta usada como modelo é distinta, o que naturalmente irá gerar diferenças. Uma observação interessante, porém, é que o ganho de downforce e aumento no arrasto com a adição da asa foi consistente entre os trabalhos; resultados da tabela 4.3 mostram um aumento de cerca de 0,05 no  $C_D$  e uma diminuição de cerca de 0,23 no  $C_L$ , enquanto que [Peri and Capuana 2021] indicam um aumento entre 0,3 e 0,5 no  $C_D$  e uma diminuição entre 0,15 e 0,27 no  $C_L$ .

Assim, embora existam discrepâncias entre valores obtidos em outros trabalhos, principalmente no que tange ao  $C_L$  da moto sem asa, muitas dessas podem ser explicadas por diferença nos modelos de moto utilizados. Além disso, as tendências gerais observadas em outros trabalhos são mantidas aqui, mostrando a coerência dos resultados obtidos.

Foram também calculados os coeficientes laterais e de rolamento, apresentados na tabela 4.5. Como esperado pelo perfil quase simétrico do escoamento, os valores obtidos são reduzidos. Embora pouco relevantes na análise do caso de moto única, esses valores serão relevantes para comparação com valores obtidos em situações com duas motos.

Caso	$C_S$	$C_S$
Sem asa	0,01638	-0,01093
Com asa	0,04206	-0,02566

Tabela 4.5: Coeficientes aerodinâmicos tridimensionais calculados

#### 4.1.3.2 Visualização do Parâmetro $y^+$

Como previamente discutido na seção 2.3, um valor reduzido de  $y^+$  nos elementos de contorno da superfície é crucial para a representação fiel dos fenômenos de camada limite em uma simulação. Assim, é interessante o ajuste da malha de modo a obter o mínimo valor de  $y^+$  possível sem negativamente afetar demais aspectos da simulação. Pela utilidade  $yPlus$  do OpenFOAM, é possível visualizar os valores de  $y^+$  calculados ao longo da superfície da moto, ilustrados nas figuras 4.6 e 4.7.

Em termos quantitativos, foram obtidos valores no entorno de 10 para a carenagem da motocicleta, 25 para o corpo do motociclista e 40 para a superfície frontal da roda dianteira. Para um caso de geometria complexa, esses valores podem ser considerados satisfatórios. Como pode ser visualizado, esses valores se elevam drasticamente em regiões com cobertura precária da malha de camada, que são em geral arestas da geometria.

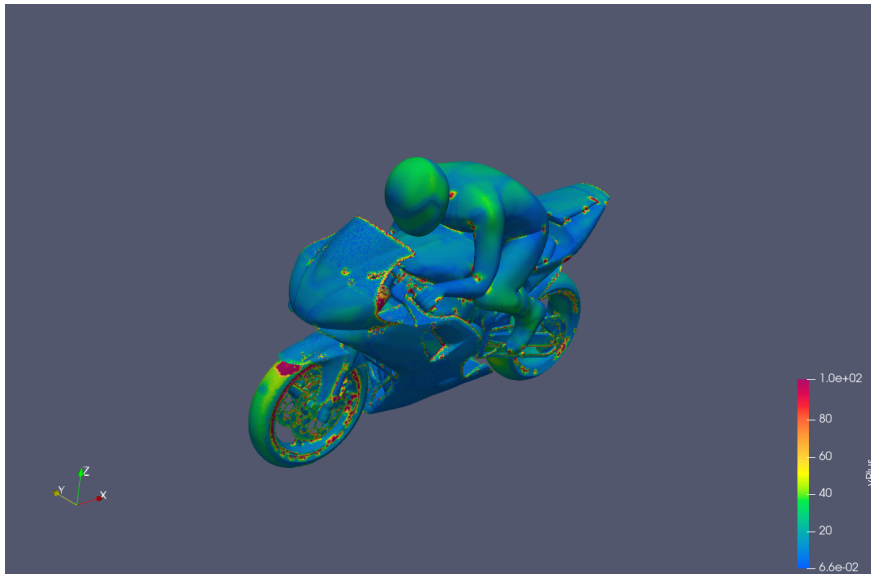


Figura 4.6: Valores de  $yPlus$  calculados sobre a superfície da moto sem asa - vista isométrica frontal

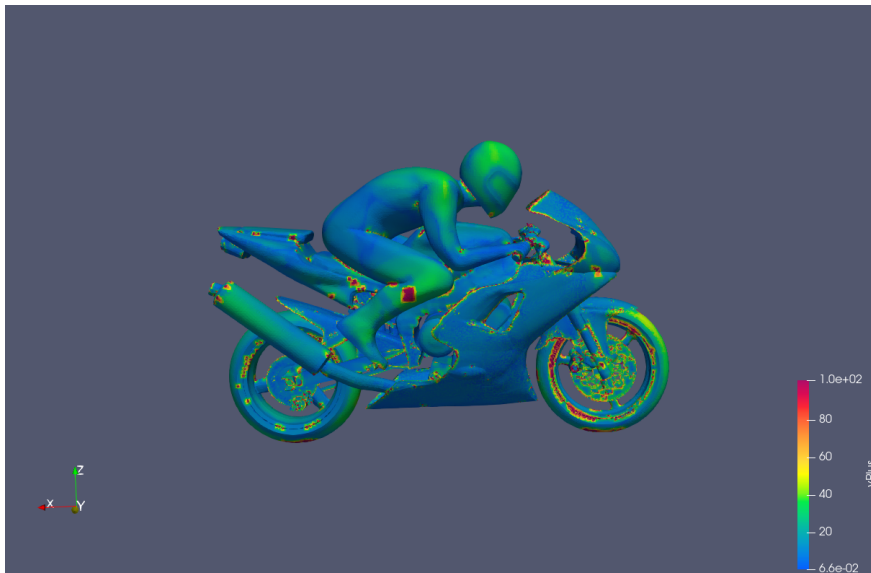


Figura 4.7: Valores de  $yPlus$  calculados sobre a superfície da moto sem asa - vista lateral

#### 4.1.3.3 Perfil do escoamento e Análises Qualitativas

Feitas as análises dos resultados quantitativos obtidos, resta uma análise qualitativa do comportamento do escoamento; uma simples verificação de que a tendência geral de variação das propriedades do escoamento segue a expectativa teórica. Uma primeira observação pode ser feita quanto à distribuição de pressão sobre a moto, ilustrada nas figuras 4.8 e 4.9 para o caso com asa.

É possível visualizar máximos de pressão na parte frontal da carenagem, da roda dianteira e do capacete do motociclista, que atuam como pontos de estagnação. Regiões como as laterais da roda dianteira, os membros do motociclista e as laterais do capacete compõem as regiões de pressão mínima. A região traseira se apresenta com pressão reduzida no geral, em

função da esteira de vórtices. A distribuição assimétrica sobre as costas do motociclista se deve à sua pose, também assimétrica. No caso com asa, se constata o aumento da pressão no lado superior da asa e a redução no lado inferior. Conclui-se que o campo apresenta o comportamento esperado.

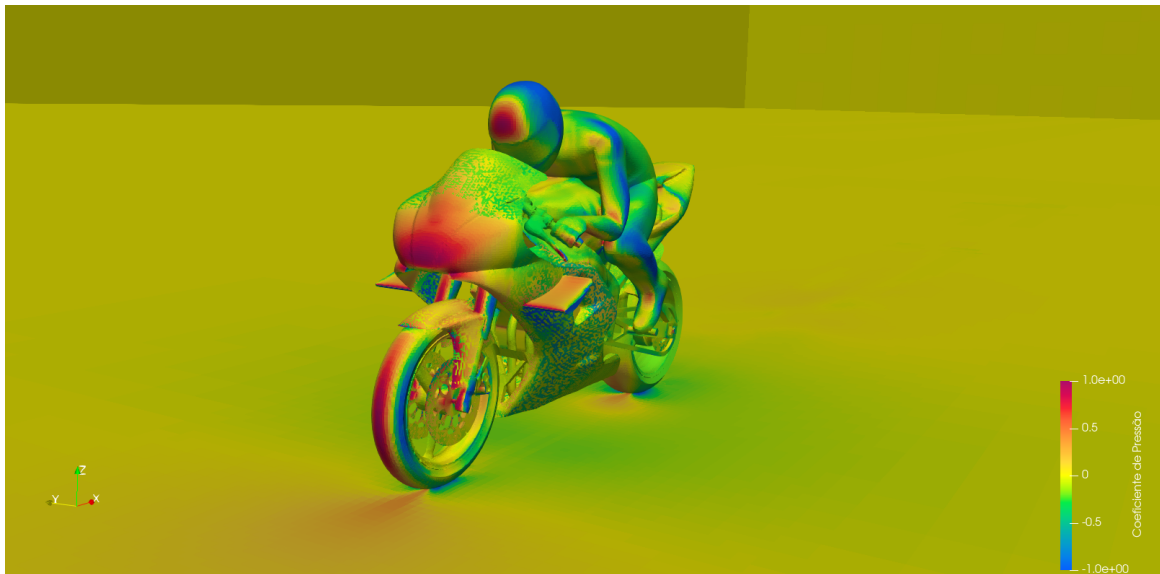


Figura 4.8: Distribuição de pressão no caso com asa - vista isométrica frontal

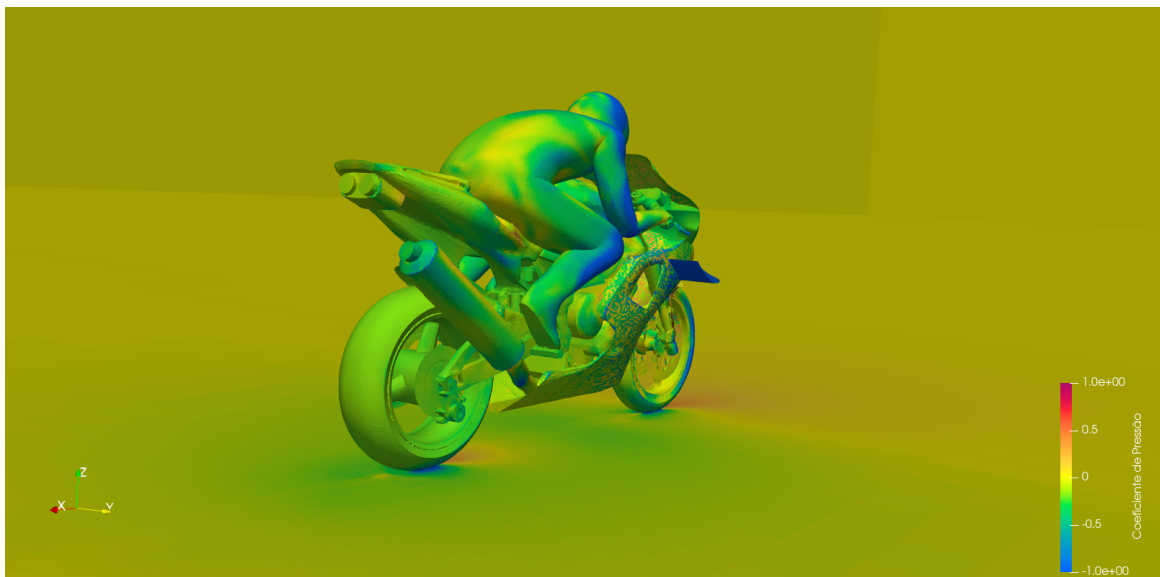


Figura 4.9: Distribuição de pressão no caso com asa - vista traseira

Aqui faz-se necessária uma observação quanto à aparente instabilidade no valor da pressão em certas seções da carenagem. Como a superfície de partes do modelo é muito esbelta, nessas regiões o Paraview apresenta dificuldade em determinar em que lado da superfície os elementos de contorno se encontram, resultando no erro gráfico observado. Não é um fenômeno da própria simulação, e portanto não afeta a qualidade dos dados obtidos.

A figura 4.10 ilustra a variação do campo de pressão ao longo do chão nos arredores da motocicleta. Constata-se uma variação contínua, com a redução do módulo do coefi-

ciente de pressão para pontos mais distantes da moto. Comparando por uma vista similar de [Gonçalves 2023] para o mesmo caso, mostrada na figura 4.11, a simulação do presente trabalho apresenta um resultado mais consistente.

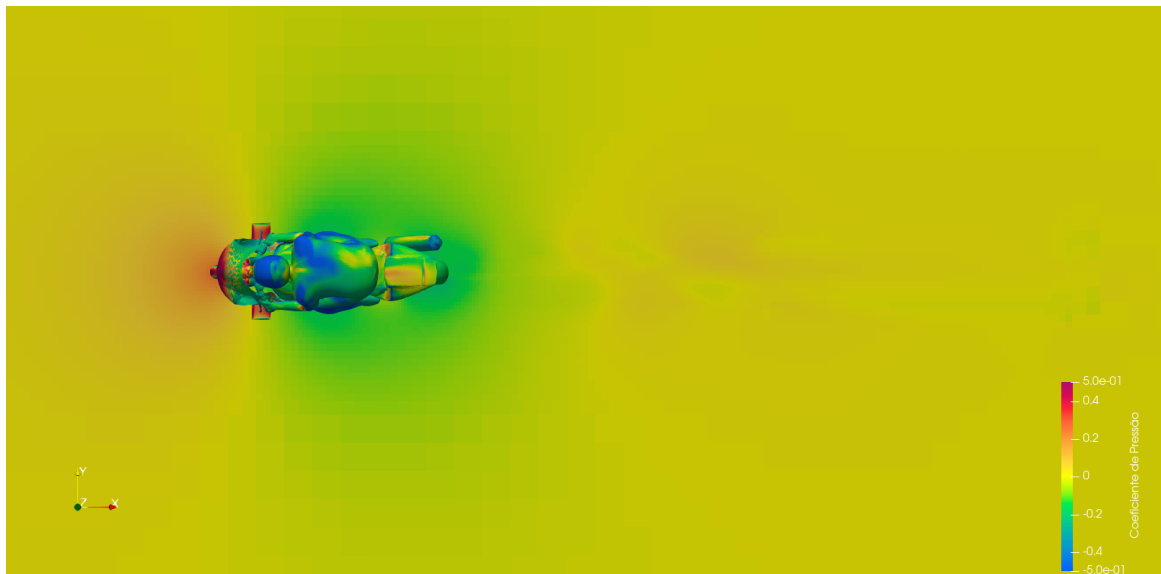


Figura 4.10: Distribuição de pressão nos arredores no caso com asa

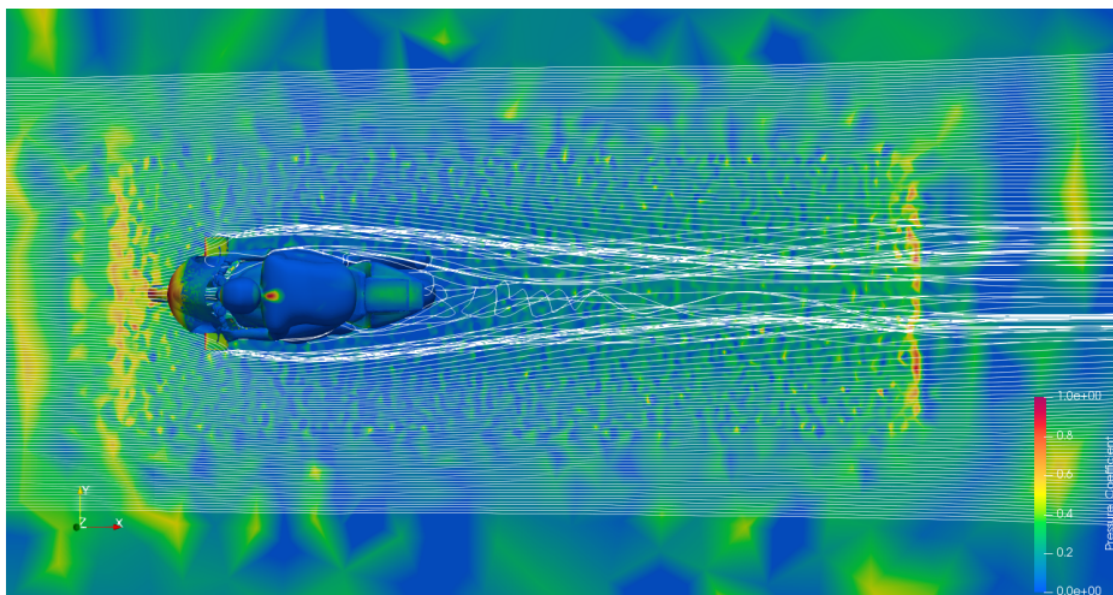


Figura 4.11: Distribuição de pressão e esteira aerodinâmica para uma moto com asa, sem ângulo de inclinação [Gonçalves 2023]

Outro comportamento esperado é uma esteira de vórtices posterior à motocicleta. O descolamento da camada limite sobre o corpo gera uma região de baixa pressão e velocidade no escoamento posterior ao corpo, com elevadas tendências rotacionais por parte do escoamento. Esse efeito pode ser visualizado nas figuras 4.12 e 4.13.

Por fim, é possível visualização dos vórtices de ponta de asa, que logicamente se formam apenas no caso do modelo de moto com asa. O fenômeno é ilustrado nas figuras 4.14 e



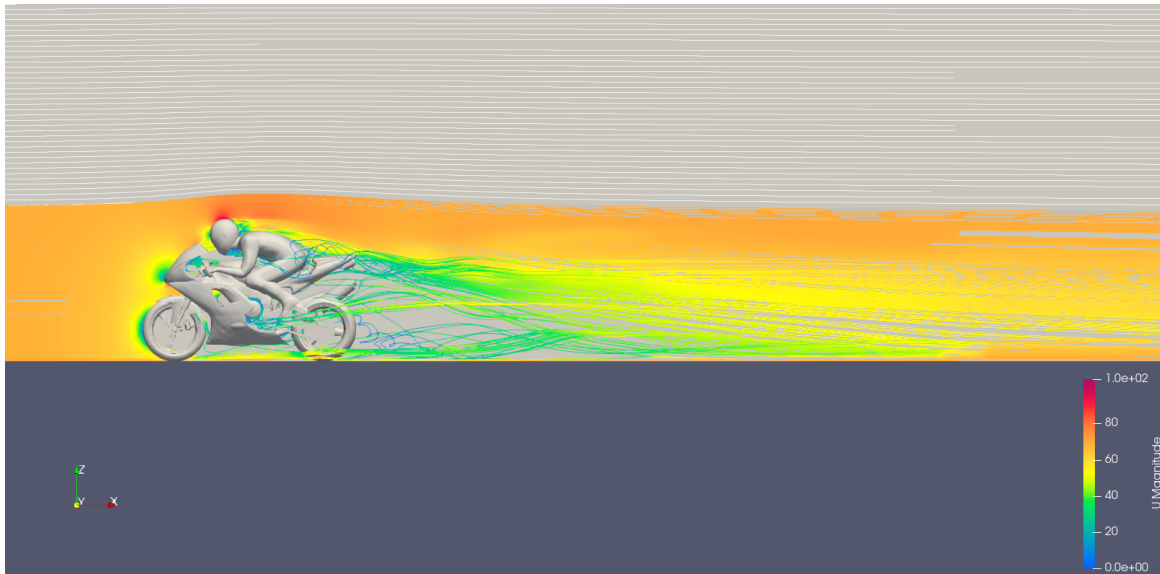


Figura 4.12: Ilustração da esteira de vórtices por linhas de corrente para o caso sem asa - vista lateral

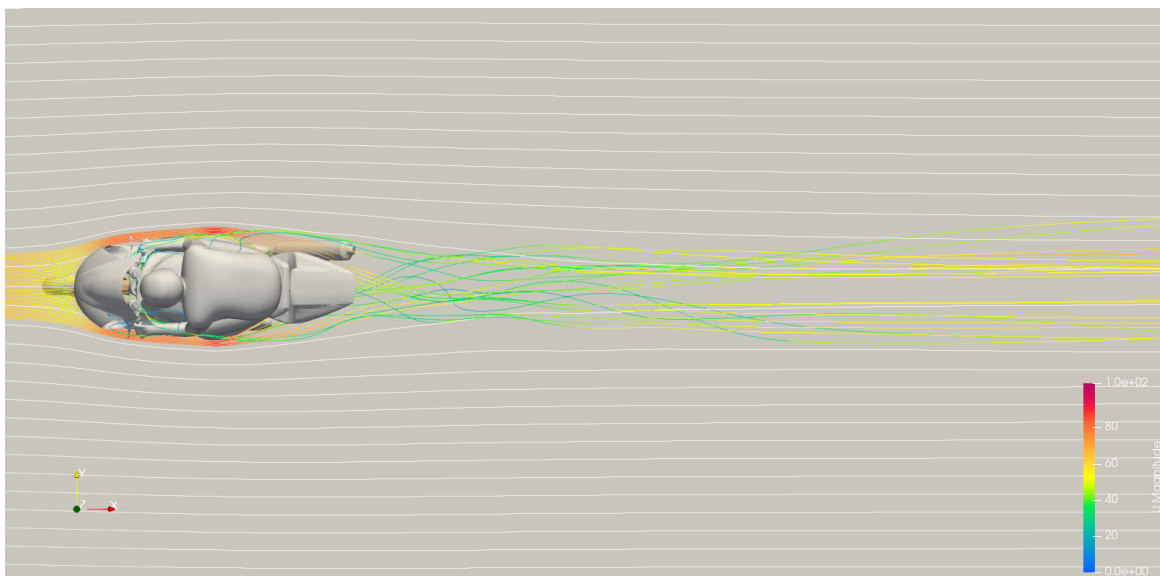


Figura 4.13: Ilustração da esteira de vórtices por linhas de corrente para o caso sem asa - vista superior

4.15 pelo uso de linhas de corrente. Na medida em que a formação dos vórtices era esperada, essa visualização mostra que o fenômeno foi propriamente representado no escoamento simulado, corroborando como afirmação da qualidade dos resultados.

## 4.2 Situação de Ultrapassagem - Duas Motos sem Asa

Com os resultados de simulação de uma única moto isolada, foram obtidos os coeficientes aerodinâmicos de cada moto, e foi verificada a coerência do modelo utilizado para simulações. Agora, é possível analisar situações de ultrapassagem, permitindo observar o efeito da

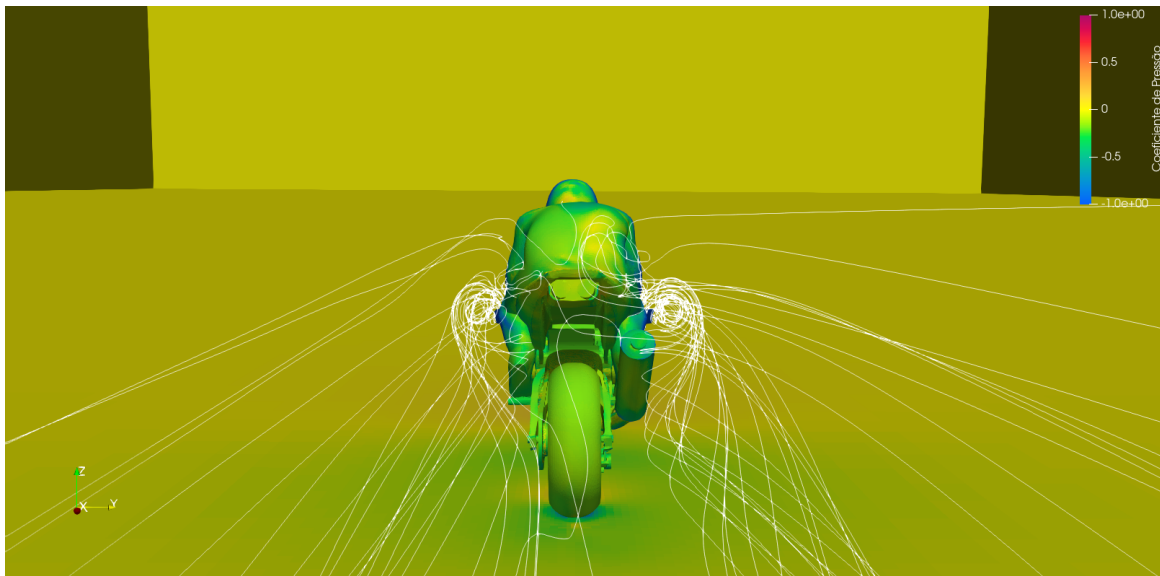


Figura 4.14: Visualização dos vórtices de ponta de asa em vista de rabeira

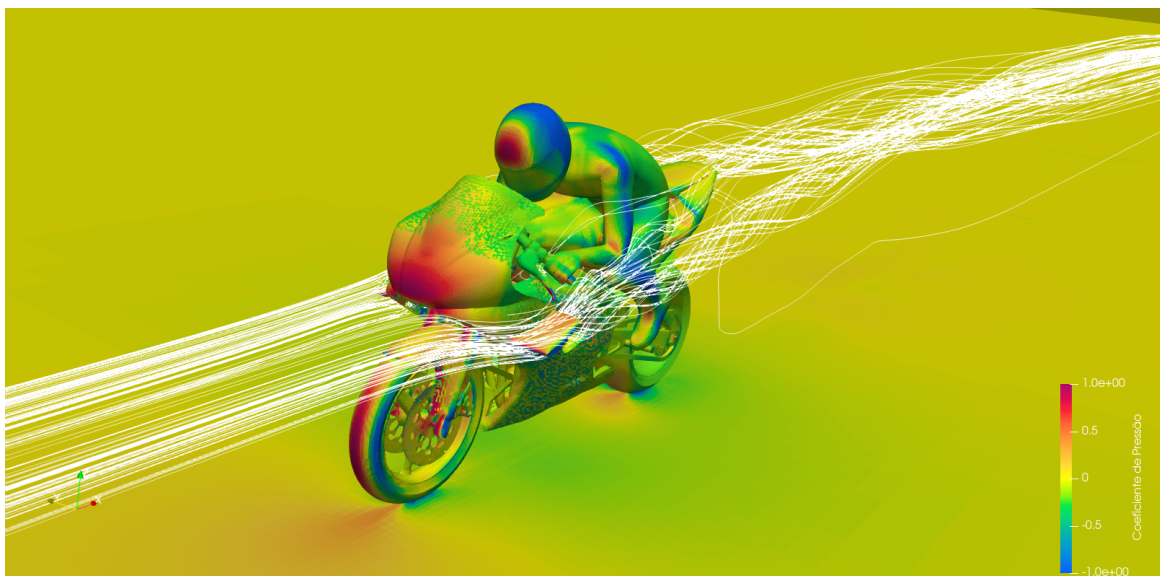


Figura 4.15: Visualização dos vórtices de ponta de asa em vista isométrica

presença de uma moto no escoamento ao qual outra moto posterior é submetido. O objetivo disso é analisar como a esteira de vórtices e os vórtices de ponta de asa gerados pela moto frontal afetam a aerodinâmica de outras motocicletas submetidas a esse escoamento.

A configuração de ultrapassagem estudada envolve duas motos, uma frontal e uma traseira. A moto frontal possui posição fixa, e ocupa o mesmo espaço que a moto isolada ocupava no caso anterior. Já a moto traseira é inicialmente colocada a 5cm de distância da moto frontal, sem qualquer desalinhamento lateral entre as duas. A partir dessa posição base, foram feitas análises de variação na distância longitudinal e lateral.

Casos de variação longitudinal, que também podem ser referidos como casos de distanciamento em  $x$ , envolvem a variação da posição da moto traseira na direção  $+x$ , preservando o alinhamento das motos. Foram escolhidos 17 valores de distância no intervalo entre 5cm e

700cm; os valores são distribuídos de forma não uniforme, priorizando .

Já casos de variação lateral, ou de distanciamento em  $y$ , envolvem a variação da posição da moto traseira na direção  $-y$ , desalinhando as motos, mas preservando a distância longitudinal de 5cm do caso base. Além do caso base, onde as motos se encontram alinhadas, foram escolhidos 17 posições entre 5cm e 60cm de distância. Assim como no caso longitudinal, essas posições não foram uniformemente distribuídas ao longo do intervalo fixado, com uma maior densidade na faixa entre 5cm e 30cm, onde a variação dos coeficientes com a posição é mais intensa. Para cada uma dessas posições, foram obtidos os coeficientes aerodinâmicos da moto traseira.

Esse caso inicial, em que ambas as motos não possuem asa, possui duas funções: servir como base de comparação para os demais casos, e permitir a validação qualitativa do modelo de simulação, por meio da observação de fenômenos esperados.

### 4.2.1 Malha Gerada e Tempo de Simulação

As características das malhas geradas para cada caso são representadas pela tabela 4.6. Embora o número de elementos presente na malha de cada caso, não há variação no procedimento de geração, que é o mesmo realizado para a moto isolada. A exceção são os casos que apresentam cerca de 22.000.000 elementos; esses casos não atingem convergência com uso de malhas de 5 camadas, devido ao acúmulo de instabilidades numéricas. Assim, esses casos utilizam malhas de 4 camadas com critérios de qualidade menos relaxados. Embora isso leve a uma redução no parâmetro  $y+$ , a maior estabilidade permite a convergência da solução. A cobertura da malha de camada, que encobre a superfície de ambas as motocicletas, se mostrou satisfatória em todos os casos.

Há também outro detalhe relativo. Isso se aplica também às malhas geradas para os casos que serão apresentados nas seções seguintes.

Para todos os casos envolvendo duas motos, foram realizadas 2000 iterações do *solver*. O tempo necessário para simulação de cada caso também é apresentado na tabela 4.6. Nota-se uma diferença drástica entre o tempo para os casos com malha de 5 camadas, que apresentam um tempo de simulação de aproximadamente 2 horas e 20 minutos, e o tempo para os casos com malha de 4 camadas, que apresentam um tempo de simulação de aproximadamente 1 hora e 40 minutos.

Antes de apresentar os valores encontrados para os coeficientes, é necessário determinar como serão calculados. Abaixo, são trazidos os gráficos de convergência dos casos de 50cm em  $x$  e 25cm em  $y$ , dados nas figuras 4.16 e 4.17 respectivamente. Esses dois casos foram escolhidos arbitrariamente, mas os demais casos apresentam comportamento análogo, sem diferenças significativas. É possível constatar que os valores de  $C_D$  e  $C_M$  atingem boa convergência aproximadamente a partir da iteração 500. Já valores para  $C_L$  e  $C_S$ , embora converjam para uma certa faixa aproximadamente a partir da iteração 750, mantém-se osci-

Distância	Nº de elementos	Nº de nós	Cobertura de camada (%)	Tempo de simulação (s)
5cm em x	25.279.633	11.419.740	81,4164	8144
15cm em x	25.286.780	11.414.607	81,6143	8282
25cm em x	25.282.722	11.412.508	81,2813	8157
50cm em x	25.276.802	11.410.197	81,237	7992
75cm em x	25.275.092	11.409.694	81,1897	8328
100cm em x	25.289.368	11.419.291	81,2897	7983
125cm em x	25.312.531	11.424.960	81,4169	8017
150cm em x	25.301.406	11.422.563	81,3937	7910
175cm em x	25.289.691	11.413.137	81,2428	7949
200cm em x	25.296.962	11.416.929	81,3093	7917
250cm em x	25.290.169	11.413.156	81,2411	7676
300cm em x	25.289.039	11.416.415	81,3122	7627
350cm em x	25.294.609	11.418.203	81,2703	7575
400cm em x	25.310.873	11.424.473	81,2747	7610
500cm em x	25.304.033	11.427.975	81,2291	7663
600cm em x	25.331.937	11.442.364	81,2843	7608
700cm em x	25.317.547	11.434.464	81,1528	7618
5cm em y	21.938.522	9.949.782	77,2316	6341
7,5cm em y	25.297.525	11.418.330	81,3876	8286
10cm em y	25.302.079	11.414.356	81,1488	8459
12,5cm em y	21.945.623	9.959.803	77,3207	6481
15cm em y	22.003.509	9.969.298	77,4006	6390
17,5cm em y	25.246.727	11.397.635	81,2264	8264
20cm em y	25.282.119	11.412.814	81,3205	8545
22,5cm em y	22.021.453	9.984.752	77,5862	6483
25cm em y	25.280.535	11.421.600	81,4147	8679
27,5cm em y	25.313.003	11.421.027	81,3439	8177
30cm em y	25.287.620	11.414.329	81,32	8149
35cm em y	25.302.702	11.416.041	81,3145	8104
40cm em y	25.306.640	11.415.288	81,3895	8122
45cm em y	25.287.277	11.414.515	81,3221	8085
50cm em y	21.938.381	9.953.065	77,1471	6429
55cm em y	21.950.408	9.952.182	77,1695	6209
60cm em y	22.010.139	9.981.400	77,6081	6228

Tabela 4.6: Características da malha gerada para cada caso de simulação - Situação de duas motos sem asa

lando ao longo da simulação. Comportamento relativamente similar foi exibido em todos os casos.

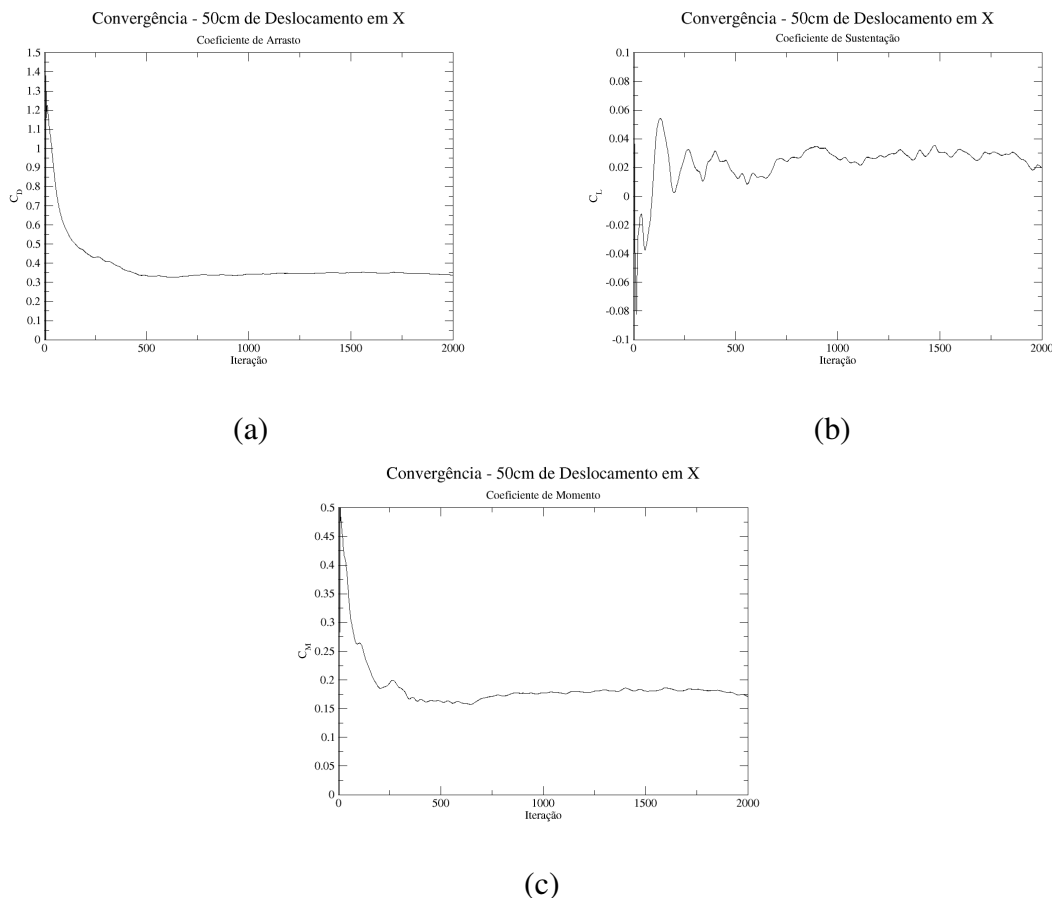


Figura 4.16: Gráficos de convergência para a distância longitudinal de 50cm - (a)  $C_D$  (b)  $C_L$  (c)  $C_M$  - Situação de duas motos sem asa

Desse modo, foi escolhido calcular os valores dos coeficientes pelo seu valor médio nas 1000 iterações finais, onde a convergência já havia sido atingida em todos os casos. Para os valores de  $C_L$ ,  $C_S$  e  $C_R$ , o desvio padrão amostral do conjunto foi registrado como incerteza, para contabilizar as oscilações. Como os valores de  $C_D$  e  $C_M$  apresentaram baixa oscilação ao longo das simulações, não foi feito o cálculo do desvio padrão para esses coeficientes.

## 4.2.2 Análise dos Coeficientes - Variação Longitudinal

Os coeficientes obtidos em cada posição de variação longitudinal simulada são listados na tabela 4.7. Esses valores também foram representados em gráficos, em que cada coeficiente aerodinâmico é abordado individualmente.

Na figura 4.18 abaixo, é ilustrado o gráfico que representa a variação do coeficiente de arrasto com a distância longitudinal. O coeficiente de arrasto obtido com a moto isolada é também exibido para facilitar comparações. É possível constatar que, na situação de ultrapassagem sem distância lateral, o arrasto é significativamente reduzido com relação ao

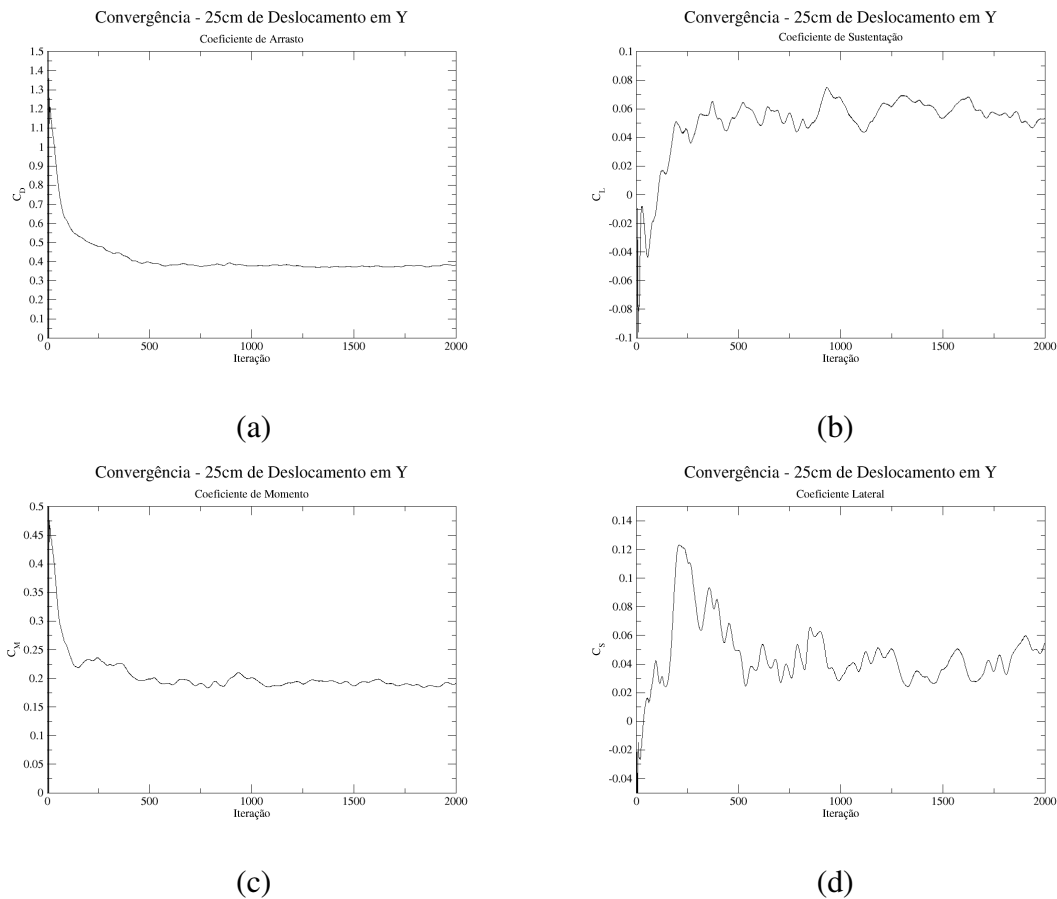


Figura 4.17: Gráficos de convergência para a distância lateral de 25cm - (a)  $C_D$  (b)  $C_L$  (c)  $C_M$  (d)  $C_S$  - Situação duas motos sem asa

valor obtido para uma moto isolada. Isso favorece a ultrapassagem, pois permite que a motocicleta atinja maiores velocidades; porém, pode também ser um empecilho por dificultar a frenagem.

É possível constatar uma grande redução no arrasto para distâncias próximas de zero. Até uma distância de 50cm, o valor de  $C_D$  aumenta rapidamente com o aumento da distância; após esse marco, o aumento se torna menos acentuado. Esse comportamento é coerente com a expectativa teórica; a menor velocidade do ar no interior da esteira de vórtices leva a uma redução em módulo das forças aerodinâmicas atuantes sobre a motocicleta traseira. À medida que a distância entre motos aumenta, o efeito do vórtice sobre a moto traseira diminui, o que causa o aumento verificado no coeficiente. Isso é ilustrado pelas visualizações da figura 4.19; o caso de distância de 700cm, em particular, demonstra que mesmo a essa distância a moto traseira se mantém sob o efeito do vórtice, o que explica o fato do valor original de  $C_D$  não ter sido recuperado. As aparentes discontinuidades em certos pontos próximos ao solo do campo de velocidade são efeitos visuais causados pela transição entre regiões de refino, e não representam discontinuidades reais.

As visualizações em 4.20, além de comprovarem que o campo de pressão nos arredores da moto se mantém coerente mesmo para simulações envolvendo mais de uma moto, também

Distância	$C_D$	$C_L$	$C_M$
5cm em x	0,30783	0,01397 ± 0,00520	0,16744
15cm em x	0,31772	0,01621 ± 0,00445	0,16816
25cm em x	0,32713	0,01167 ± 0,00303	0,16575
50cm em x	0,34702	0,02777 ± 0,00338	0,18051
75cm em x	0,34586	0,03384 ± 0,00216	0,17228
100cm em x	0,34900	0,03269 ± 0,00414	0,17081
125cm em x	0,35340	0,04626 ± 0,00440	0,18062
150cm em x	0,34831	0,04628 ± 0,00471	0,17464
175cm em x	0,34929	0,04801 ± 0,00417	0,17258
200cm em x	0,35127	0,05520 ± 0,00342	0,17674
250cm em x	0,35233	0,05294 ± 0,00426	0,17319
300cm em x	0,35959	0,05863 ± 0,00405	0,17577
350cm em x	0,35847	0,05679 ± 0,00283	0,17300
400cm em x	0,36492	0,05687 ± 0,00323	0,17602
500cm em x	0,37925	0,05603 ± 0,00259	0,18199
600cm em x	0,38890	0,05821 ± 0,00238	0,18367
700cm em x	0,39519	0,06207 ± 0,00228	0,18658

Tabela 4.7: Coeficientes obtidos para cada caso de simulação de variação longitudinal - Situação de duas motos sem asa

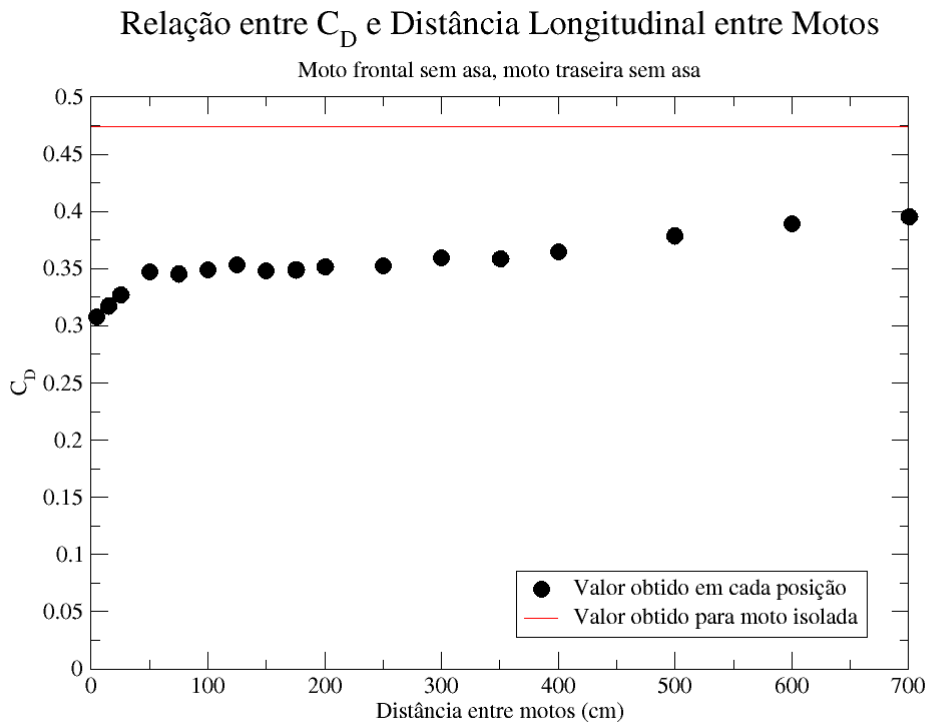


Figura 4.18: Variação do  $C_D$  com distância longitudinal - Situação de duas motos sem asa

permitem constatar a gradual diminuição do efeito da esteira de vórtices na moto traseira. As regiões de alta pressão na carenagem da motocicleta e na roda dianteira apresentam valores

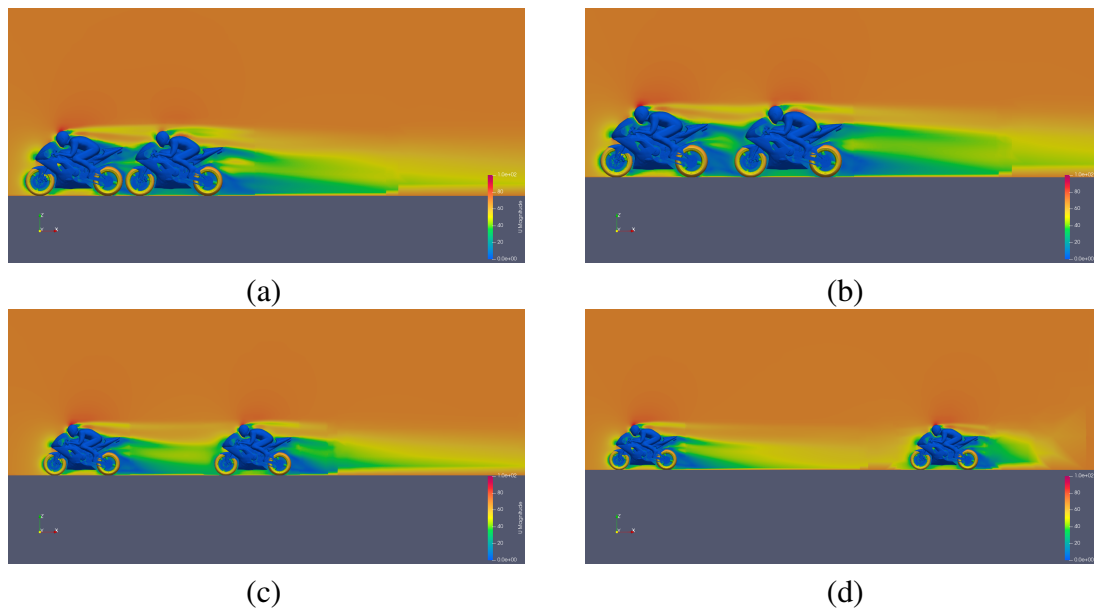


Figura 4.19: Campo de velocidades no plano xz para uma distância longitudinal entre motos de (a) 5cm (b) 50cm (c) 250cm (d) 700cm - Situação de duas motos sem asa

de  $C_P$  menos expressivos nas visualizações de casos com menor distância entre motos.

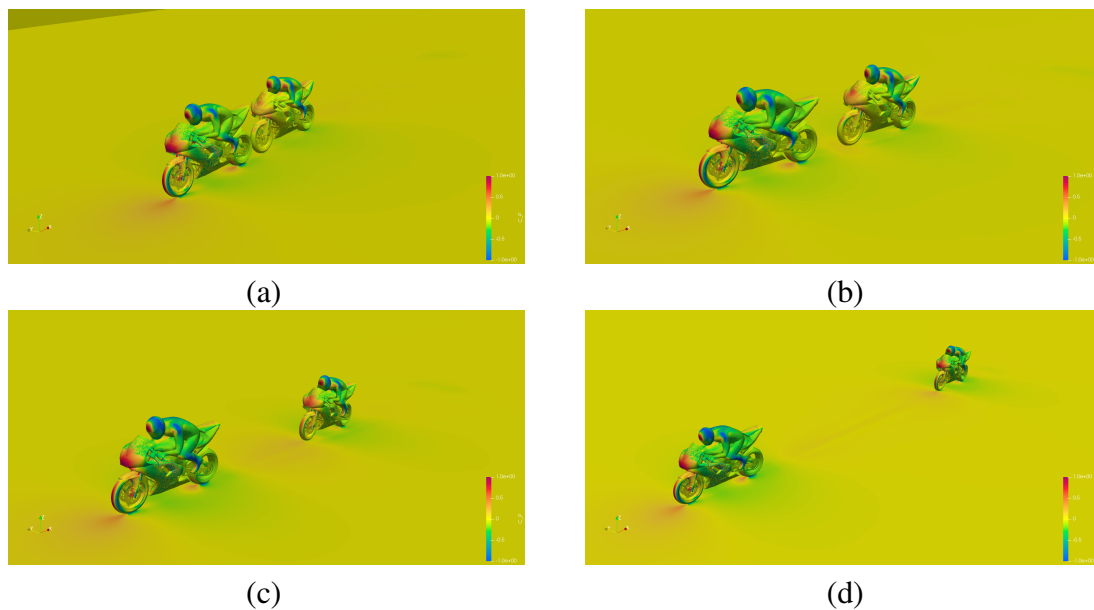


Figura 4.20: Campo de pressão na superfície para uma distância longitudinal entre motos de (a) 5cm (b) 50cm (c) 250cm (d) 700cm - Situação de duas motos sem asa

O gráfico da figura 4.21 ilustra a variação do  $C_L$  com a distância longitudinal. Assim como visto na análise do  $C_D$ , o valor de  $C_L$  obtido é reduzido se comparado ao valor para uma moto isolada, novamente favorecendo ultrapassagens. Porém, o perfil de variação é diferente. O valor de  $C_L$  aumenta drasticamente com a distância até o marco de 300cm, onde praticamente atinge um patamar. Mesmo nesse patamar, a sustentação original de moto isolada não é recuperada. Como explicado na análise do  $C_D$ , esse comportamento é coerente com o esperado.



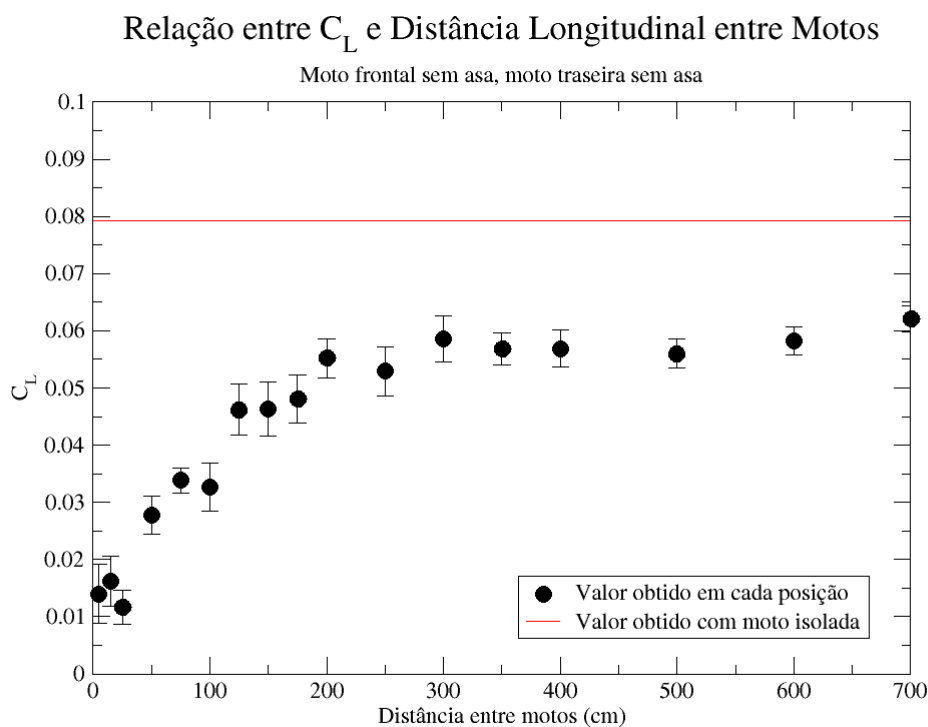


Figura 4.21: Variação do  $C_L$  com distância longitudinal - Situação de duas motos sem asa

A figura 4.22 ilustra a variação do coeficiente de momento com a distância longitudinal. Esse coeficiente também é reduzido na situação de ultrapassagem sem distância lateral, comparado ao caso de moto isolada. Isso é coerente com o comportamento dos valores de  $C_D$  e  $C_L$ , visto que são as forças de arrasto e sustentação que geram o momento de empinamento. Apesar de algumas oscilações na faixa entre 50cm e 125cm, constata-se que, embora haja um aumento de  $C_M$  com o aumento da distância entre motos, tal aumento é pouco expressivo. Novamente, o valor original do coeficiente não é recuperado mesmo à distância de 700cm, mostrando que a essa distância os efeitos do vácuo ainda atuam de forma significativa sobre a moto traseira.

Os valores de  $C_S$  e  $C_R$  aproximadamente constantes e pouco significativos independente da distância longitudinal, em razão da simetria desses casos. Desse modo, não convém a análise desses dois coeficientes. Os demais coeficientes não desviaram do comportamento esperado.

### 4.2.3 Análise dos Coeficientes - Variação Lateral

Os coeficientes obtidos em cada posição de variação lateral simulada são listados na tabela 4.8. Novamente, a variação de cada coeficiente aerodinâmico será abordada individualmente por meio de gráficos. Vale notar que o caso de 0cm de distância lateral corresponde ao caso de 5cm de distância longitudinal, e portanto dados da simulação realizada para o

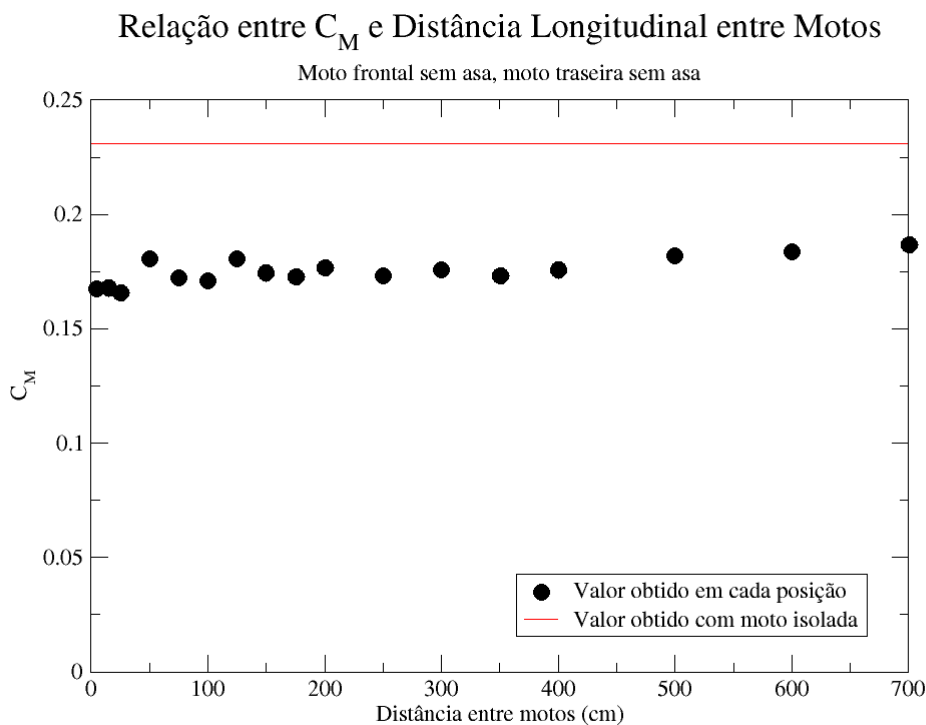


Figura 4.22: Variação do  $C_M$  com distância longitudinal - Situação de duas motos sem asa

caso de variação longitudinal foram aqui reutilizados.

Pela figura 4.23, é evidente que o perfil de variação com a distância lateral é distinto do perfil relativo a distância longitudinal. Apesar de algumas oscilações, há leve crescimento do valor de  $C_D$  até uma distância de 17,5cm. A partir desse ponto, porém, o valor de  $C_D$  aumenta drasticamente com o aumento da distância, e a partir de 40cm de distância, o valor original do coeficiente é praticamente recuperado, mantendo-se constante.

Esse comportamento é evidenciado pelas visualizações da figura 4.24, que ilustra o campo de pressão atuante sobre as motos. Nota-se que, a partir da distância de 25cm, as regiões de pressão máxima deixam de estar imersas na esteira de vórtices da moto frontal, gerando o aumento repentino no arrasto.

A variação da sustentação, ilustrada em 4.25, se mostra um pouco mais uniforme, com um aumento relativamente constante do valor com aumento da distância. A região entre 7,5cm e 15cm apresenta maior oscilação no valor, e pode portanto ser uma região de instabilidade. Porém, assim como ocorrido com o arrasto, à distância de 40cm o valor de  $C_L$  praticamente atinge o valor original, e atinge portanto um patamar.

O comportamento do coeficiente de momento, mostrado no gráfico da figura 4.26, exhibe tendências idênticas às exibidas pelo arrasto, com aumento gradual e oscilações até uma distância de 17,5cm, aumento mais acentuado na faixa entre 17,5cm e 40cm, e recuperação do valor original a partir de 40cm.

Distância	$C_D$	$C_L$	$C_M$	$C_S$	$C_R$
0cm em y	0,30783	0,01397 ± 0,00520	0,16744	-0,01191 ± 0,00991	0,00496 ± 0,00566
5cm em y	0,29905	0,02851 ± 0,00522	0,16395	0,03015 ± 0,01371	-0,01785 ± 0,00732
7,5cm em y	0,30710	0,03874 ± 0,00781	0,17096	0,04279 ± 0,01177	-0,02299 ± 0,00638
10cm em y	0,33237	0,03853 ± 0,00439	0,18463	0,07089 ± 0,01320	-0,03518 ± 0,00686
12,5cm em y	0,31590	0,03819 ± 0,00486	0,17423	0,07721 ± 0,00988	-0,04211 ± 0,00600
15cm em y	0,31484	0,04540 ± 0,00767	0,17060	0,07103 ± 0,01680	-0,03584 ± 0,00930
17,5cm em y	0,32472	0,04410 ± 0,00629	0,17431	0,06528 ± 0,00964	-0,02928 ± 0,00505
20cm em y	0,35234	0,04907 ± 0,00660	0,17948	0,05465 ± 0,00701	-0,02561 ± 0,00421
22,5cm em y	0,34442	0,04998 ± 0,00479	0,17678	0,03382 ± 0,01098	-0,01119 ± 0,00601
25cm em y	0,37605	0,05812 ± 0,00640	0,19129	0,04020 ± 0,00882	-0,01387 ± 0,00488
27,5cm em y	0,39806	0,04704 ± 0,00408	0,19023	0,03227 ± 0,00903	-0,01117 ± 0,00505
30cm em y	0,41489	0,05013 ± 0,00627	0,20270	0,03972 ± 0,00682	-0,01388 ± 0,00379
35cm em y	0,43101	0,05738 ± 0,00410	0,21565	0,02884 ± 0,00853	-0,01106 ± 0,00431
40cm em y	0,44604	0,06820 ± 0,00321	0,22716	0,04338 ± 0,00812	-0,01416 ± 0,00446
45cm em y	0,45622	0,06963 ± 0,00465	0,22996	0,04066 ± 0,01108	-0,01527 ± 0,00637
50cm em y	0,44697	0,06440 ± 0,00327	0,22276	0,05371 ± 0,00501	-0,02385 ± 0,00259
55cm em y	0,44584	0,07422 ± 0,00252	0,21951	0,04824 ± 0,00669	-0,02451 ± 0,00350
60cm em y	0,44824	0,06976 ± 0,00341	0,21449	0,03716 ± 0,00704	-0,01684 ± 0,00386

Tabela 4.8: Coeficientes obtidos para cada caso de simulação de variação lateral - Situação de duas motos sem asa

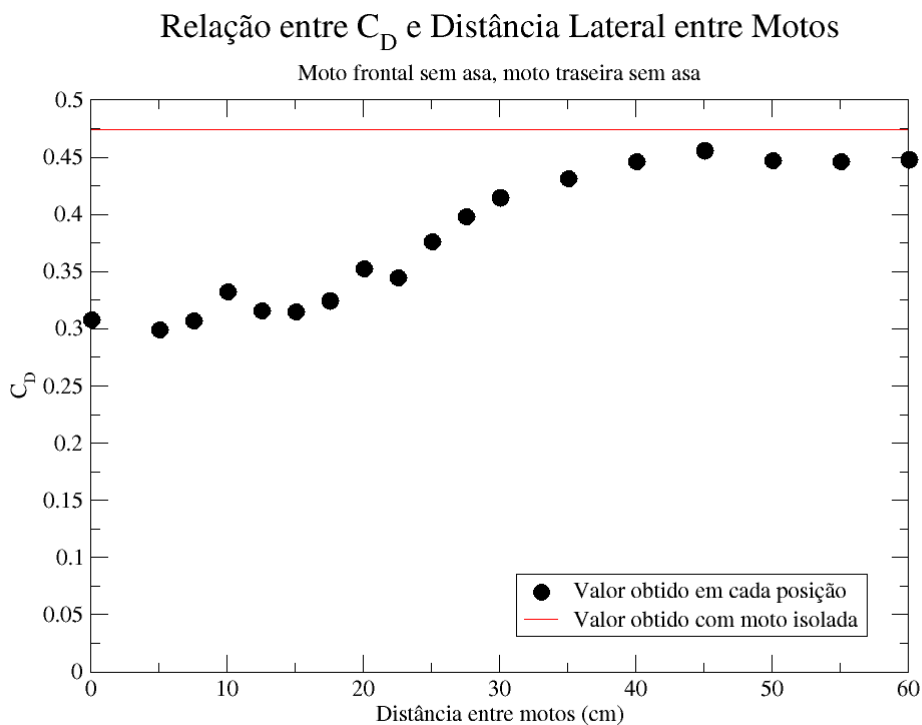


Figura 4.23: Variação do  $C_D$  com distância lateral - Situação de duas motos sem asa

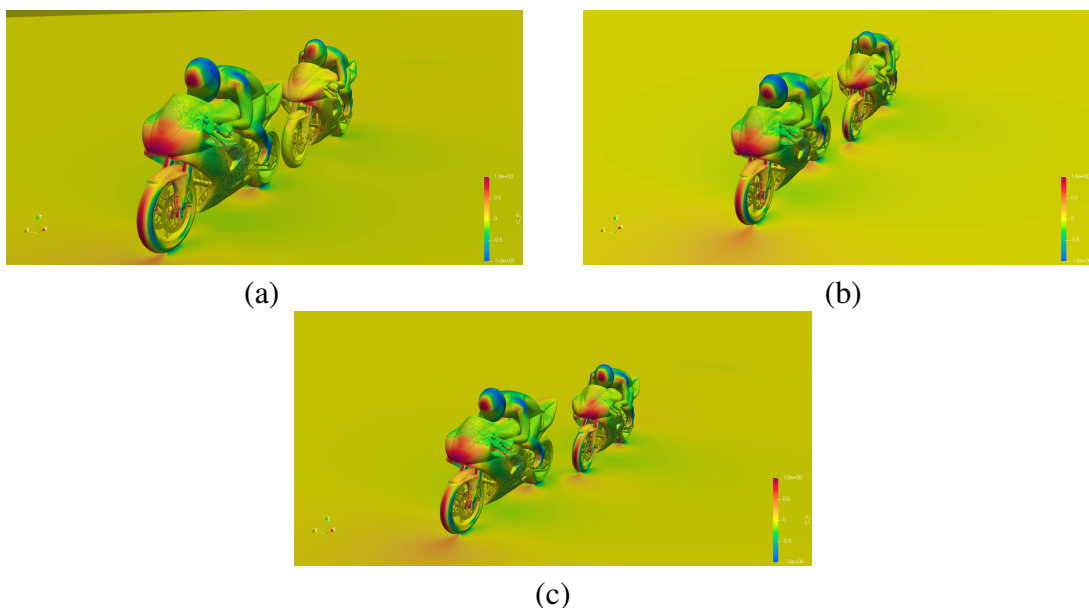


Figura 4.24: Campo de pressão na superfície das motos para distância lateral de (a) 10cm (b) 25cm (c) 35cm - Situação de duas motos sem asa

Dada a assimetria das situações simuladas, é também interessante analisar os coeficientes de força lateral e de momento de rolamento. O coeficiente lateral tem seu comportamento apresentado na figura 4.27. Apesar de um valor inicial desprezível, o coeficiente rapidamente se intensifica, atingindo um pico entre 12,5cm e 15cm. Após isso, decai rapidamente até um valor menos expressivo, que é mantido para todas as posições seguintes. Dado que o

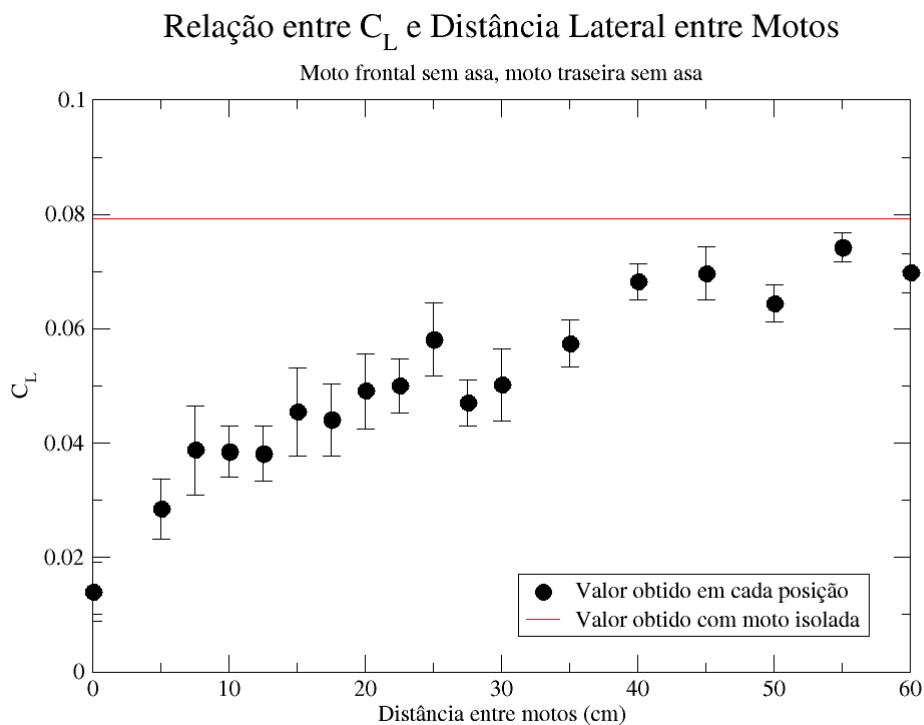


Figura 4.25: Variação do  $C_L$  com distância lateral - Situação de duas motos sem asa

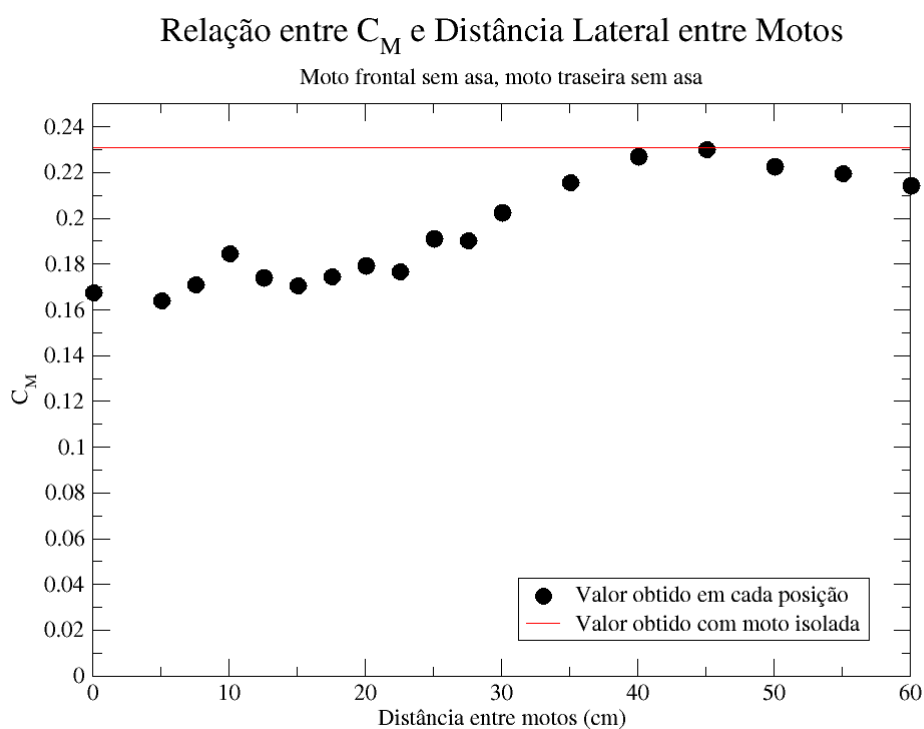


Figura 4.26: Variação do  $C_M$  com distância lateral - Situação de duas motos sem asa

deslocamento da moto traseira é feito na direção  $-y$ , valores positivos de  $C_S$  como os aqui obtidos indicam que a força tende a reaproximar as motos.

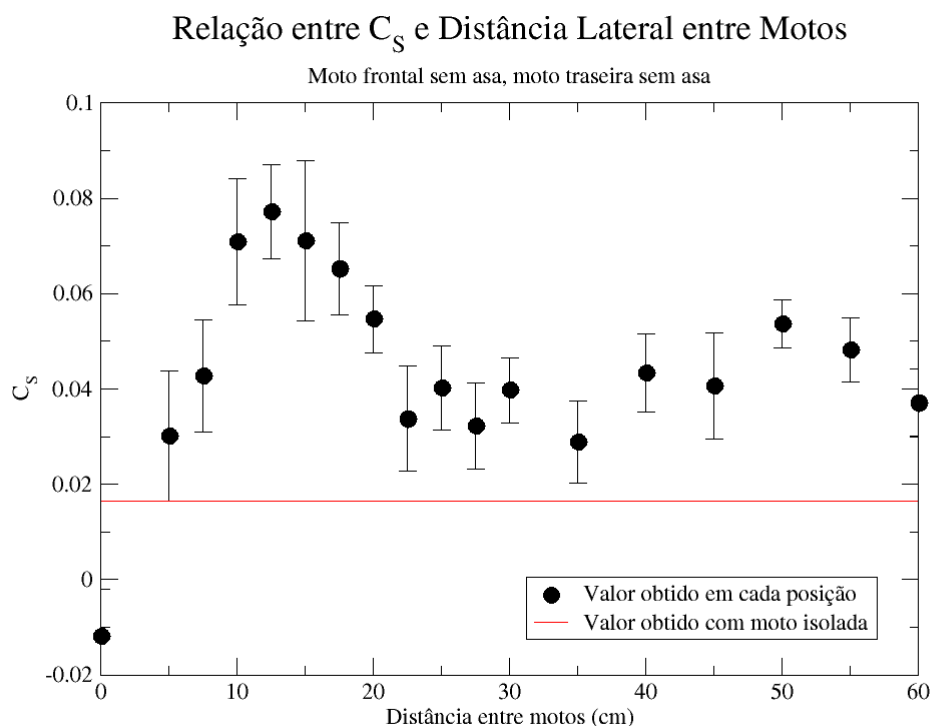


Figura 4.27: Variação do  $C_S$  com distância lateral - Situação de duas motos sem asa

A causa dessa força lateral é o escoamento assimétrico ao qual a moto traseira é submetida. No caso extremo, onde o valor de  $C_S$  atinge o pico, constata-se que o braço direito do motociclista da moto traseira é submetido a um escoamento de alta velocidade, enquanto que o escoamento que atinge o braço esquerdo vem da esteira de vórtices gerada pela moto frontal. Esse fenômeno é ilustrado na figura 4.28. Essa diferença gera uma diferença de pressão entre os lados, que tem como consequência o surgimento de uma força lateral orientada para o lado de menor pressão, e portanto tendendo a aproximar as motos. A maiores distâncias, esse efeito é invertido; porém, a distribuição assimétrica da força de arrasto, que vai se intensificando, preserva o valor de força lateral.

Aqui, vale notar os elevados valores de desvio padrão, principalmente na região entre 5cm e 17,5cm. Para definir se essa instabilidade no valor se deve a uma instabilidade no escoamento ou a uma limitação do modelo RANS, é necessário o estudo com uma simulação de modelo com maior precisão, como por exemplo LES. Porém, mesmo levando isso em consideração, para este caso as conclusões já apresentadas se mostram consistentes mesmo levando esses fatores em consideração.

Por fim, tem-se a figura 4.29 exibindo o comportamento do coeficiente de momento de rolamento. Assim como a relação entre  $C_M$  e  $C_D$ , as tendências exibidas pelo  $C_R$  são idênticas às de  $C_S$ , com exceção do sinal trocado. Porém, visto que um coeficiente negativo indica

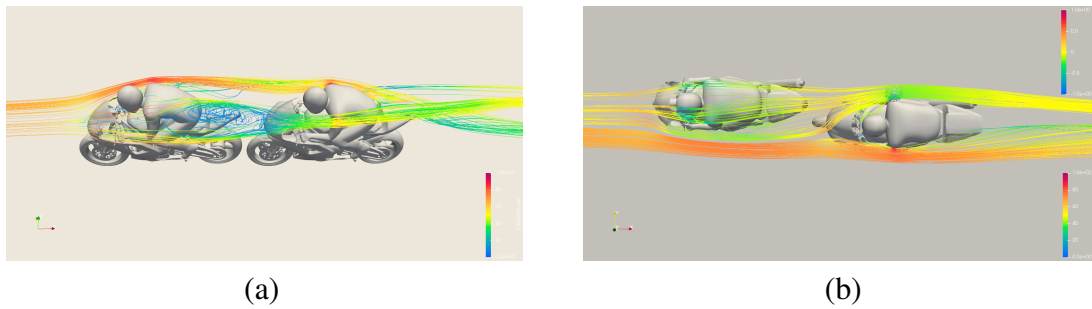


Figura 4.28: Linhas de corrente indicando a velocidade do escoamento que passa pelos braços do motociclista da moto traseira para uma distância lateral de (a) 10cm (b) 25cm - Situação de duas motos sem asa

uma tendência de tombamento na direção da moto frontal, o resultado ainda é consistente. Isso permite concluir que o centro aerodinâmico não apresenta grandes variações entre casos. Novamente, assim como na força lateral os desvios padrões obtidos são elevados.

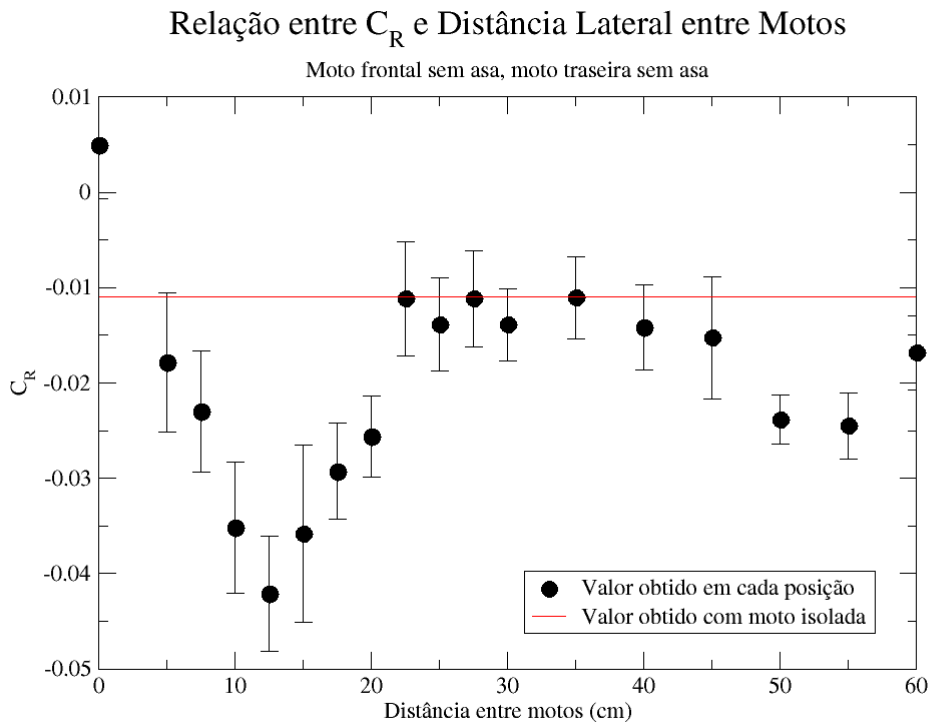


Figura 4.29: Variação do  $C_R$  com distância lateral - Situação de duas motos sem asa

### 4.3 Situação de Ultrapassagem - Moto Frontal com Asa, Moto Traseira sem Asa

Nessa situação, além do efeito da esteira de vórtices, a moto traseira também sofre o efeito dos vórtices de ponta de asa gerado pelas asas da moto frontal, alterando portanto o

perfil do escoamento. Comparações com a situação de duas motos sem asa permitirá identificar isoladamente os efeitos do vórtice de ponta de asa. As mesmas posições simuladas na situação anterior foram também simuladas para essa, tanto em variação longitudinal quanto lateral. Por fim, mostrou-se que para um estudo mais aprofundado das forças laterais, o modelo RANS apresenta precisão insatisfatória, e outro método deve ser adotado para obter conclusões definitivas.

### 4.3.1 Malha Gerada e Tempo de Simulação

Cada posição simulada tem suas características apresentadas na tabela 4.9 abaixo. Novamente, alguns casos utilizaram uma malha com quatro camadas para melhorar a estabilidade da solução, apresentando cerca de 20.000.000 elementos; os demais casos foram montados com 5 camadas, com a mesma metodologia adotada no restante do trabalho. Todas as malhas apresentaram cobertura satisfatória da malha de camada.

É possível notar uma diminuição no número de elementos da malha se comparado com o caso de duas motos sem asa; isso é coerente com os resultados obtidos na simulação de moto única, visto que a malha da moto sem asa apresenta mais elementos. Uma consequência disso é a redução no tempo médio de simulação, que para 2000 iterações, foi de cerca de 2 horas para as malhas com 5 camadas e 1 hora e 30 minutos para as malhas com 4 camadas.

Nas figuras 4.30 e 4.31 abaixo são apresentados gráficos de convergência de dois casos como exemplo. É possível constatar um perfil similar ao caso de duas motos sem asa, e portanto a metodologia de cálculo dos coeficientes foi mantida: média dos valores das últimas 1000 iterações, com o desvio padrão desses valores atuando como incerteza no  $C_L$ ,  $C_S$  e  $C_R$ .

### 4.3.2 Análise dos Coeficientes - Variação Longitudinal

A tabela 4.10 lista os coeficientes obtidos na simulação de cada posição, com os gráficos seguintes abordando o comportamento de cada coeficiente individualmente. Também são apresentados gráficos que comparam os resultados dessas simulações com resultados obtidos para duas motos sem asa, permitindo assim identificar os efeitos do vórtice de ponta de asa na aerodinâmica da moto traseira.

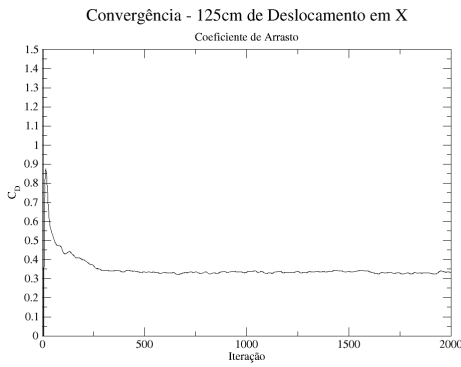
O perfil de variação do  $C_D$ , ilustrado na figura 4.32, mantém a tendência esperada de redução a curtas distâncias e aumento com o aumento da distância, sem recuperação do valor original mesmo a 700cm de distância. Porém, comparando com o perfil obtido para duas motos sem asa, nota-se que o valor inicial de arrasto é menor, porém cresce mais rapidamente com o aumento da distância, principalmente até cerca de 200cm.

Essa comparação se torna mais evidente na figura 4.33, que registra a diferença relativa entre o coeficiente de arrasto calculado nas duas situações já apresentadas; o cálculo dessa diferença é expresso por

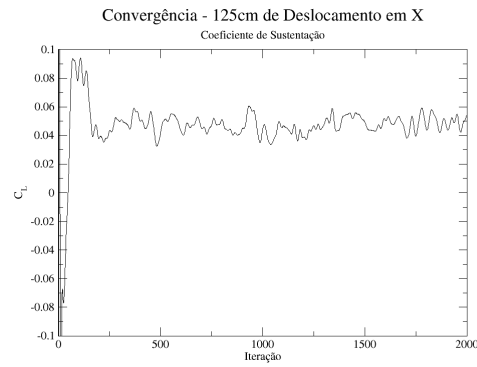


Distância	Nº de elementos	Nº de nós	Cobertura de camada (%)	Tempo de simulação (s)
5cm em x	22.747.241	10.133.915	79,564	6985
15cm em x	22.749.551	10.130.679	79,3964	7572
25cm em x	22.727.281	10.117.949	79,3207	7677
50cm em x	22.738.308	10.123.202	79,3894	7658
75cm em x	22.738.228	10.124.488	79,3964	7743
100cm em x	22.747.363	10.129.597	79,4242	7715
125cm em x	22.741.473	10.123.713	79,3881	7501
150cm em x	19.933.777	8.922.000	79,3747	5904
175cm em x	22.745.452	10.126.859	79,4574	7753
200cm em x	22.744.269	10.123.994	79,3766	7580
250cm em x	22.747.672	10.127.698	79,4657	7677
300cm em x	22.747.236	10.128.289	79,4918	7573
350cm em x	22.755.875	10.128.882	79,3877	7621
400cm em x	22.756.843	10.133.880	79,4066	7606
500cm em x	22.778.103	10.144.073	79,4118	7513
600cm em x	22.782.510	10.151.684	79,3821	7281
700cm em x	19.978.154	8.954.527	76,9051	5742
5cm em y	22.718.271	10.111.382	79,3015	6918
7,5cm em y	22.734.035	10.118.513	79,3721	6918
10cm em y	22.772.063	10.132.971	79,3939	6990
12,5cm em y	22.752.046	10.134.178	79,5241	7011
15cm em y	19.953.676	8.931.479	77,0194	5446
17,5cm em y	22.715.127	10.110.969	79,3473	7222
20cm em y	22.732.429	10.115.480	79,3198	7158
22,5cm em y	22.770.091	10.131.048	79,3578	7172
25cm em y	22.749.323	10.134.119	79,5474	7102
27,5cm em y	19.971.394	8.944.869	77,2675	5457
30cm em y	19.903.560	8.916.425	76,7755	5613
35cm em y	22.772.977	10.126.754	79,3778	6820
40cm em y	22.759.147	10.121.672	79,4624	6778
45cm em y	22.743.008	10.121.766	79,3782	6822
50cm em y	22.740.411	10.128.118	79,455	6909
55cm em y	22.720.412	10.112.213	79,263	6888
60cm em y	22.764.537	10.127.951	79,4013	6827

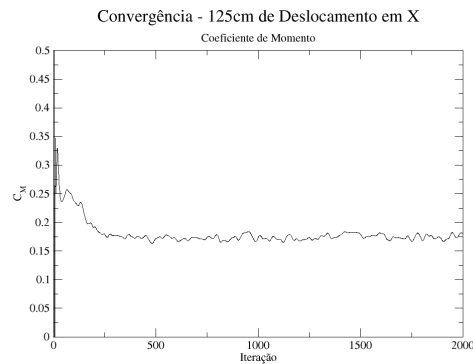
Tabela 4.9: Características da malha gerada para cada caso de simulação - Situação de moto frontal com asa e moto traseira sem asa



(a)



(b)



(c)

Figura 4.30: Gráficos de convergência para a distância longitudinal de 125cm - (a)  $C_D$  (b)  $C_L$  (c)  $C_M$  - Situação de moto frontal com asa e moto traseira sem asa

$$Dif = \frac{C_{comasa} - C_{semasa}}{C_{semasa}} \quad (4.1)$$

e portanto valores negativos indicam que o coeficiente é inferior na situação de moto frontal com asa, enquanto que valores positivos indicam que o coeficiente é superior nessa situação. Constata-se que o coeficiente possui valor negativo a baixas distâncias e positivo a altas distâncias, com transição na distância de aproximadamente 150cm. Ou seja, o efeito do vórtice de ponta de asa leva a uma maior redução inicial no arrasto, mas também faz com que ele cresça de forma mais acentuada com o aumento da distância.

Visualizações dos campos de velocidade e pressão são apresentadas pelas figuras 4.34 e 4.35, respectivamente. A nível qualitativo, o mesmo comportamento verificado para a situação de duas motos sem asa é observado, o que é coerente com os resultados obtidos. Nas visualizações do campo de pressão, são também adicionadas linhas de corrente representando os vórtices de ponta de asa, e como estes atingem a moto traseira em cada posição.

A sustentação, representada na figura 4.36, apresenta comportamento similar, mas com dois detalhes. Primeiramente, a região até uma distância de 100cm apresenta oscilações relativamente elevadas. Além disso, o patamar atingido é o valor original do coeficiente, que

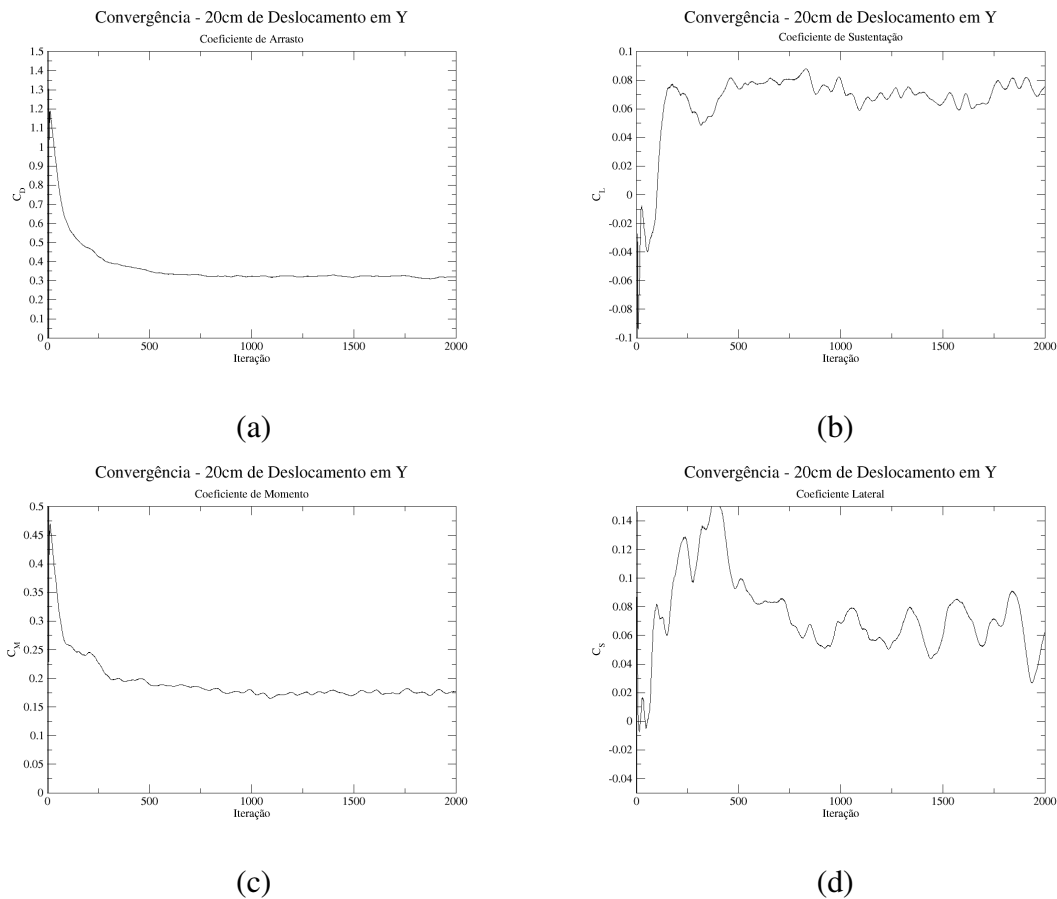


Figura 4.31: Gráficos de convergência para a distância lateral de 20cm - (a)  $C_D$  (b)  $C_L$  (c)  $C_M$  (d)  $C_S$  - Situação de moto frontal com asa e moto traseira sem asa

é portanto recuperado. Analisando a relação com o caso de duas motos sem asa pela figura 4.37, constata-se um perfil similar ao da figura 4.33, com a sustentação sendo inicialmente inferior para o caso de moto frontal com asa, e superando o caso de moto frontal sem asa a partir da distância de 100cm.

O perfil do coeficiente de momento, dado pela figura 4.38, novamente exhibe a mesma tendência do coeficiente de arrasto, o que é coerente com os resultados obtidos até esse ponto. Por consequência, sua relação com o perfil de  $C_M$  do caso de duas motos sem asa, dada pela figura 4.39, também espelha a relação obtida no arrasto em 4.33, embora com maiores oscilações.

Novamente, a análise de  $C_S$  e  $C_R$  não é realizada em casos de variação longitudinal de distância, sendo esses coeficientes pouco significativos dada a simetria do escoamento a qual a moto traseira está submetida. É possível comparar as visualizações desse caso com o de duas motos sem asa, o que é feito na figura 4.40 para o campo de velocidades. Nota-se que o campo de baixa velocidade é mais intenso na região próxima à moto frontal no caso em que esta possui asa, mas também diminui mais intensamente com o aumento da distância, o que corrobora os resultados numéricos obtidos.

Comparando o comportamento geral da moto traseira entre o caso de moto frontal com ou

Distância	$C_D$	$C_L$	$C_M$
5cm em x	0,23545	0,00798 ± 0,00937	0,12125
15cm em x	0,24421	0,00399 ± 0,00849	0,12696
25cm em x	0,27021	0,00453 ± 0,00649	0,13890
50cm em x	0,27156	0,00963 ± 0,01028	0,13901
75cm em x	0,28990	0,01869 ± 0,00667	0,14484
100cm em x	0,30330	0,04788 ± 0,01030	0,16222
125cm em x	0,33351	0,04736 ± 0,00544	0,17445
150cm em x	0,33093	0,05612 ± 0,00915	0,17588
175cm em x	0,35168	0,05556 ± 0,00581	0,18108
200cm em x	0,35763	0,06110 ± 0,00557	0,18914
250cm em x	0,36392	0,07104 ± 0,00396	0,19424
300cm em x	0,38127	0,06688 ± 0,00547	0,20006
350cm em x	0,39027	0,08349 ± 0,00396	0,21258
400cm em x	0,39915	0,07370 ± 0,00434	0,20675
500cm em x	0,40003	0,07662 ± 0,00364	0,20660
600cm em x	0,41254	0,07401 ± 0,00242	0,21293
700cm em x	0,41661	0,07096 ± 0,00354	0,20741

Tabela 4.10: Coeficientes obtidos para cada caso de simulação de variação longitudinal - Situação de moto frontal com asa e moto traseira sem asa

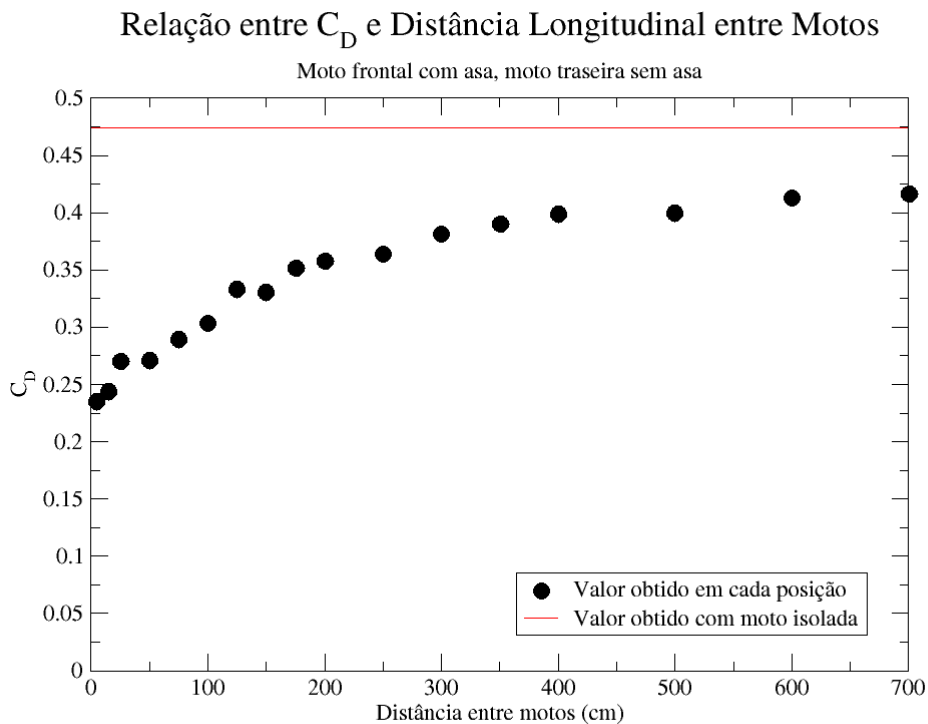


Figura 4.32: Variação do  $C_D$  com distância longitudinal - Situação de moto frontal com asa e moto traseira sem asa

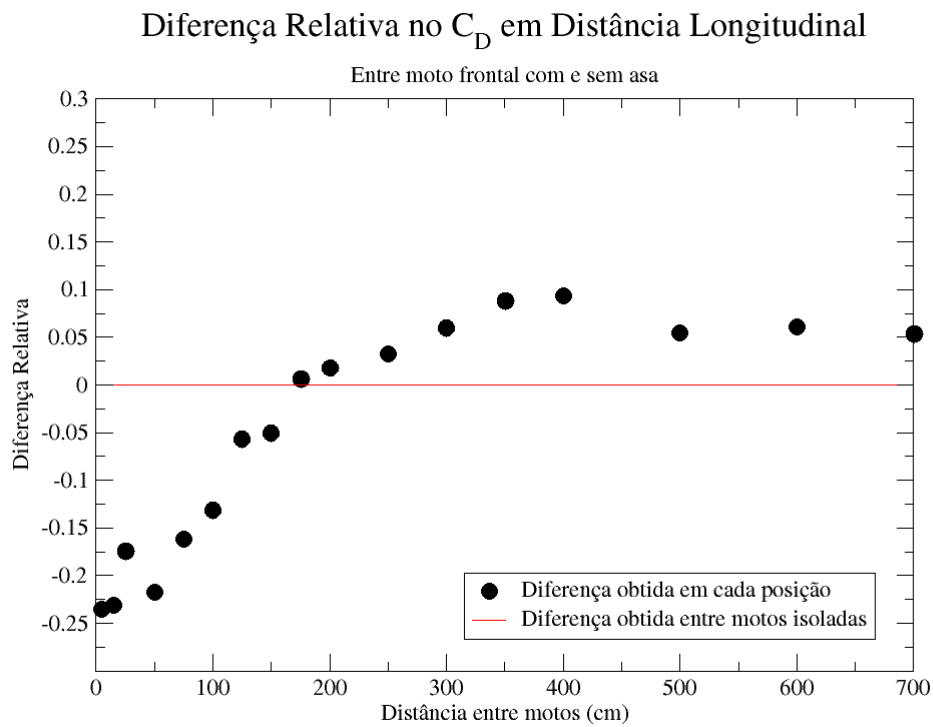


Figura 4.33: Diferença relativa no  $C_D$  obtida entre as situações de moto frontal com e sem asa, para moto traseira sem asa - Variação longitudinal

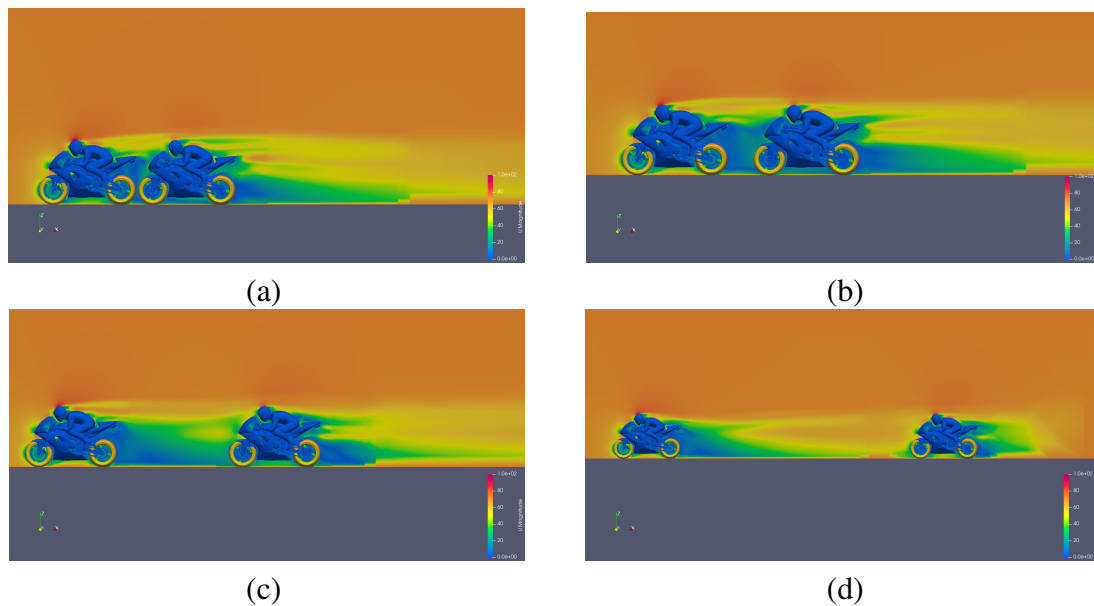


Figura 4.34: Campo de velocidades no plano xz para uma distância longitudinal entre motos de (a) 5cm (b) 50cm (c) 250cm (d) 700cm - Situação de moto frontal com asa e moto traseira sem asa

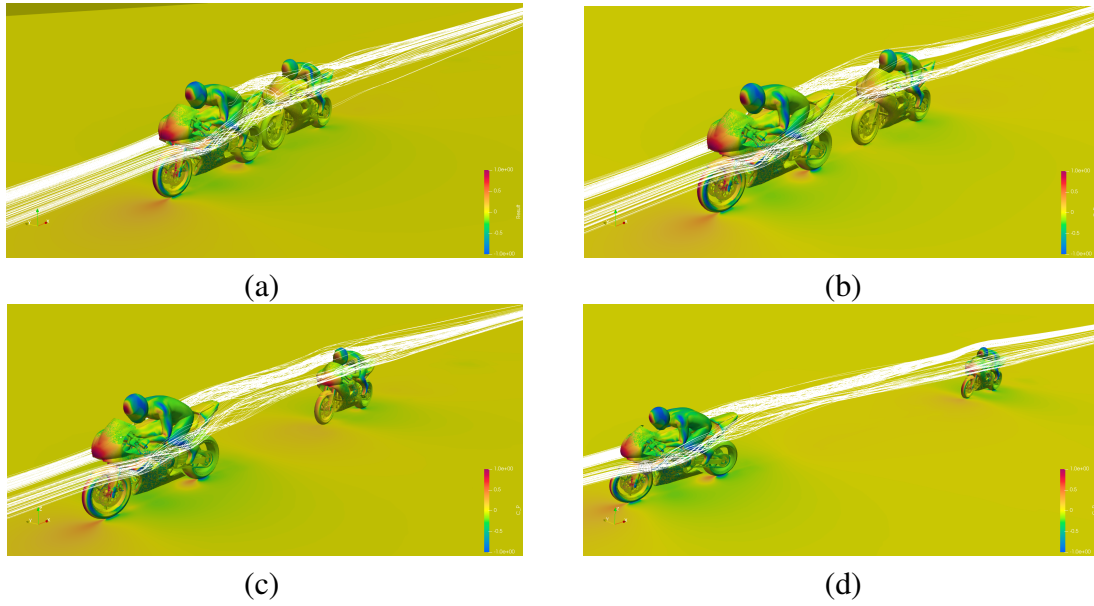


Figura 4.35: Campo de pressão na superfície para uma distância longitudinal entre motos de (a) 5cm (b) 50cm (c) 250cm (d) 700cm - Situação de moto frontal com asa e moto traseira sem asa

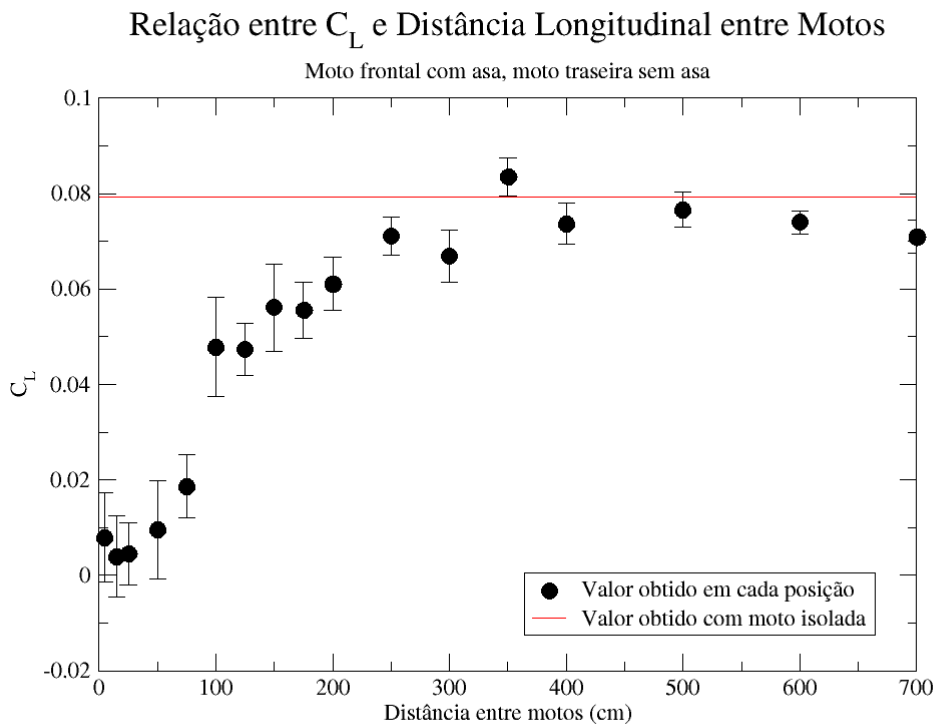


Figura 4.36: Variação do  $C_L$  com distância longitudinal - Situação de moto frontal com asa e moto traseira sem asa

### Diferença Relativa no $C_L$ em Distância Longitudinal

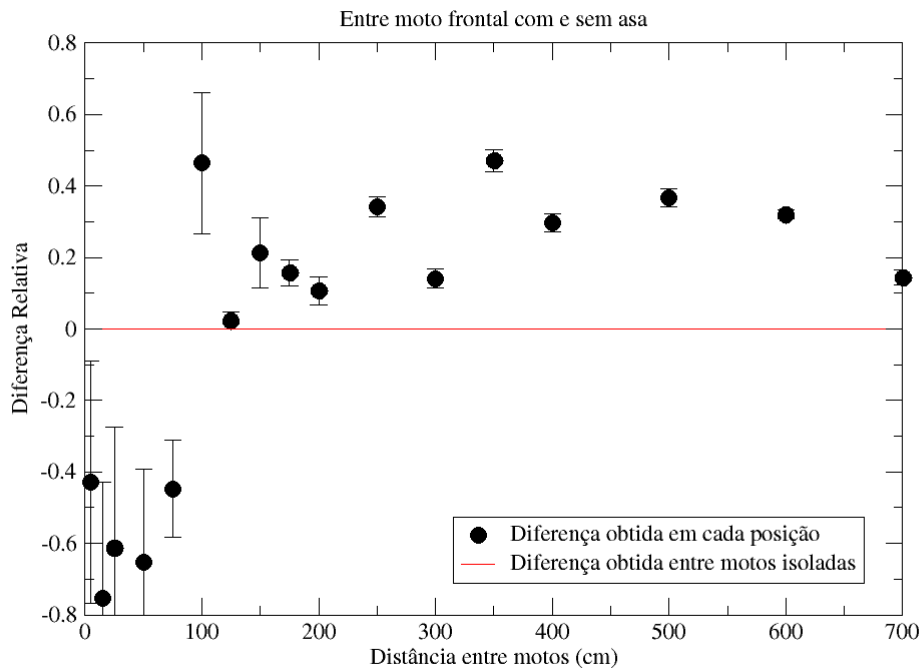


Figura 4.37: Diferença relativa no  $C_L$  obtida entre as situações de moto frontal com e sem asa, para moto traseira sem asa - Variação longitudinal

### Relação entre $C_M$ e Distância Longitudinal entre Motos

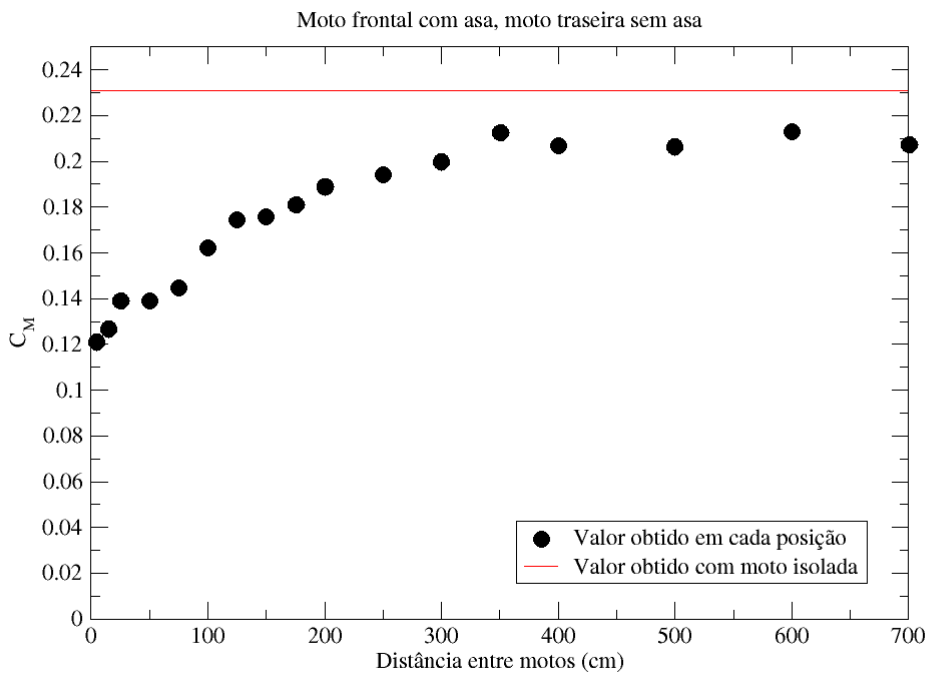


Figura 4.38: Variação do  $C_M$  com distância longitudinal - Situação de moto frontal com asa e moto traseira sem asa

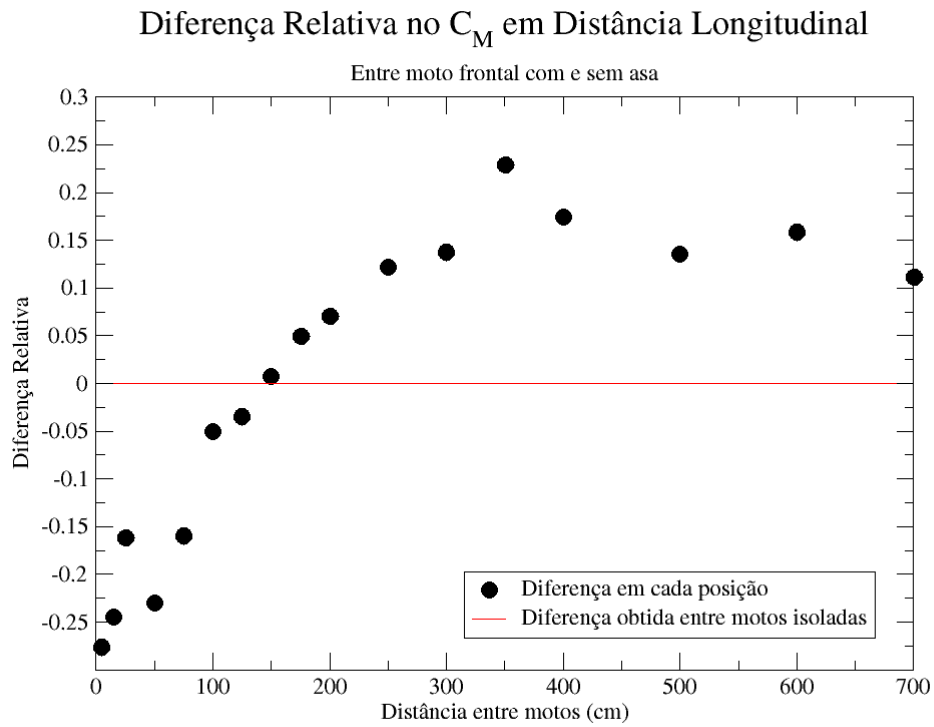


Figura 4.39: Diferença relativa no  $C_M$  obtida entre as situações de moto frontal com e sem asa, para moto traseira sem asa - Variação longitudinal

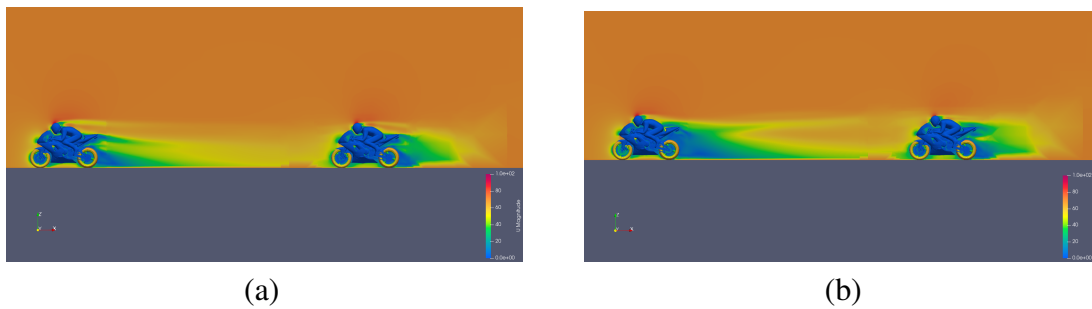


Figura 4.40: Campo de velocidades no plano xz para uma distância longitudinal entre motos de 700cm (a) Situação de duas motos sem asa (b) Situação de moto frontal com asa e moto traseira sem asa



sem asa, nota-se que a curtas distâncias, a asa na moto frontal favorece a ultrapassagem por reduzir arrasto, sustentação e tendência de empinamento. A distâncias maiores, essa redução é inferior à gerada por uma moto sem asa; porém, visto que já é uma redução relativamente baixa, o impacto disso não é drástico.

### 4.3.3 Análise dos Coeficientes - Variação Lateral

O coeficiente de arrasto, ilustrado na figura 4.41, apresenta alta redução a baixas distâncias, com gradual aumento do coeficiente com aumento da distância, e recuperação do valor original nas distâncias máximas simuladas.

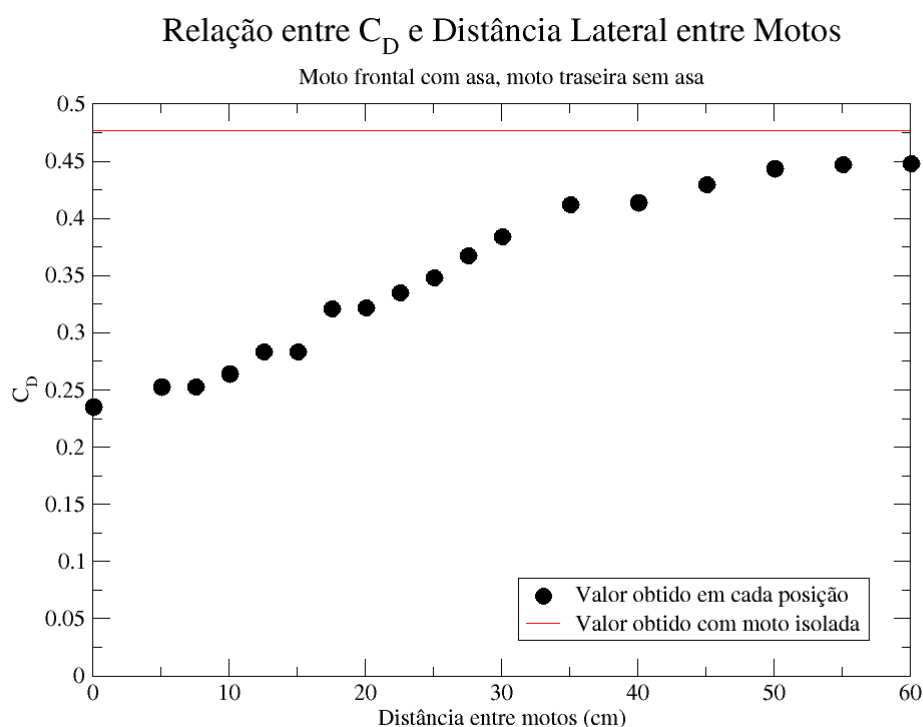


Figura 4.41: Variação do  $C_D$  com distância lateral - Situação de moto frontal com asa e moto traseira sem asa

A sustentação, por outro lado, apresenta comportamento vastamente distinto do observado no caso de duas motos, como pode ser visto na figura 4.43. Com alta oscilação até cerca de 20cm, pico em 22,5cm e posterior decréscimo sem recuperação do valor original, existem diversas diferenças.

Essas diferenças são causadas pelo vórtice de ponta de asa da asa esquerda, como pode ser visto nas visualizações da figura 4.44. Embora esse vórtice seja desviado para as laterais da moto traseira na maior parte das posições analisadas, à distância de 22,5cm o vórtice é desviado para cima da moto traseira, gerando nesse entorno uma região de baixa pressão que contribui para a sustentação.

Distância	$C_D$	$C_L$	$C_M$	$C_S$	$C_R$
0cm em y	0,23545	0,00798 $\pm 0,00937$	0,12125	0,06720 $\pm 0,01263$	-0,04167 $\pm 0,00735$
5cm em y	0,25299	0,01828 $\pm 0,00512$	0,13392	0,06928 $\pm 0,00779$	-0,03569 $\pm 0,00484$
7,5cm em y	0,25253	0,02200 $\pm 0,01107$	0,12938	0,06732 $\pm 0,01447$	-0,03342 $\pm 0,00829$
10cm em y	0,26440	0,00964 $\pm 0,00488$	0,13016	0,07131 $\pm 0,01717$	-0,03312 $\pm 0,00929$
12,5cm em y	0,28339	0,03380 $\pm 0,01140$	0,13990	0,09287 $\pm 0,01726$	-0,04470 $\pm 0,00999$
15cm em y	0,28345	0,04618 $\pm 0,00680$	0,15504	0,05924 $\pm 0,02012$	-0,02052 $\pm 0,01132$
17,5cm em y	0,32061	0,03658 $\pm 0,00837$	0,15778	0,08013 $\pm 0,01968$	-0,03471 $\pm 0,01042$
20cm em y	0,32149	0,06971 $\pm 0,00553$	0,17449	0,06466 $\pm 0,01408$	-0,02483 $\pm 0,00756$
22,5cm em y	0,33496	0,06895 $\pm 0,00747$	0,18120	0,08941 $\pm 0,01019$	-0,03431 $\pm 0,00558$
25cm em y	0,34822	0,07105 $\pm 0,00395$	0,18617	0,09473 $\pm 0,00905$	-0,03457 $\pm 0,00464$
27,5cm em y	0,36708	0,04730 $\pm 0,00321$	0,18183	0,10852 $\pm 0,00861$	-0,04155 $\pm 0,00455$
30cm em y	0,38418	0,03498 $\pm 0,00525$	0,18112	0,10528 $\pm 0,01228$	-0,03831 $\pm 0,00582$
35cm em y	0,41219	0,03348 $\pm 0,00383$	0,19078	0,12319 $\pm 0,00829$	-0,04557 $\pm 0,00415$
40cm em y	0,41419	0,03898 $\pm 0,00432$	0,18896	0,09627 $\pm 0,00784$	-0,03532 $\pm 0,00424$
45cm em y	0,42954	0,03899 $\pm 0,00415$	0,19057	0,07814 $\pm 0,00781$	-0,03148 $\pm 0,00541$
50cm em y	0,44392	0,05594 $\pm 0,00385$	0,20967	0,08301 $\pm 0,00882$	-0,03191 $\pm 0,00452$
55cm em y	0,44691	0,05009 $\pm 0,00281$	0,20815	0,04860 $\pm 0,00666$	-0,01617 $\pm 0,00320$
60cm em y	0,44811	0,05313 $\pm 0,00292$	0,21046	0,07221 $\pm 0,00852$	-0,02734 $\pm 0,00471$

Tabela 4.11: Coeficientes obtidos para cada caso de simulação - Distância lateral entre duas motos sem asa

### Diferença Relativa no $C_D$ em Distância Lateral

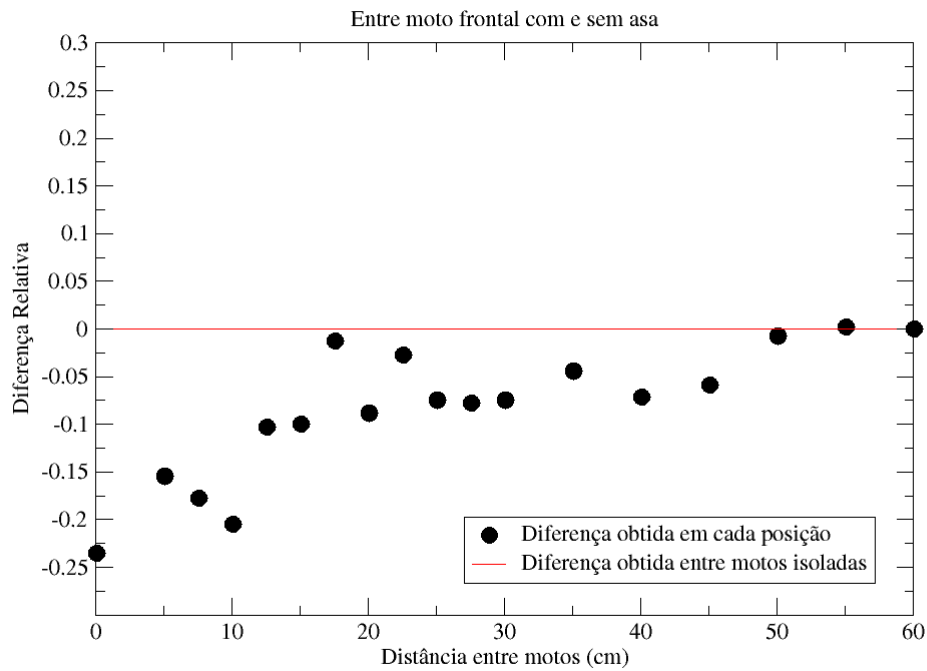


Figura 4.42: Diferença relativa no  $C_D$  obtida entre as situações de moto frontal com e sem asa, para moto traseira sem asa - Variação lateral

### Relação entre $C_L$ e Distância Lateral entre Motos

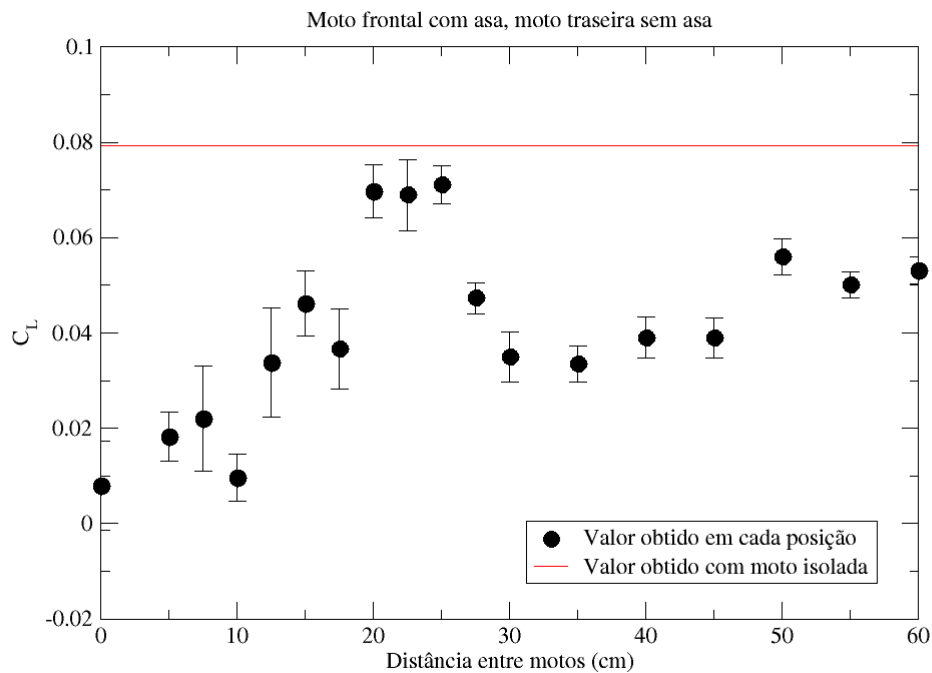


Figura 4.43: Variação do  $C_L$  com distância lateral - Situação de moto frontal com asa e moto traseira sem asa

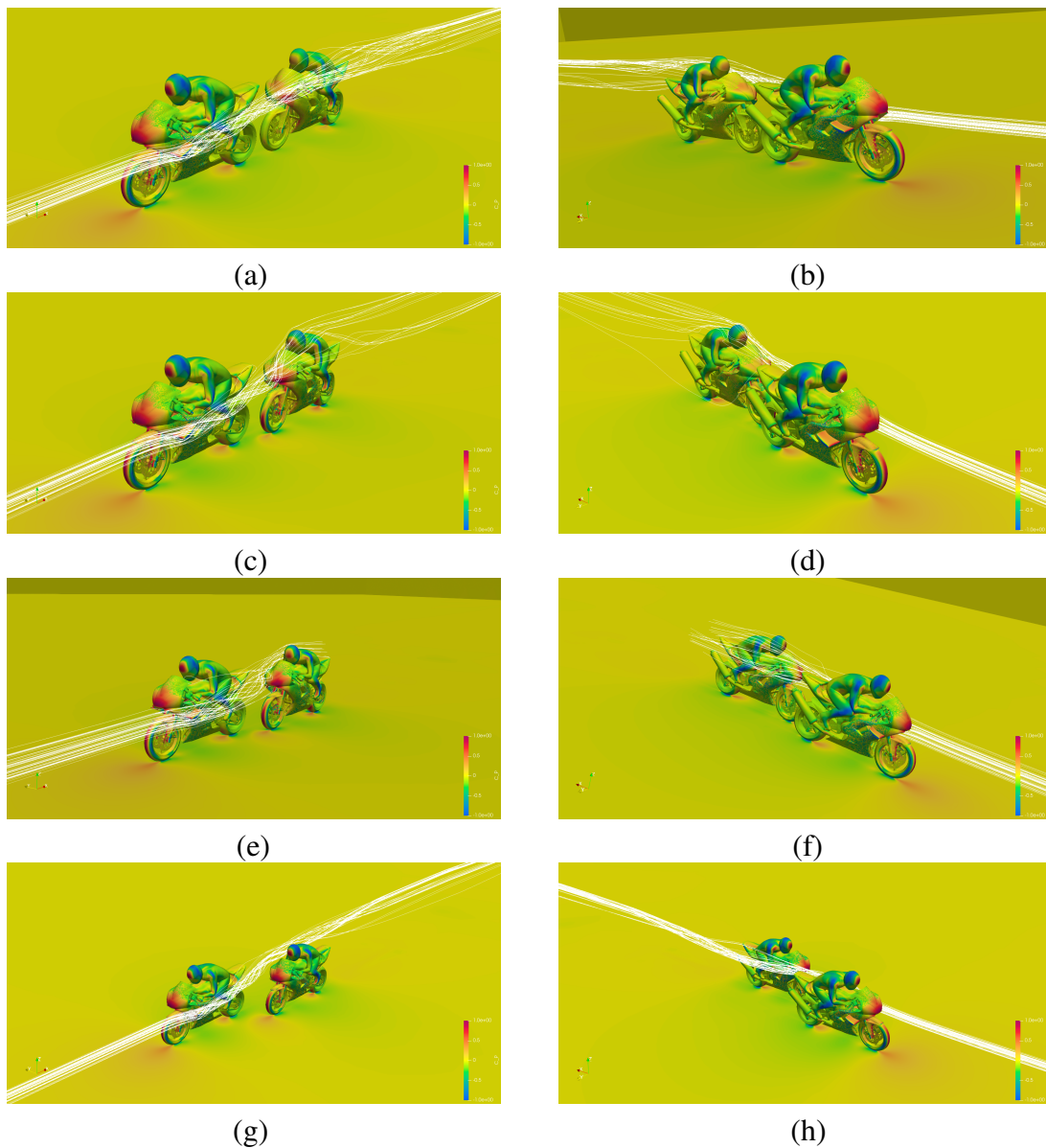


Figura 4.44: Campo de pressão na superfície e vórtice de ponta de asa para uma distância lateral entre motos de (a, b) 10cm (c, d) 22,5cm (e, f) 35cm (g, h) 60cm - Situação de moto frontal com asa e moto traseira sem asa

O perfil de diferença relativa entre os casos ilustrado na figura 4.45 evidencia que, com exceção da região no entorno de 22,5cm de distância, a sustentação é inferior para o caso de uma moto frontal com asa, condição favorável para a ultrapassagem. Vale notar, porém, que a variação rápida da sustentação com variação da distância nessa região de pico pode piorar a manobrabilidade da moto, tornando seu comportamento menos previsível.

O coeficiente de momento em geral acompanha o perfil de variação do coeficiente de arrasto, como pode ser visto na figura 4.46. A única exceção é a breve oscilação na região de 22,5cm, que tem como responsável o aumento drástico na sustentação nessa região. Portanto, o perfil relativo entre os dois casos mostrado em 4.47 é similar ao perfil mostrado em 4.42, porém com maior oscilação e o aumento previamente mencionado na região de 22,5cm.

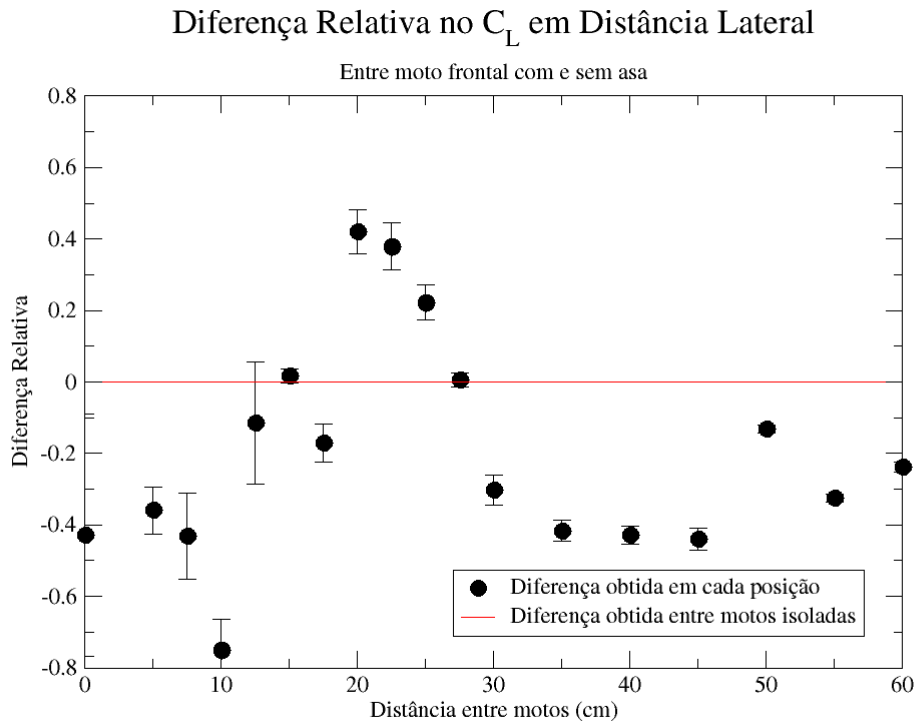


Figura 4.45: Diferença relativa no  $C_L$  obtida entre as situações de moto frontal com e sem asa, para moto traseira sem asa - Variação lateral

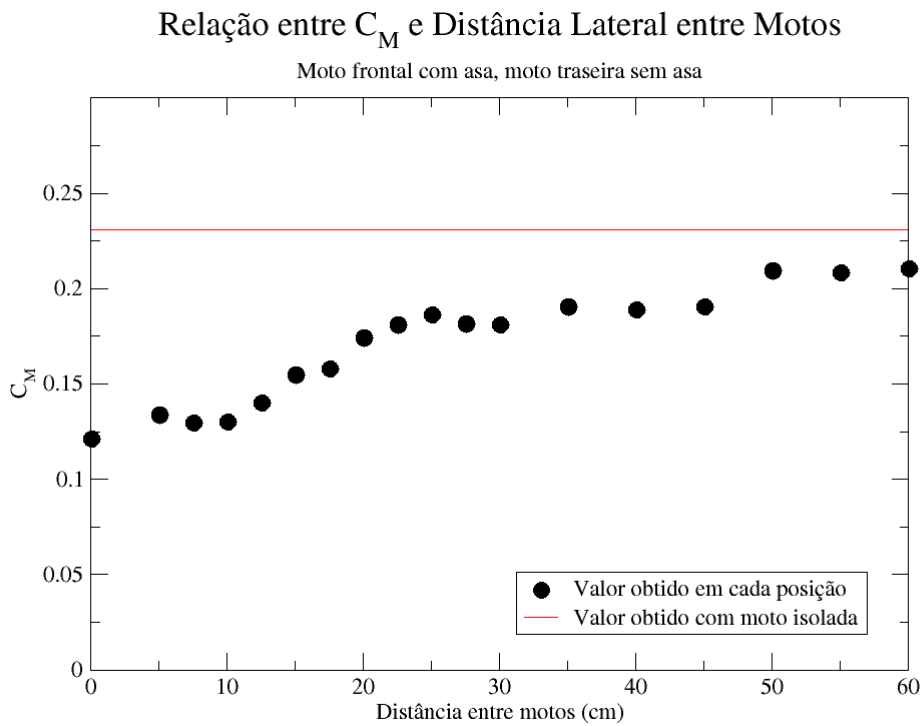


Figura 4.46: Variação do  $C_M$  com distância lateral - Situação de moto frontal com asa e moto traseira sem asa

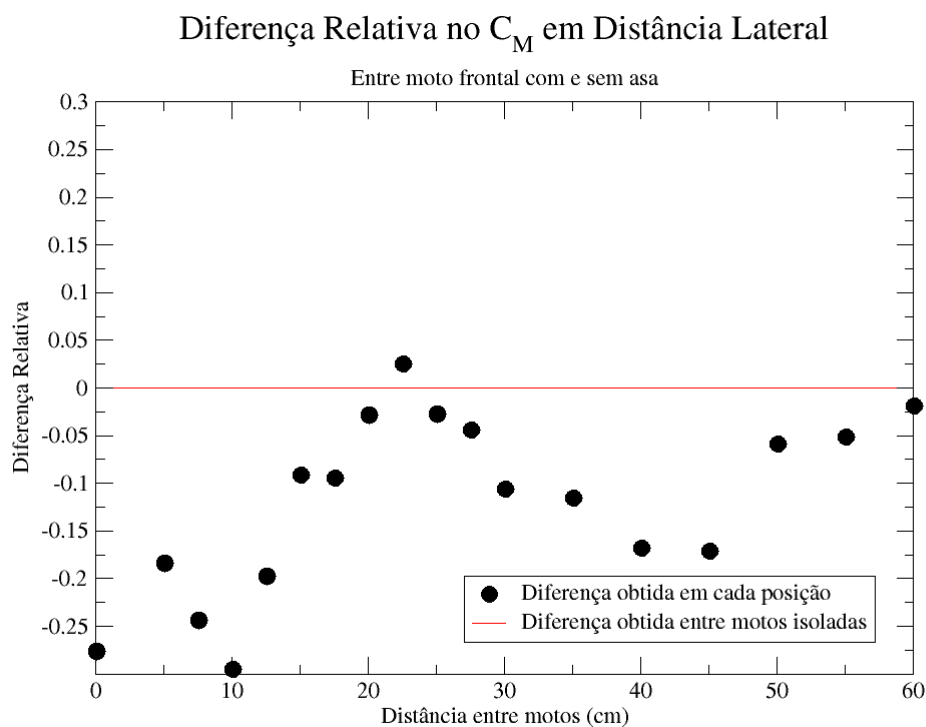


Figura 4.47: Diferença relativa no  $C_M$  obtida entre as situações de moto frontal com e sem asa, para moto traseira sem asa - Variação lateral

O perfil de força lateral, ilustrado no gráfico da figura 4.48, é mais errático, apresentando elevada oscilação para distâncias entre 7,5cm e 25cm. Porém, ainda é possível determinar uma tendência geral de aumento a partir de 22,5cm, com pico e posterior decréscimo no marco de 35cm. Nota-se que este pico é claramente distinto do pico atingido na situação de duas motos sem asa, na região entre 12,5cm e 15cm. Há uma evidente distinção no comportamento entre os dois casos.

Esse novo comportamento pode ser explicado pelos vórtices de ponta de asa, ilustrados nas visualizações da figura 4.44. A baixas distâncias, a força lateral gerada sobre o braço do motociclista no caso anterior é equilibrada pelo vórtice de ponta de asa da asa esquerda, que ao ser desviado para o lado esquerdo da moto traseira, diminui a pressão nesse lado. A partir de 22,5cm, o vórtice passa a ser desviado para ambos os lados da moto, diminuindo o efeito de equilíbrio previamente mencionado. A uma distância lateral de 35cm, onde a força lateral atinge o pico, nota-se que o vórtice gerado pela asa direita da moto frontal é completamente desviado para o lado esquerdo da moto traseira, gerando uma região de baixa pressão próxima à superfície da moto e promovendo a força lateral. A distâncias maiores, essa região se distancia da moto traseira e portanto seu efeito sobre ela se atenua.

Comparando o perfil com o exibido para duas motos sem asa por meio do gráfico 4.49, o efeito do vórtice se torna evidente. A baixas distâncias, o vácuo mais intenso gerado pela moto com asa leva a um aumento relativo na força lateral, que é gradualmente equilibrado

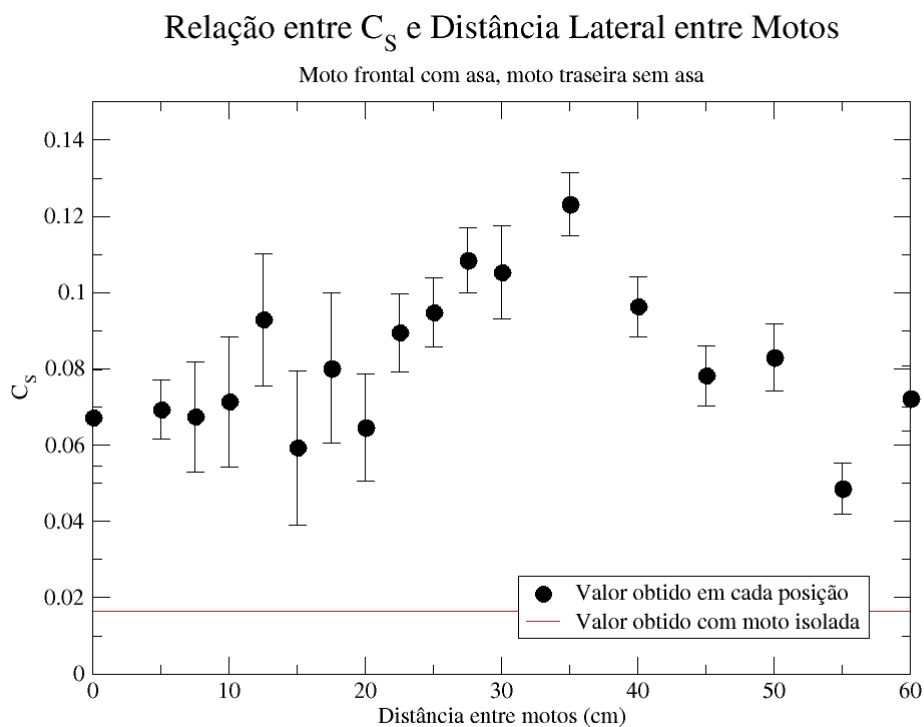


Figura 4.48: Variação do  $C_S$  com distância lateral - Situação de moto frontal com asa e moto traseira sem asa

pele ponta de asa desviado para a superfície esquerda da moto traseira. Com o aumento da distância, porém, o vórtice passa a ser desviado para o lado esquerdo da moto traseira, e seu efeito se soma ao da esteira de vórtices, gerando um pico na força lateral superior ao visto no caso de duas motos sem asa. A distâncias ainda mais altas, esse efeito se atenua, e a força lateral perde intensidade.

Vale notar, porém, que o excessivo desvio padrão apresentado em cada ponto pode representar não apenas uma instabilidade aerodinâmica, mas também uma limitação do modelo RANS aplicado. Dada a complexidade do escoamento e a importância dos fluxos perpendiculares ao escoamento não perturbado para análise do coeficiente, as aproximações essenciais do modelo RANS. Assim, para uma análise mais conclusiva da situação, seria de grande interesse a realização de simulações mais precisas e complexas, como por exemplo uma que utilize o modelo LES.

Novamente, o coeficiente de momento de rolamento exibe tendência análoga ao coeficiente lateral, o que pode ser visualizado na figura 4.50. Em razão disso, não foi feita uma comparação entre os diferentes casos, visto que exibiria perfil análogo ao da figura 4.49. Aqui nota-se novamente, e de forma ainda mais acentuada, os desvios padrões excessivos que mostram as limitações do modelo RANS aplicado.

Assim como no caso de variação de distância longitudinal, o efeito do vórtice de ponta de asa foi majoritariamente benéfico para fins de ultrapassagem, visto que diminui a susten-

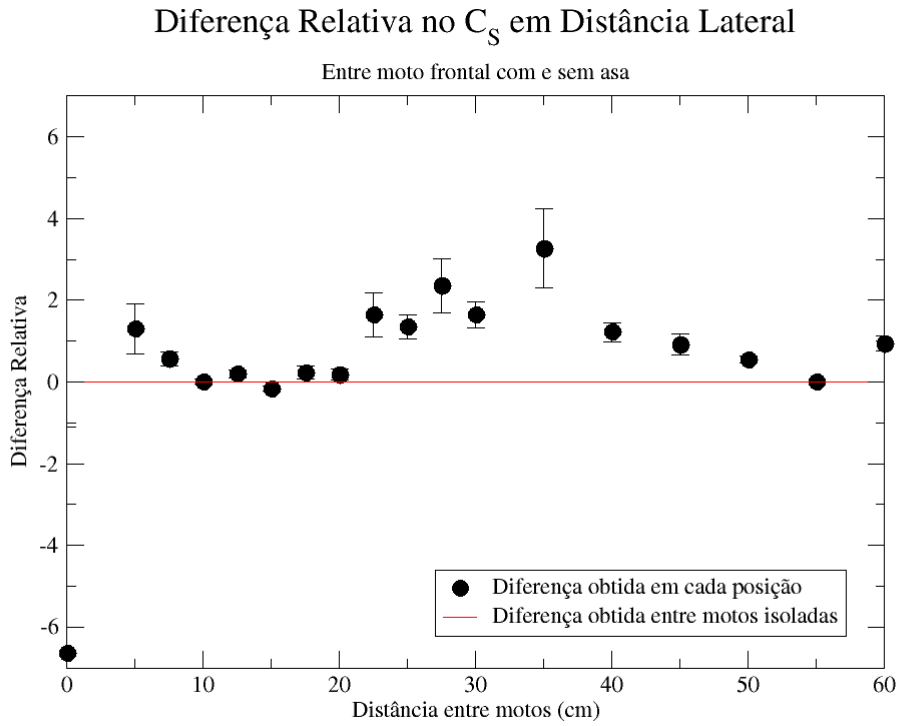


Figura 4.49: Diferença relativa no  $C_S$  obtida entre as situações de moto frontal com e sem asa, para moto traseira sem asa - Variação lateral

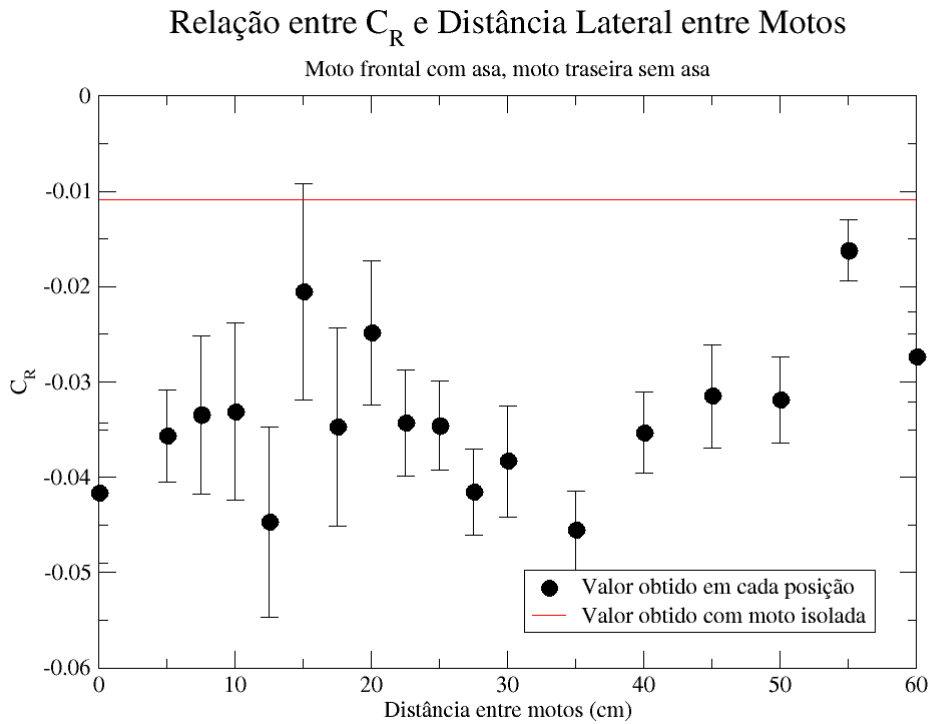


Figura 4.50: Variação do  $C_R$  com distância lateral - Situação de moto frontal com asa e moto traseira sem asa



tação, arrasto e momento de empenamento da moto traseira em grande parte das posições analisadas. Porém, um tema a ser analisado é a força lateral, que se intensifica significativamente tanto em módulo quanto em instabilidade. Isso pode representar um risco de segurança aos motociclistas.

## 4.4 Situação de Ultrapassagem - Duas Motos com Asa

Os casos anteriores permitiram analisar o efeito da esteira de vórtices e do vórtice de ponta de asa sobre uma moto sem asa. Agora, é possível analisar o efeito desse escoamento sobre uma moto com asa, apontando quaisquer diferenças nas tendências gerais da aerodinâmica da moto traseira. Novamente, as posições utilizadas nos casos anteriores foram mantidas para este.

### 4.4.1 Malha Gerada e Tempo de Simulação

As características da malha gerada para cada posição são apresentadas na tabela 4.12. Malhas com cerca de 18.000.000 elementos apresentam 4 camadas, enquanto que as demais apresentam 5. Nota-se que o número de posições que requeriram uma malha de 4 camadas é superior neste caso comparado aos anteriores, com mais de metade das malhas possuindo apenas 4 camadas; isso é um reflexo do perfil caótico do escoamento gerado, propenso a instabilidades numéricas. A cobertura das malhas de camada se mostrou satisfatória.

Com maior redução no número de elementos de malha, coerente com o fato de motos com asa requerirem menos elementos na malha, houve também uma maior redução no tempo de simulação. O tempo médio para realização de 2000 iterações foi de aproximadamente 1 hora e 40 minutos para as malhas com 5 camadas, e 1 hora e 20 minutos para as malhas de 4 camadas. Comparado com o caso de duas motos sem asa nota-se uma diminuição significativa de cerca de 40 minutos de execução para as malhas de 5 camadas, que diminuiu para 20 minutos no caso de 4 camadas. Isso demonstra a relação não linear entre número de elementos e tempo de simulação, visto que a diferença no número de elementos entre os casos é de cerca de 5.000.000 para malhas tanto de 5 quanto de 4 camadas.

O perfil de convergência, ilustrado pelos gráficos das figuras 4.51 e 4.52 apresentados como exemplo, mantém o mesmo comportamento geral dos demais casos de duas motocicletas. Assim, o método de cálculo dos coeficientes aerodinâmicos não é alterado: é tirada a média dos valores nas últimas 1000 iterações, bem como o desvio padrão amostral para o  $C_L$ ,  $C_S$  e  $C_R$ .

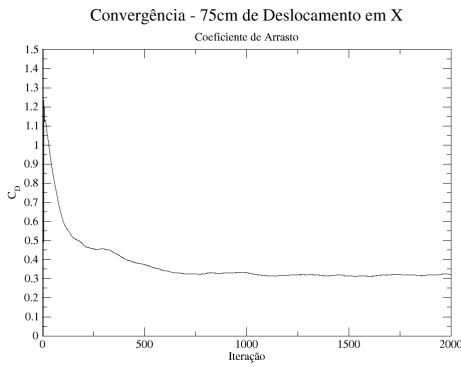
### 4.4.2 Análise dos Coeficientes - Variação Longitudinal

Primeiramente, o coeficiente de arrasto é representado na figura 4.53. Esse perfil não apresenta grandes diferenças comparado aos demais casos, com redução elevada no arrasto a baixas distâncias, e gradual aumento do arrasto com aumento da distância, sem recuperação do valor original à distância máxima simulada. As visualizações em 4.54 e 4.55 permitem constatar que a origem desse comportamento também não sofreu alterações.

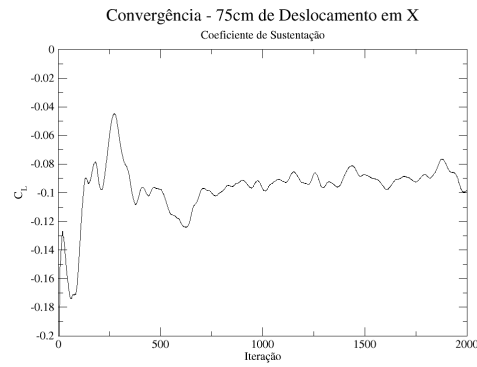
A sustentação, assim como nos demais casos, apresenta diminuição em módulo para bai-

Distância	Nº de elementos	Nº de nós	Cobertura de camada (%)	Tempo de simulação (s)
5cm em x	20.191.732	8.834.607	76,8652	5844
15cm em x	17.895.790	7.892.870	76,2669	4775
25cm em x	17.888.923	7.884.596	76,1577	4797
50cm em x	17.885.928	7.883.553	76,1381	4688
75cm em x	17.889.575	7.885.455	76,1584	4621
100cm em x	17.894.035	7.889.415	76,1639	4584
125cm em x	17.897.514	7.886.369	76,1535	4439
150cm em x	17.895.868	7.885.416	76,1297	4603
175cm em x	17.899.439	7.886.805	76,1532	4514
200cm em x	17.899.349	7.887.368	76,1794	4426
250cm em x	17.901.114	7.887.297	76,1428	4588
300cm em x	17.899.978	7.887.449	76,1777	4544
350cm em x	17.904.699	7.890.652	76,1524	4540
400cm em x	17.911.599	7.895.712	76,1695	4419
500cm em x	17.920.550	7.903.910	76,147	4441
600cm em x	17.938.601	7.914.223	76,1596	4486
700cm em x	17.941.611	7.914.591	76,1493	4398
5cm em y	20.266.712	8.855.961	76,8154	5755
7,5cm em y	20.229.955	8.849.553	76,7598	5777
10cm em y	20.280.718	8.867.573	77,0281	5850
12,5cm em y	20.191.537	8.834.008	76,8451	5911
15cm em y	20.219.047	8.834.565	76,7005	5989
17,5cm em y	17.934.627	7.904.971	76,3014	4779
20cm em y	20.231.702	8.850.221	76,7593	5843
22,5cm em y	20.281.183	8.868.301	77,0269	5985
25cm em y	20.194.784	8.837.207	76,8961	5891
27,5cm em y	20.222.815	8.835.497	76,6649	5785
30cm em y	17.941.134	7.908.865	76,3233	4624
35cm em y	20.271.723	8.859.034	76,9772	5775
40cm em y	20.212.179	8.826.940	76,6696	5716
45cm em y	20.233.871	8.850.905	76,7652	5828
50cm em y	20.198.236	8.837.098	76,8886	5973
55cm em y	17.945.337	7.909.796	76,3191	4469
60cm em y	20.276.658	8.862.932	76,9867	5813

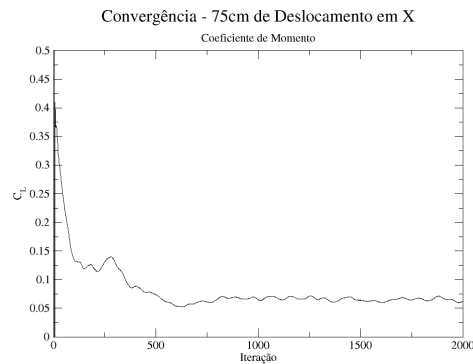
Tabela 4.12: Características da malha gerada para cada caso de simulação



(a)



(b)



(c)

Figura 4.51: Gráficos de convergência para a distância longitudinal de 75cm - (a)  $C_D$  (b)  $C_L$  (c)  $C_M$  - Situação de duas motos com asa

xas distâncias longitudinais e tem seu valor original gradualmente recuperado, como mostrado na figura 4.56. Até uma distância de 175cm, porém, a variação do valor do coeficiente é diminuta e consiste primariamente de oscilações; a partir desse ponto há um aumento em módulo mais significativo e estável. Vale notar que, como a sustentação da moto com asa é negativa, o efeito da moto frontal gera um aumento da sustentação na moto traseira, o contrário do ocorrido nos demais casos. Isso prejudica tanto a ultrapassagem quanto a frenagem, podendo portanto ser um fator de risco. Vale também notar que mesmo na máxima distância analisada, o coeficiente ainda se mantém incapaz de recuperar o valor original.

As visualizações da figura 4.57, que ilustram o campo de velocidades no plano xz e posição -25cm em y, permitem elaborar uma possível explicação para o comportamento da sustentação. Como pode ser visto, a baixas distâncias, a parcela da esteira de vórtices gerada pelo pé do motociclista alcança o lado de alta velocidade da asa moto traseira, sem ter grande efeito no lado de baixa velocidade. Assim, sua capacidade de gerar downforce é atenuada, e seu aumento com a distância é equilibrado pelo aumento em sustentação causado pela carenagem da moto. A partir da distância de 175cm, porém, esse efeito se torna cada vez mais diminuto, permitindo um maior aumento no downforce. Esse fenômeno é portanto uma peculiaridade geométrica da moto estudada neste trabalho, e pode não se reproduzir na análise de outras motos com asa na mesma situação.

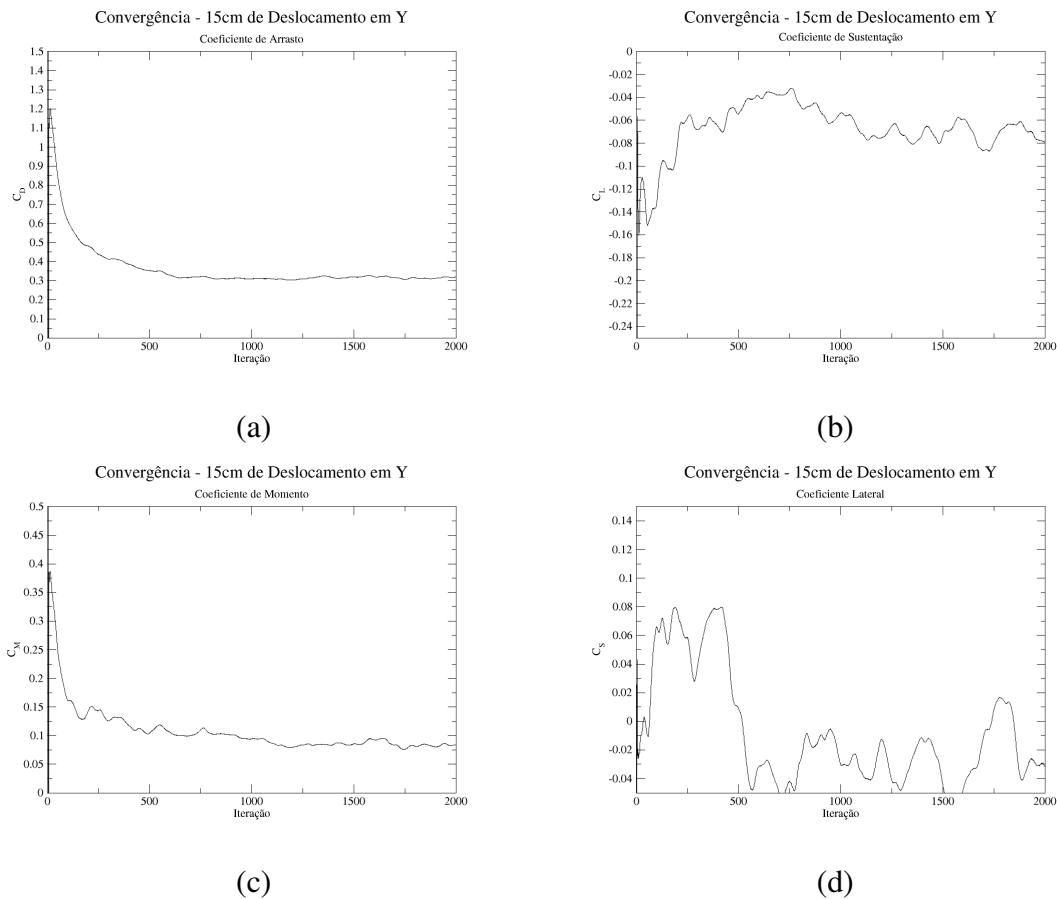


Figura 4.52: Gráficos de convergência para a distância lateral de 15cm - (a)  $C_D$  (b)  $C_L$  (c)  $C_M$  (d)  $C_S$  - Situação de duas motos com asa

O perfil do coeficiente de momento, ilustrado na figura 4.58, exibe comportamento até então não registrado neste trabalho. Embora a redução inicial e gradual recuperação coincidam com casos anteriores, aqui o valor original é atingido à distância de 175cm, e então superado a distâncias superiores. Esse crescimento é causado pelo aumento no arrasto sem mudança na sustentação; após o marco de 175cm, a sustentação passa a diminuir com aumento da distância, equilibrando o efeito do arrasto e mantendo o coeficiente de momento praticamente constante.

Comparando com demais casos, em que os efeitos aerodinâmicos sobre a moto traseira eram praticamente completamente positivos na variação longitudinal, nota-se que na situação de duas motos com asa existem tanto vantagens quanto desvantagens para a moto traseira. A redução no arrasto se mantém como fator que propicia ultrapassagens; porém, esse efeito somado à redução no downforce, e conseqüente aumento na tendência de empinamento, prejudica a frenagem, e pode portanto ser um empecilho, ou mesmo um perigo, em seções de curva da pista.

Distância	$C_D$	$C_L$	$C_M$
5cm em x	0,25589	-0,07635 ± 0,00860	0.06022
15cm em x	0,27238	-0,08591 ± 0,00668	0.05923
25cm em x	0,28974	-0,08441 ± 0,00628	0.06295
50cm em x	0,30210	-0,08489 ± 0,00996	0.06444
75cm em x	0,31816	-0,09020 ± 0,00477	0.06575
100cm em x	0,33179	-0,08447 ± 0,00658	0.07470
125cm em x	0,34459	-0,08156 ± 0,00502	0.07747
150cm em x	0,35440	-0,07733 ± 0,00620	0.08475
175cm em x	0,36476	-0,07968 ± 0,00467	0.09024
200cm em x	0,37286	-0,08240 ± 0,00419	0.09089
250cm em x	0,38516	-0,07100 ± 0,00591	0.10759
300cm em x	0,40962	-0,09521 ± 0,00464	0.09744
350cm em x	0,40740	-0,09263 ± 0,00651	0.10474
400cm em x	0,43371	-0,10208 ± 0,00351	0.10287
500cm em x	0,44666	-0,11147 ± 0,00362	0.10023
600cm em x	0,45142	-0,11706 ± 0,00338	0.09929
700cm em x	0,46155	-0,12527 ± 0,00498	0.10049

Tabela 4.13: Coeficientes obtidos para cada caso de simulação - Distância longitudinal entre duas motos sem asa

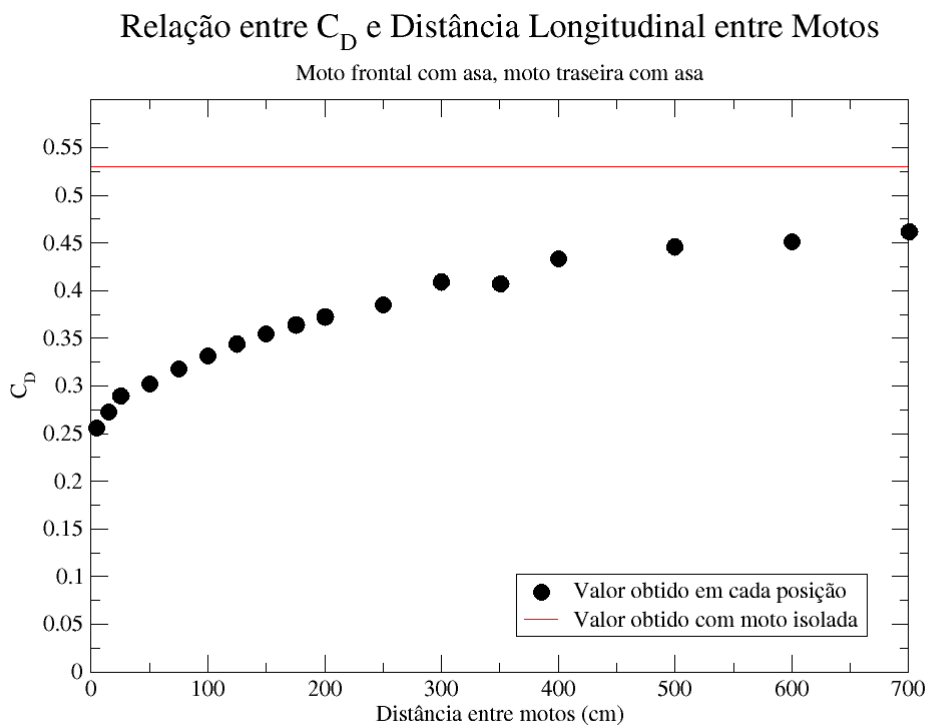


Figura 4.53: Variação do  $C_D$  com distância longitudinal - Situação de duas motos com asa

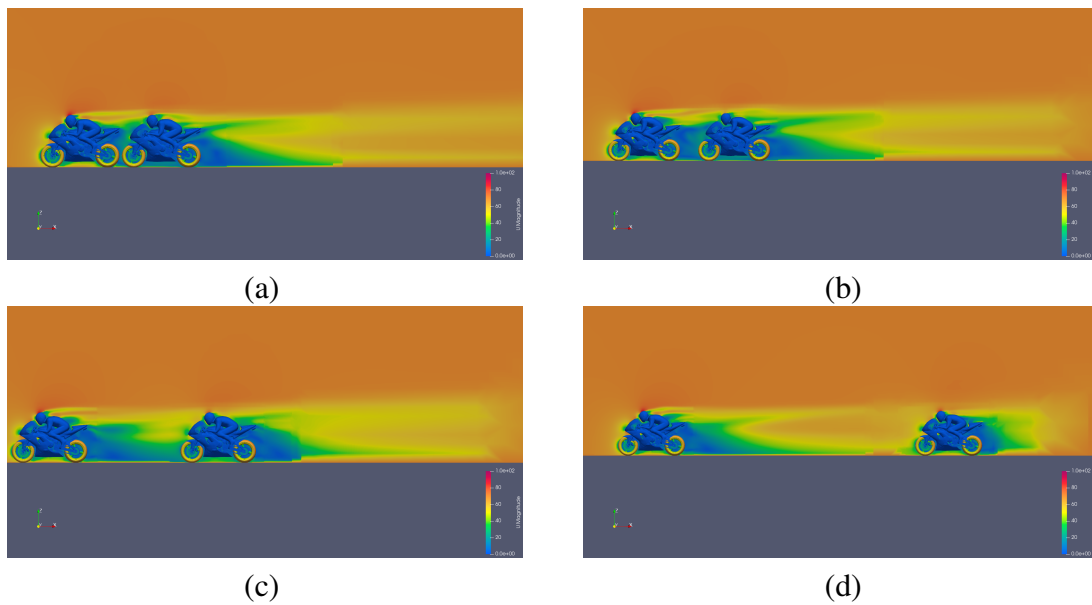


Figura 4.54: Campo de velocidades no plano xz para uma distância longitudinal entre motos de (a) 5cm (b) 50cm (c) 250cm (d) 700cm - Situação de duas motos com asa

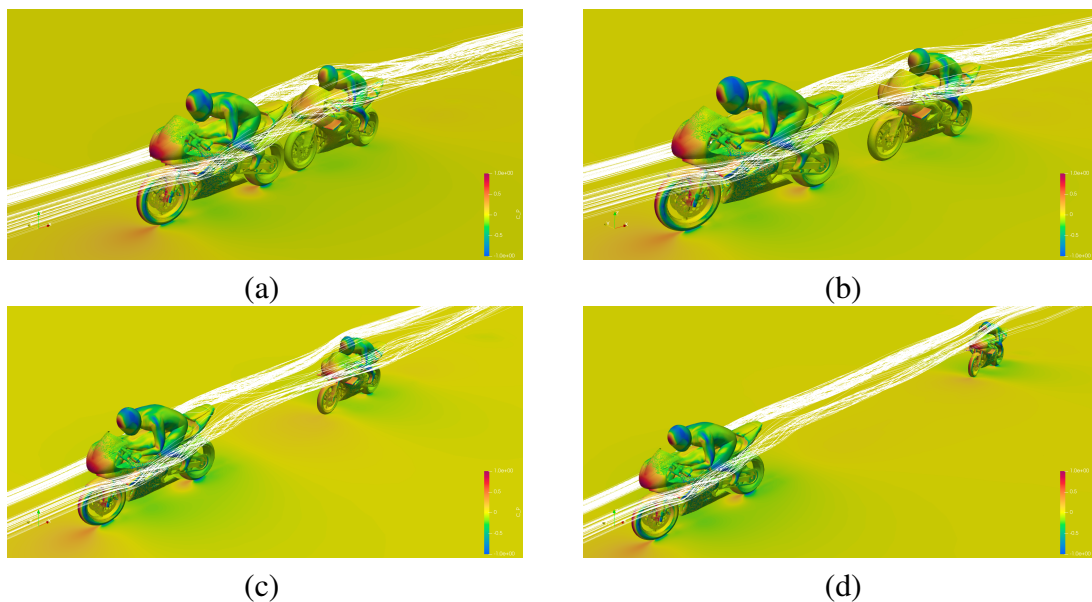


Figura 4.55: Campo de pressão na superfície para uma distância longitudinal entre motos de (a) 5cm (b) 50cm (c) 250cm (d) 700cm - Situação de duas motos com asa

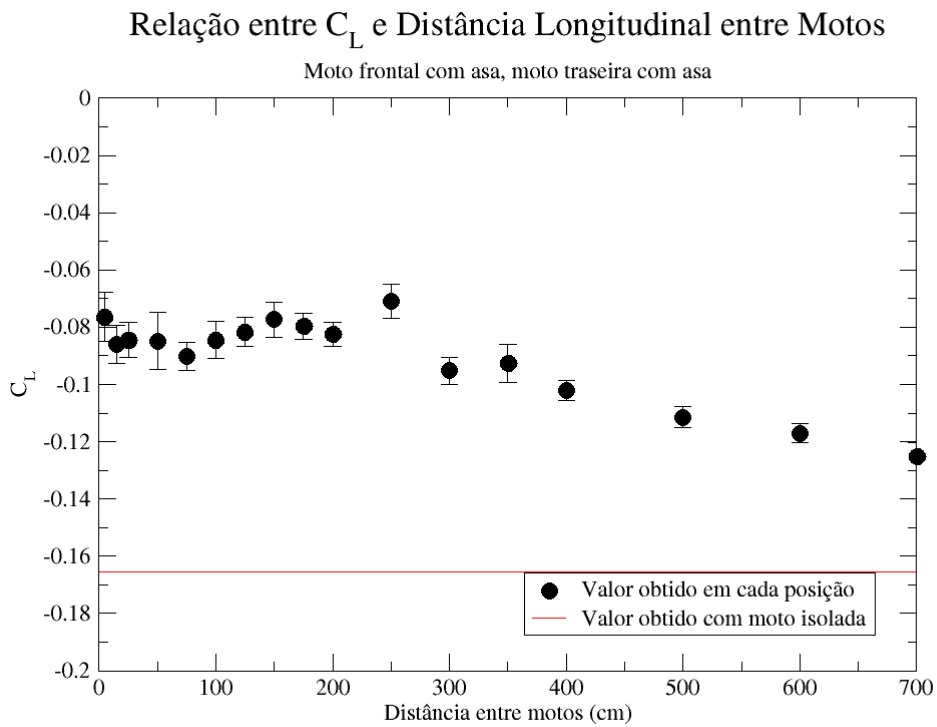


Figura 4.56: Variação do  $C_L$  com distância longitudinal - Situação de duas motos com asa

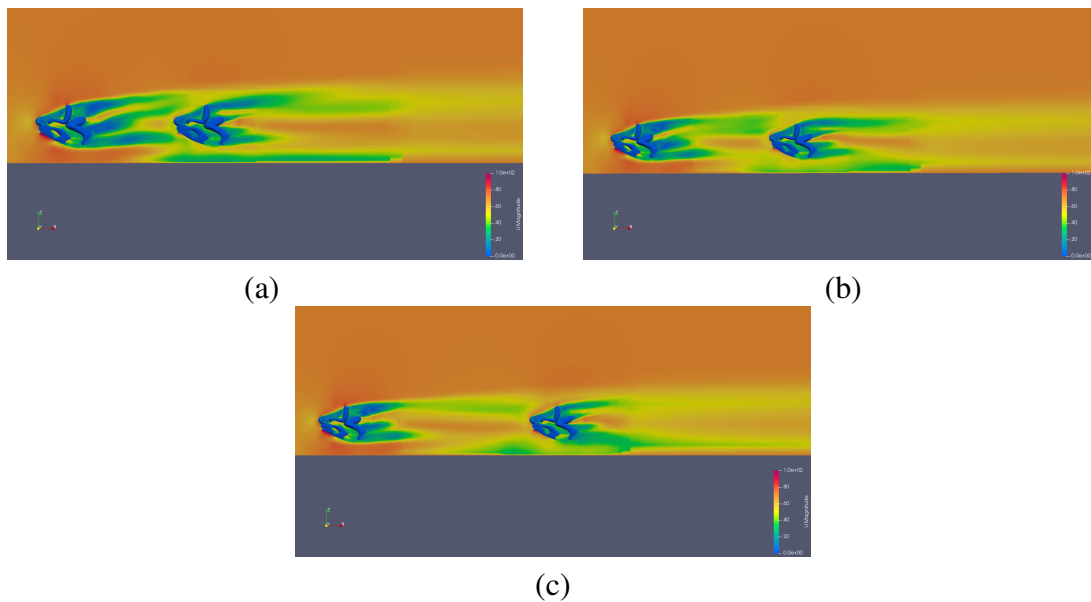


Figura 4.57: Campo de velocidades no plano  $xz$  e posição  $-25\text{cm}$  em  $y$  para uma distância longitudinal entre motos de (a)  $75\text{cm}$  (b)  $175\text{cm}$  (c)  $300\text{cm}$  - Situação de duas motos com asa



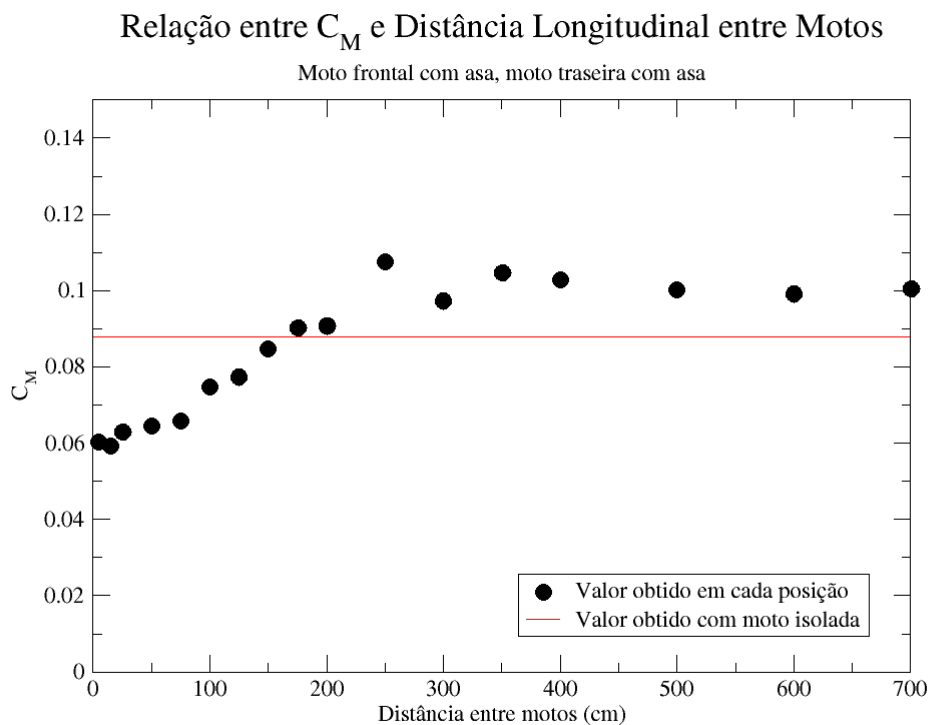


Figura 4.58: Variação do  $C_M$  com distância longitudinal - Situação de duas motos com asa

### 4.4.3 Análise dos Coeficientes - Variação Lateral

Os valores obtidos para cada coeficiente em cada posição são listados na tabela 4.14. Gráficos expressam o perfil de cada coeficiente aerodinâmico individualmente, e visualizações facilitam a análise dos fenômenos que regem os comportamentos observados.

O perfil do arrasto segue o mesmo perfil observado no caso de moto frontal com asa e moto traseira sem asa, como a figura 4.59 evidencia. Portanto, não há diferença significativa nos mecanismos que regem o arrasto nesse caso.

A sustentação, por outro lado, segue um perfil que, à primeira vista, parece desviar dos demais casos, como mostrado na figura 4.60. Porém, uma análise da situação permite concluir que esse comportamento é esperado. O pico em sustentação à distância de 22,5 cm ocorre pelo mesmo motivo em que ocorre no caso de moto frontal com asa e moto traseira sem asa: o vórtice de ponta de asa da moto frontal é desviado para cima da moto, gerando uma região de baixa pressão que promove a sustentação. Isso é registrado nas visualizações da figura 4.61. A maiores distâncias, o valor original de sustentação é rapidamente recuperado.

Por consequência dessa alteração no perfil de sustentação, o perfil de momento, dado na figura 4.62, também é afetado. Embora o momento de empinamento seja inicialmente reduzido, seu valor sobre e atinge um pico na mesma posição do pico de sustentação, superando o valor original do coeficiente em mais de 50%. Após isso, o aumento no downforce leva a

Distância	$C_D$	$C_L$	$C_M$	$C_S$	$C_R$
0cm em y	0,25589	-0,07635 ± 0,00860	0,06022	0,02861 ± 0,01122	-0,01678 ± 0,00613
5cm em y	0,26239	-0,06477 ± 0,00733	0,07583	0,03527 ± 0,01767	-0,00709 ± 0,01017
7,5cm em y	0,26450	-0,05757 ± 0,00729	0,07860	-0,00755 ± 0,00818	0,01969 ± 0,00412
10cm em y	0,27692	-0,04693 ± 0,01129	0,08550	-0,00038 ± 0,01220	0,01547 ± 0,00698
12,5cm em y	0,30322	-0,04619 ± 0,01287	0,09141	-0,00261 ± 0,01288	0,01233 ± 0,00713
15cm em y	0,31437	-0,07052 ± 0,00791	0,08534	-0,02665 ± 0,01856	0,03239 ± 0,01056
17,5cm em y	0,33336	-0,04088 ± 0,00893	0,10751	0,04907 ± 0,02118	0,01186 ± 0,00598
20cm em y	0,35549	-0,03012 ± 0,00548	0,11932	0,01436 ± 0,01027	0,01886 ± 0,00605
22,5cm em y	0,37685	-0,01954 ± 0,00773	0,13479	0,02706 ± 0,01252	0,00935 ± 0,00577
25cm em y	0,41422	-0,03875 ± 0,00568	0,13112	0,04851 ± 0,01030	-0,00797 ± 0,00552
27,5cm em y	0,41527	-0,06351 ± 0,00562	0,11864	0,04410 ± 0,01151	-0,00553 ± 0,00611
30cm em y	0,42733	-0,10991 ± 0,00763	0,09769	0,10652 ± 0,01797	-0,03689 ± 0,00957
35cm em y	0,45387	-0,10085 ± 0,00639	0,10422	0,08484 ± 0,01429	-0,02407 ± 0,00747
40cm em y	0,46691	-0,14624 ± 0,00491	0,08170	0,07353 ± 0,01404	-0,02431 ± 0,00791
45cm em y	0,47521	-0,17022 ± 0,00318	0,07108	0,09934 ± 0,01659	-0,03936 ± 0,01033
50cm em y	0,51591	-0,16663 ± 0,00618	0,09344	0,06561 ± 0,01122	-0,01995 ± 0,00607
55cm em y	0,50217	-0,17597 ± 0,00747	0,07195	0,08228 ± 0,00992	-0,02980 ± 0,00463
60cm em y	0,50591	-0,15512 ± 0,00345	0,08802	0,03453 ± 0,00589	-0,00543 ± 0,00303

Tabela 4.14: Coeficientes obtidos para cada caso de simulação - Distância lateral entre duas motos sem asa

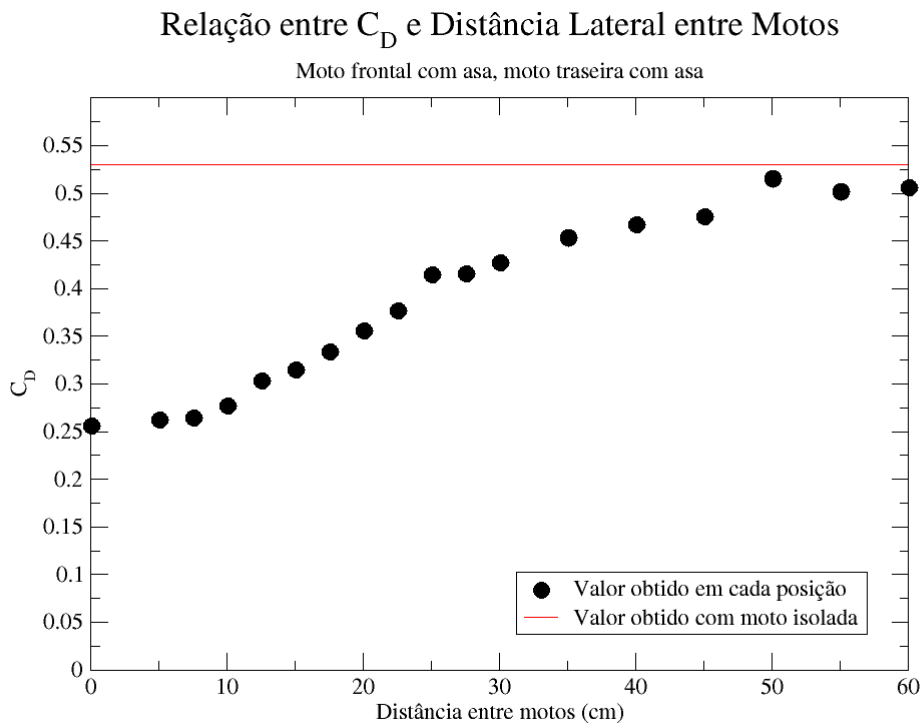


Figura 4.59: Variação do  $C_D$  com distância lateral - Situação de duas motos com asa

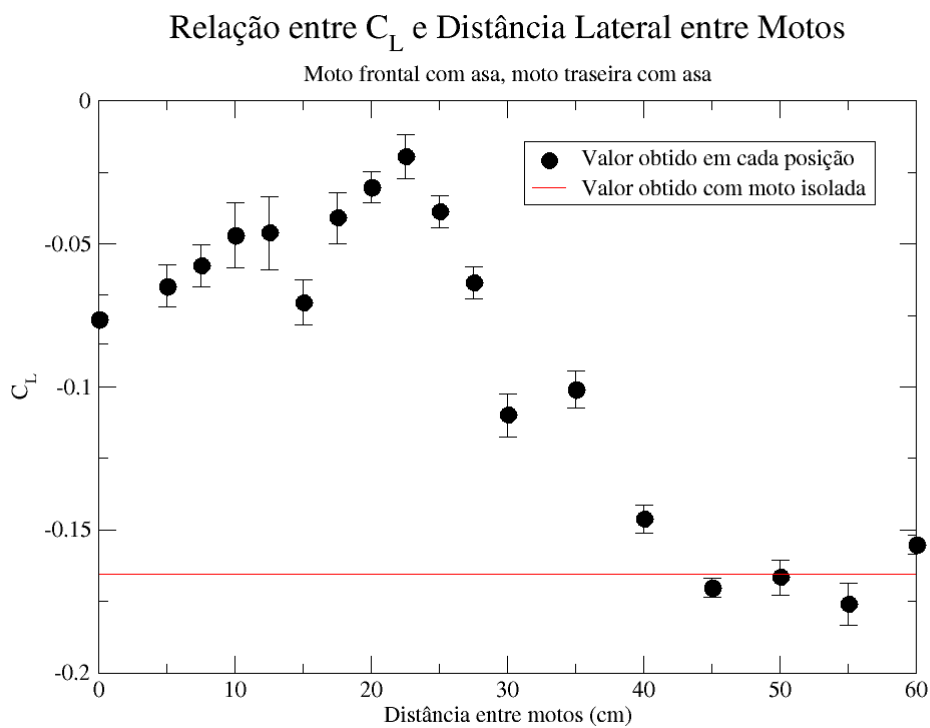


Figura 4.60: Variação do  $C_L$  com distância lateral - Situação de duas motos com asa

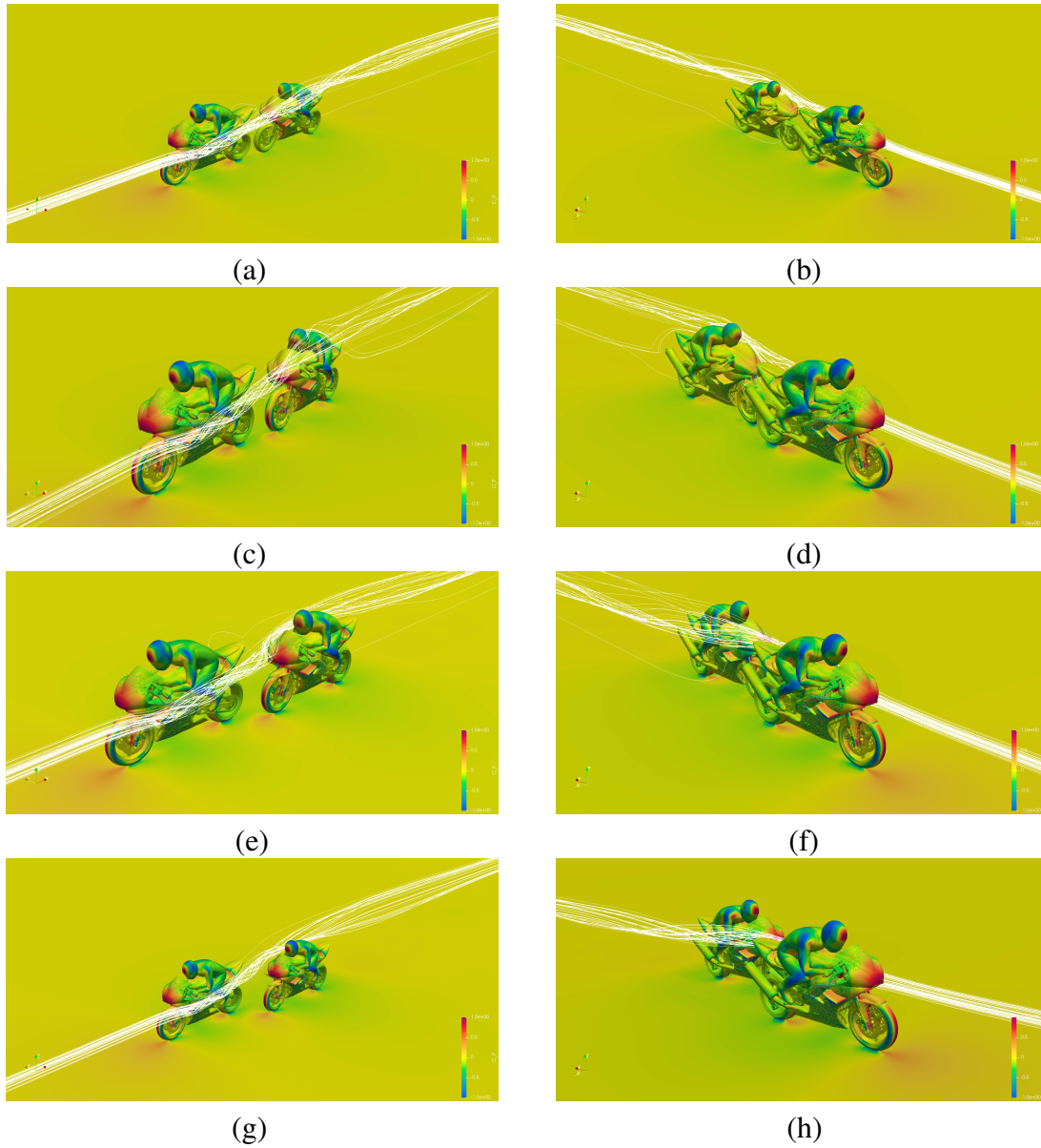


Figura 4.61: Campo de pressão na superfície e vórtice de ponta de asa para uma distância lateral entre motos de (a, b) 10cm (c, d) 22,5cm (e, f) 35cm (g, h) 60cm - Situação de duas motos com asa

uma redução no coeficiente de momento, que recupera seu valor original a altas distâncias laterais.

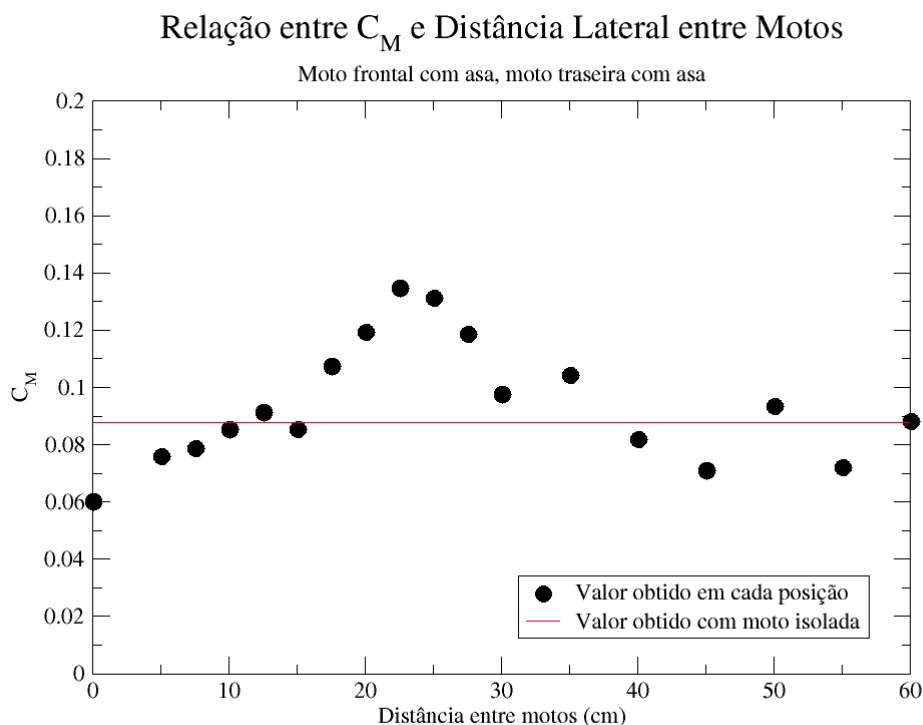


Figura 4.62: Variação do  $C_M$  com distância lateral - Situação de duas motos com asa

O perfil do coeficiente lateral indica que um novo fenômeno atua sobre a moto traseira neste caso, visto que valores negativos para o coeficiente são atingidos, algo que não ocorreu nos demais casos. Isso indica uma força na direção que separa as motos. Esses valores negativos atingem um vale a 15cm de distância, e então vão subindo até um pico em 30cm, próximo ao pico de 35cm no caso de moto frontal com asa e moto traseira sem. Embora o pico seja menos intenso comparado ao caso anterior, o perfil nesse caso ainda mostra uma instabilidade alta que pode se tornar fator de risco.

Como pode ser verificado nas visualizações da figura 4.61, o efeito do vórtice de asa da moto dianteira, que gera força lateral máxima na região de 35cm de distância, ainda atua sobre a moto. Porém, a diferença de pressão na região de 15cm de distância se dá em sentido contrário ao ocorrido nos casos anteriores. O motivo disso é o vórtice de ponta de asa gerado pela moto traseira, como é mostrado na visualização da figura 4.64. A uma distância de 10cm, a asa esquerda é submetida a um escoamento pouco perturbado, e portanto acelera o ar que passa por ela, gerando uma região de baixa pressão na superfície esquerda do motociclista. A asa direita, por outro lado, está imersa na esteira de vórtices, e portanto não é capaz de acelerar o ar. O resultado é um fenômeno inverso do ocorrido na situação de duas motos sem asa, e portanto a força lateral resultante aponta para o lado esquerdo, tendendo a separar as motos. Com aumento da distância lateral, esse fenômeno se atenua,

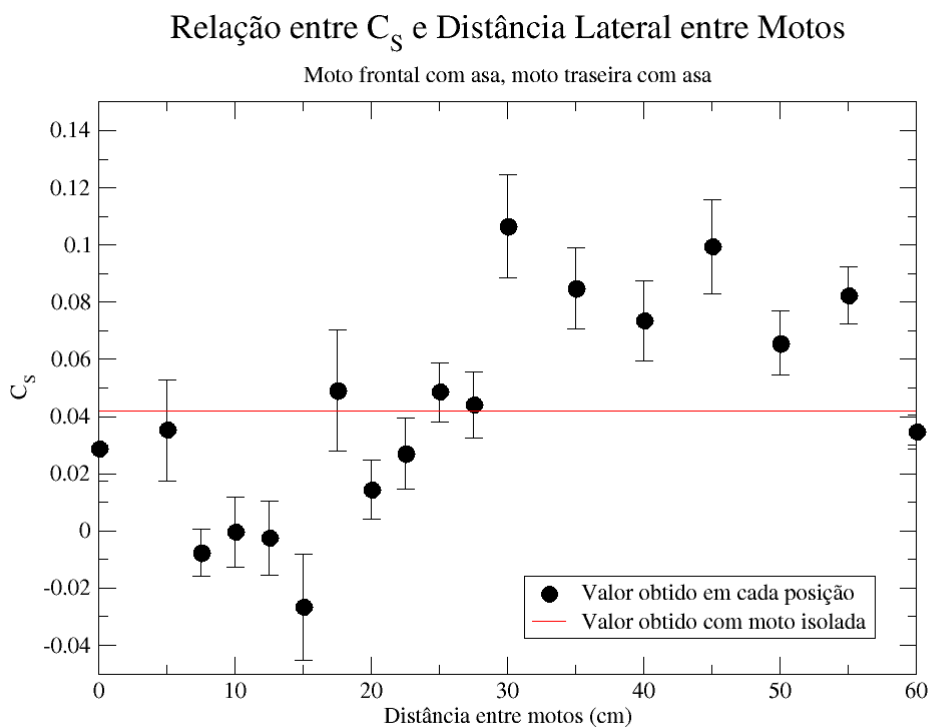


Figura 4.63: Variação do  $C_S$  com distância lateral - Situação de duas motos com asa

e o comportamento da força lateral passa a ser regido pelo vórtice da asa da moto frontal, como no caso de moto frontal com asa e moto traseira sem.

Os valores de coeficiente lateral apresentaram novamente valores de desvio padrão excessivo, principalmente nas regiões em torno de 15cm e 30cm. Assim como nos demais casos em que isso ocorreu, é uma indicação da limitação do modelo RANS aplicado. Uma análise de dados mais conclusiva dependerá de simulações realizadas por um método mais preciso, e por consequência, de maior custo computacional.

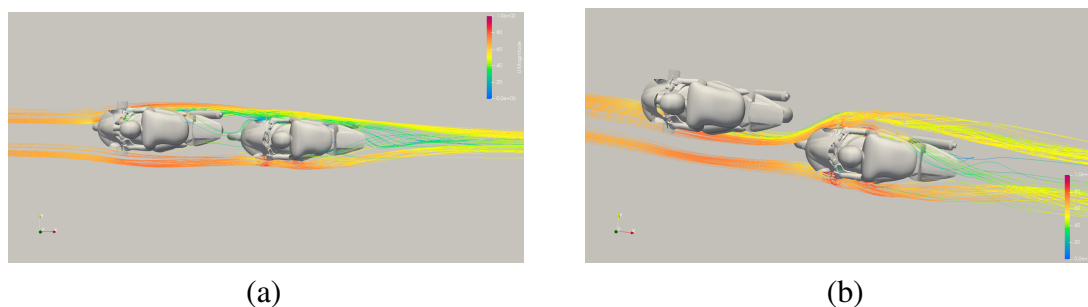


Figura 4.64: Vórtices de ponta de asa gerados pela moto traseira para uma distância lateral entre motos de (a) 10cm (b) 35cm - Situação de duas motos com asa

Por fim, o perfil do coeficiente de momento de rolamento, ilustrado na figura 4.65, novamente espelha o comportamento do coeficiente lateral, como em todos os casos já apresentados. Valores positivos do coeficiente indicam uma tendência a tombamento na direção contrária à moto frontal, o que é coerente com os valores negativos de coeficiente lateral na

mesma região.

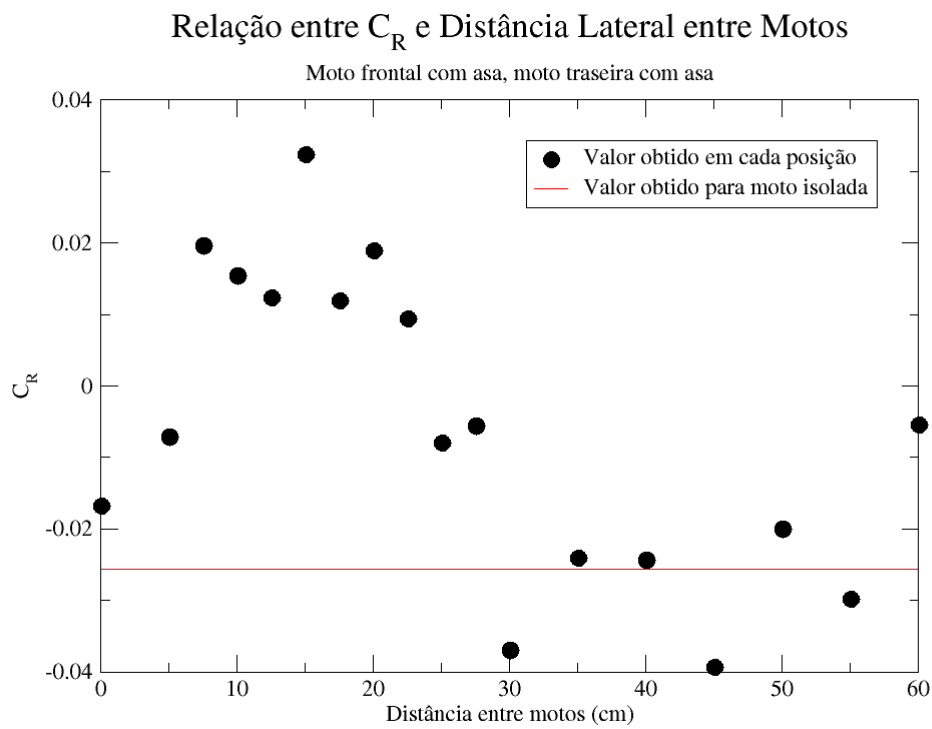


Figura 4.65: Variação do  $C_R$  com distância lateral - Situação de duas motos com asa

Assim, o caso de duas motos com asa mostra diversas situações aerodinâmicas de possível risco para a moto traseira em situação de ultrapassagem, seja por perda de poder de frenagem pela diminuição do arrasto em conjunto com aumento da sustentação, seja pela instabilidade na força lateral. O benefício da redução no arrasto para ultrapassagens, porém, é mantido.

# Capítulo 5

## Conclusão

A simulação dos casos base, que envolvem uma única moto, permitiram analisar a fundo a metodologia adotada e os resultados obtidos. Foram constatadas tanto limitações quanto vantagens claras do uso do OpenFOAM para realização das simulações. Embora a geração de malhas de camada tenha se mostrado como um forte desafio, e as malhas geradas sejam relativamente pesadas, os resultados obtidos foram de qualidade superior às realizadas por [Gonçalves 2023] no SU2 e Ansys ICEM. Além disso, foram realizados alguns breves estudos no intuito de otimizar futuras simulações.

Comparando o resultado obtido para moto única com outros trabalhos na literatura, os valores de coeficiente de arrasto foram coerentes, e o de coeficiente de sustentação para a moto com asa também. O coeficiente de sustentação para a moto sem asa mostra discrepância quando comparado com trabalhos similares, mas como a motocicleta utilizada como modelo é diferente e a relação entre as sustentações dos casos com e sem asa são coerentes, os resultados foram julgados como aceitáveis.

A análise de situações de ultrapassagem permitiu identificar diversos fenômenos que regem o escoamento a qual a moto traseira é submetida. Em casos com moto traseira sem asa, os efeitos da presença da moto frontal foram majoritariamente positivos, com perda de sustentação e redução do arrasto propiciando ultrapassagens. Porém, para casos de moto traseira sem asa, a perda de downforce somada à perda de arrasto podem levar a dificuldades na frenagem, enquanto que o perfil de alta oscilação das forças laterais pode ser um fator de risco, levando a moto a uma situação de instabilidade. Esses fenômenos negativos foram até então pouco abordados pela literatura e, dado que motos de competição no MotoGP possuem múltiplas asas, são provavelmente ainda mais intensos em situações reais.

Nota-se que, no distanciamento longitudinal, a diferença entre os casos com diferentes motos foi menos significativa, e embora houvessem diferenças no valor e taxa de variação dos coeficientes, a tendência geral era a mesma em todos os casos. Os coeficientes de arrasto, sustentação e momento de arfagem eram diminuídos em módulo a baixas distâncias, e o valor original era gradualmente recuperado com o aumento da distância. Esse comportamento



coincide com o que é esperado baseado em conhecimentos de aerodinâmica.

O distanciamento lateral, por outro lado, apresentou comportamentos mais variados e complexos. O arrasto e a sustentação se mantiveram relativamente consistentes, com tendência similar à vista no distanciamento longitudinal, mas com variação mais drástica. Porém, a sustentação e principalmente a força lateral apresentaram peculiaridades resultantes da geometria da motocicleta e, nos casos em que ele existe, do vórtice de ponta de asa. Uma observação interessante é que como esses comportamentos dependem fortemente da geometria da moto, e mesmo da postura do motociclista, a forma e intensidade com qual se manifestam em simulações realizadas com outros modelos pode variar drasticamente. Porém, os princípios que regem cada peculiaridade identificada foram analisados, de modo a tornar o estudo o mais universal possível.

Uma conclusão interessante se dá na análise da estabilidade, ou instabilidade, de cada coeficiente nos diferentes casos. O arrasto e o momento de arfagem, influenciados principalmente por escoamentos paralelos ao escoamento não perturbado, apresentaram baixa instabilidade em qualquer situação. A sustentação, influenciada por escoamentos no sentido vertical, apresentou instabilidade um pouco maior, principalmente nos casos de distanciamento lateral entre motos. Já a força lateral e o momento de rolamento, influenciados principalmente por escoamentos horizontais perpendiculares ao escoamento não perturbado, apresentaram os maiores níveis de oscilação. Isso indica uma limitação do modelo RANS; a simplificação dos efeitos de turbulência prejudica a precisão da simulação de movimentos perpendiculares ao escoamento não perturbado. Assim, uma análise mais aprofundada dos coeficientes requer o uso de métodos de simulação mais precisos, como por exemplo LES, para obter conclusões definitivas.

Essa base de conhecimento pode servir como ponto de partida para diversos trabalhos futuros. Além da validação das simulações com dados experimentais, e da realização de simulações com modelos mais precisos como previamente sugerido, é possível uma análise mais aprofundada da força lateral, de modo a analisar se sua intensidade é suficiente para representar um fator de risco. Também é possível uma análise das forças às quais as asas estão submetidas, trazendo base para uma análise estrutural das mesmas.

# Referências Bibliográficas

[Bertin and Cummings 2008] Bertin, J. J. and Cummings, R. M. (2008). *Aerodynamics for Engineers (5th Edition)*. Prentice Hall.

[Blocken et al. 2020] Blocken, B., Malizia, F., van Druenen, T., and Gillmeier, S. (2020). Aerodynamic benefits for a cyclist by drafting behind a motorcycle. *Sports engineering*, 23:1–11.

[Explorador 2021] Explorador, O. (2021). Foi a primeira fabricante de motos a usar túnel de vento na história da indústria da motocicleta. Disponível em <https://www.oexplorador.com.br/foi-a-primeira-fabricante-de-motos-a-usar-tunel-de-vento-ainda-na-decad> (último acesso: 17/07/2023).

[Ferziger and Peric 2002] Ferziger, J. H. and Peric, M. (2002). *Computational methods for fluid dynamics*. Springer, 3rd, rev. ed edition.

[Freire 1990] Freire, A. P. S. (1990). Teoria de camada limite. Disponível em [https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/7857/1/CursoCamadaLimite\\_APSF2.pdf](https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/7857/1/CursoCamadaLimite_APSF2.pdf) (último acesso: 17/07/2023).

[Frömmig 2023] Frömmig, L. (2023). *Basic Course in Race Car Technology: Introduction to the Interaction of Tires, Chassis, Aerodynamics, Differential Locks and Frame*. Handbuch Rennwagentechnik, 1. Springer Vieweg.

[Ghaib 2022] Ghaib, K. (2022). *Introduction to Computational Fluid Dynamics*. essentials. Springer.

[Gonçalves 2023] Gonçalves, T. (2023). Simulação Numérica e Automação de Workflow para Aerodinâmica de Motocicletas Esportivas em Situação de Pista. *Universidade de Brasília*.

[Houghton et al. 2016] Houghton, E., Carpenter, P., Collicott, S. H., and Valentine, D. T. (2016). *Aerodynamics for Engineering Students*. Butterworth-Heinemann, imprint of Elsevier, 7 edition.

[John D. Anderson 2010] John D. Anderson, J. (2010). *Fundamentals of Aerodynamics*. McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 5 edition.

- [Katz 2003] Katz, J. (2003). *Race Car Aerodynamics: Designing for Speed (Engineering and Performance)*.
- [Maric et al. 2014] Maric, T., Hopken, J., and Mooney, K. (2014). *The OpenFOAM technology primer*. Sourceflux, 1 edition.
- [MotoGP™2023] MotoGP™(2023). Team galleries - rnf motogp™ team. Disponível em <https://www.motogp.com/en/gallery/2023/02/24/rnf-motogp-team/448338> (último acesso: 17/07/2023).
- [Moukalled et al. 2015] Moukalled, F., Mangani, L., and Darwish, M. (2015). *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM® and Matlab*. Fluid Mechanics and Its Applications 113. Springer.
- [OpenCFD 2022] OpenCFD (2022). Openfoam user guide. Disponível em <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide> (último acesso: 18/06/2023).
- [Otley 2023] Otley, M. (2023). Motogp is supposed to be dangerous, but... Disponível em <https://www.motorsportmagazine.com/articles/motorcycles/motogp/motogp-is-supposed-to-be-dangerous-but/> (último acesso: 11/12/2023).
- [Peri and Capuana 2021] Peri, G. and Capuana, J. (2021). Motorcycle aerodynamics: a cfd study from airfoil selection to winglet design for downforce increase and lap time reduction.
- [Versteeg and Malalasekera 2007] Versteeg, H. and Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method (2nd Edition)*. Prentice Hall, 2nd edition.
- [Wendt 2008] Wendt, J. F. (2008). *Computational Fluid Dynamics: An Introduction*. Von Karman Institute Book. Springer, 3rd ed. edition.
- [White 2011] White, F. M. (2011). *Mecânica Dos Fluidos*. McGraw-Hill, 6 edition.
- [Wiński and Piechna 2022] Wiński, K. and Piechna, A. (2022). Comprehensive cfd aerodynamic simulation of a sport motorcycle. *Energies*, 15(16):5920.
- [Çengel and Cimbala 2012] Çengel, Y. A. and Cimbala, J. M. (2012). *Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações*. AMGH, 1ª edition.

# Apêndices

Aqui serão incluídos os arquivos de dicionário mais importantes para a simulação. A formatação dos arquivos é tal que os caracteres "///" indicam o início de comentários. Os arquivos apresentados correspondem à simulação do caso de moto com asa; as únicas diferenças entre os casos se encontram na extração e nomenclatura de superfícies no `snappyHexMeshDict`, `surfaceFeatureExtractDict` e nas condições iniciais de velocidade. Casos com múltiplas motos também simplesmente adicionam os dados da segunda moto nesse mesmo dicionário, além de alterar a função `forceCoeffs` no `controlDict` para que ele meça a moto traseira, e não a dianteira.

## system\blockMeshDict

```
/*-----* C++ *-----*\
| ===== |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O p e r a t i o n | Version: v2112 |
| \\ / A n d | Website: www.openfoam.com |
| \\ / M a n i p u l a t i o n |
\*-----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       blockMeshDict;
}
// ***** //
scale 1;
vertices
(
    (-150 -60 0)
    (150 -60 0)
    (150 60 0)
    (-150 60 0)
    (-150 -60 80)
    (150 -60 80)
    (150 60 80)
    (-150 60 80)
);
blocks
(
    hex (0 1 2 3 4 5 6 7) (75 30 20) simpleGrading (1 1 1)
);
edges
(
);
boundary
(
    frontAndBack
```

```

    {
        type patch;
        faces
        (
            (3 7 6 2)
            (1 5 4 0)
        );
    }
    inlet
    {
        type patch;
        faces
        (
            (0 4 7 3)
        );
    }
    outlet
    {
        type patch;
        faces
        (
            (2 6 5 1)
        );
    }
    lowerWall
    {
        type wall;
        faces
        (
            (0 3 2 1)
        );
    }
    upperWall
    {
        type patch;
        faces
        (
            (4 5 6 7)
        );
    }
};
// ***** //

```

## system\controlDict

```

/*-----* C++ *-----*/
| ===== |
| \\ / Field | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / Operation | Version: v2112 |
| \\ / And | Website: www.openfoam.com |
| \\ / Manipulation |
/*-----*/
FoamFile
{
    version 2.0;
    format ascii;
    class dictionary;
    object controlDict;
}
// ***** //
application simpleFoam;
startFrom startTime;
startTime 0;
stopAt endTime;
endTime 1000;
deltaT 1;
writeControl timeStep;
writeInterval 200;
purgeWrite 0;
writeFormat binary;

```

```

writePrecision 6;
writeCompression off;
timeFormat general;
timePrecision 6;
runTimeModifiable true;
functions
{
forceCoeffs1
{
    type            forceCoeffs;
    libs            (forces);
    writeControl    timeStep;
    timeInterval    1;
    log             yes;
    patches         (motorBikeGroup);
    rho             rhoInf;          // Indicates incompressible
    rhoInf          1.2886;         // Required when rho = rhoInf
    liftDir         (0 0 1);
    dragDir         (1 0 0);
    CofR            (1.43 0 0);    // Axle midpoint on ground
    pitchAxis       (0 1 0);
    magUInf         70;
    lRef            1.42;          // Wheelbase length
    Aref            0.644384;      // Estimated
}
/*
binField1
{
    type            binField;
    libs            (fieldFunctionObjects);
    binModel        singleDirectionUniformBin;
    fields          (forceCoeff);
    patches         (motorBikeGroup);
    decomposePatchValues true;
    CofR            ${..forceCoeffs1.CofR};
    binData
    {
        nBin        20;            // output data into 20 bins
        direction   (1 0 0);      // bin direction
        cumulative  yes;
    }
    writeControl    timeStep;
}
yPlus1
{
    // Mandatory entries (unmodifiable)
    type            yPlus;
    libs            (fieldFunctionObjects);
    // Optional (inherited) entries
    writeToFile    true;
    useUserTime    true;
    region         region0;
    enabled        true;
    log            false;
    executeControl timeStep;
    executeInterval 200;
    writeControl   timeStep;
    writeInterval  200;
}
}
// *****

```

## system\decomposeParDict

```

/*-----* C++ *-----*\
| ===== |
| \\      / F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\      / O peration  | Version: v2112 |
| \\      / A nd        | Website: www.openfoam.com |
|  \\/    M anipulation |

```

```

/*-----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       decomposeParDict;
}
// * * * * * //
//Para geração da malha
numberOfSubdomains 24;
method             hierarchical;
coeffs
{
    n              (8 3 1);
}
//Para realização das simulações
//numberOfSubdomains 128;
//method          scotch;
// * * * * * //

```

## system\fvSchemes

```

/*----- C++ -----*/
| ===== |
| \ \ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \ \ / O p e r a t i o n | Version: v2112 |
| \ \ / A n d | Website: www.openfoam.com |
| \ \ / M a n i p u l a t i o n | |
/*-----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       fvSchemes;
}
// * * * * * //
ddtSchemes
{
    default      steadyState;
}
gradSchemes
{
    default      cellLimited Gauss linear 1;
    grad(U)      cellLimited Gauss linear 1;
}
divSchemes
{
    default      none;
    div(phi,U)   bounded Gauss limitedLinearV 1;
    turbulence   bounded Gauss upwind;
    div(phi,k)   $turbulence;
    div(phi,omega) $turbulence;
    div((nuEff*dev2(T(grad(U)))) Gauss linear;
}
laplacianSchemes
{
    default      Gauss linear corrected;
}
interpolationSchemes
{
    default      linear;
}
snGradSchemes
{
    default      corrected;
}
wallDist
{

```

```

        method          meshWave;
    }
    // ***** //

```

## system/fvSolution

```

/*-----* C++ *-----*\
|=====|
| \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O p e r a t i o n | Version: v2112 |
| \\ / A n d | Website: www.openfoam.com |
| \\ / M a n i p u l a t i o n | |
\*-----*\
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       fvSolution;
}
// ***** //
solvers
{
    p
    {
        solver          GAMG;
        smoother        GaussSeidel;
        tolerance       1e-7;
        relTol          0.01;
    }
    Phi
    {
        $p;
    }
    U
    {
        solver          smoothSolver;
        smoother        GaussSeidel;
        tolerance       1e-8;
        relTol          0.1;
        nSweeps         1;
    }
    k
    {
        solver          smoothSolver;
        smoother        GaussSeidel;
        tolerance       1e-8;
        relTol          0.1;
        nSweeps         1;
    }
    omega
    {
        solver          smoothSolver;
        smoother        GaussSeidel;
        tolerance       1e-8;
        relTol          0.1;
        nSweeps         1;
    }
    cellDisplacement
    {
        solver          GAMG;
        smoother        GaussSeidel;
        tolerance       1e-7;
        relTol          0.01;
    }
}
SIMPLE
{
    nNonOrthogonalCorrectors 5;
    consistent yes;
}

```



```

}
relaxationFactors
{
    equations
    {
p 0.7;
        U            0.7;
        k            0.7;
        omega        0.7;
    }
}
cache
{
    grad(U);
}
// ***** //

```

## system\meshQualityDict

```

/*-----* C++ *-----*\
| ===== |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O p e r a t i o n | Version: v2112 |
| \\ / A n d | Website: www.openfoam.com |
| \\ / M a n i p u l a t i o n |
\*-----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       meshQualityDict;
}
// ***** //
// Include defaults parameters from master dictionary
#includeEtc "caseDicts/meshQualityDict"
//- minFaceWeight (0 -> 0.5)
minFaceWeight 0.02;
//Os critérios abaixo são utilizados apenas na etapa addLayers e devem ser habilitados manualmente
//minTetQuality -1e30;
//maxNonOrtho 80; //Não utilizado em malhas de 4 camadas
// ***** //

```

## system\snappyHexMeshDict

```

/*-----* C++ *-----*\
| ===== |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O p e r a t i o n | Version: v2112 |
| \\ / A n d | Website: www.openfoam.com |
| \\ / M a n i p u l a t i o n |
\*-----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       snappyHexMeshDict;
}
// ***** //
// Which of the steps to run
castellatedMesh true;
snap true;
addLayers false; //Rodado separadamente
// Geometry. Definition of all surfaces. All surfaces are of class
// searchableSurface.

```

```

// Surfaces are used
// - to specify refinement for any mesh cell intersecting it
// - to specify refinement for any mesh cell inside/outside/near
// - to 'snap' the mesh boundary to the surface
geometry
{
    moto.stl
    {
        type triSurfaceMesh;
        name moto;
    }
    rodad.stl
    {
        type triSurfaceMesh;
        name rodad;
    }
    rodad.stl
    {
        type triSurfaceMesh;
        name rodad;
    }
    refinementBox1
    {
        type box;
        min (-1.0 -0.55 0.0);
        max ( 4.5  0.55 1.5);
    }
    refinementBox2
    {
        type box;
        min (-3.75 -1.1 0.0);
        max ( 7.25  1.1 3);
    }
    refinementBox3
    {
        type box;
        min (-9.25 -3.15 0.0);
        max (12.25  3.15 6);
    }
}
// Settings for the castellatedMesh generation.
castellatedMeshControls
{
    // Refinement parameters
    // ~~~~~
    // If local number of cells is >= maxLocalCells on any processor
    // switches from from refinement followed by balancing
    // (current method) to (weighted) balancing before refinement.
    maxLocalCells 10000000;
    // Overall cell limit (approximately). Refinement will stop immediately
    // upon reaching this number so a refinement level might not complete.
    // Note that this is the number of cells before removing the part which
    // is not 'visible' from the keepPoint. The final number of cells might
    // actually be a lot less.
    maxGlobalCells 15000000;
    // The surface refinement loop might spend lots of iterations refining just a
    // few cells. This setting will cause refinement to stop if <= minimumRefine
    // are selected for refinement. Note: it will at least do one iteration
    // (unless the number of cells to refine is 0)
    minRefinementCells 10;
    // Allow a certain level of imbalance during refining
    // (since balancing is quite expensive)
    // Expressed as fraction of perfect balance (= overall number of cells /
    // nProcs). 0=balance always.
    maxLoadUnbalance 0.10;
    // Number of buffer layers between different levels.
    // 1 means normal 2:1 refinement restriction, larger means slower
    // refinement.
    nCellsBetweenLevels 1;
    // Explicit feature edge refinement
    // ~~~~~
    // Specifies a level for any cell intersected by its edges.
    // This is a featureEdgeMesh, read from constant/triSurface for now.
    features

```

```

(
  {
    file "moto.eMesh";
    level 10;
  }
  {
    file "rodad.eMesh";
    level 10;
  }
  {
    file "rodat.eMesh";
    level 10;
  }
);
// Surface based refinement
// ~~~~~
// Specifies two levels for every surface. The first is the minimum level,
// every cell intersecting a surface gets refined up to the minimum level.
// The second level is the maximum level. Cells that 'see' multiple
// intersections where the intersections make an
// angle > resolveFeatureAngle get refined up to the maximum level.
refinementSurfaces
{
  moto
  {
    // Surface-wise min and max refinement level
    level (9 10);
    // Optional specification of patch type (default is wall). No
    // constraint types (cyclic, symmetry) etc. are allowed.
    patchInfo
    {
      type wall;
      inGroups (motorBikeGroup);
    }
  }
  rodad
  {
    // Surface-wise min and max refinement level
    level (9 10);
    // Optional specification of patch type (default is wall). No
    // constraint types (cyclic, symmetry) etc. are allowed.
    patchInfo
    {
      type wall;
      inGroups (motorBikeGroup);
    }
  }
  rodat
  {
    // Surface-wise min and max refinement level
    level (9 10);
    // Optional specification of patch type (default is wall). No
    // constraint types (cyclic, symmetry) etc. are allowed.
    patchInfo
    {
      type wall;
      inGroups (motorBikeGroup);
    }
  }
}
// Resolve sharp angles
resolveFeatureAngle 30;
// Region-wise refinement
// ~~~~~
// Specifies refinement level for cells in relation to a surface. One of
// three modes
// - distance. 'levels' specifies per distance to the surface the
//   wanted refinement level. The distances need to be specified in
//   descending order.
// - inside. 'levels' is only one entry and only the level is used. All
//   cells inside the surface get refined up to the level. The surface
//   needs to be closed for this to be possible.
// - outside. Same but cells outside.
refinementRegions

```

```

{
    refinementBox1
    {
        mode inside;
        levels ((1E15 7));
    }
    refinementBox2
    {
        mode inside;
        levels ((1E15 6));
    }
    refinementBox3
    {
        mode inside;
        levels ((1E15 4));
    }
}
// Mesh selection
// ~~~~~
// After refinement patches get added for all refinementSurfaces and
// all cells intersecting the surfaces get put into these patches. The
// section reachable from the locationInMesh is kept.
// NOTE: This point should never be on a face, always inside a cell, even
// after refinement.
locationInMesh (3.0001 3.0001 0.43);
// Whether any faceZones (as specified in the refinementSurfaces)
// are only on the boundary of corresponding cellZones or also allow
// free-standing zone faces. Not used if there are no faceZones.
allowFreeStandingZoneFaces true;
}
// Settings for the snapping.
snapControls
{
    //- Number of patch smoothing iterations before finding correspondence
    // to surface
    nSmoothPatch 3;
    //- Relative distance for points to be attracted by surface feature point
    // or edge. True distance is this factor times local
    // maximum edge length.
    tolerance 2.0;
    //- Number of mesh displacement relaxation iterations.
    nSolveIter 30;
    //- Maximum number of snapping relaxation iterations. Should stop
    // before upon reaching a correct mesh.
    nRelaxIter 5;
    // Feature snapping
    //- Number of feature edge snapping iterations.
    // Leave out altogether to disable.
    nFeatureSnapIter 10;
    //- Detect (geometric only) features by sampling the surface
    // (default=false).
    implicitFeatureSnap false;
    //- Use castellatedMeshControls::features (default = true)
    explicitFeatureSnap true;
    //- Detect points on multiple surfaces (only for explicitFeatureSnap)
    multiRegionFeatureSnap false;
}
// Settings for the layer addition.
addLayersControls
{
    // Are the thickness parameters below relative to the undistorted
    // size of the refined cell outside layer (true) or absolute sizes (false).
    relativeSizes true;
    // Per final patch (so not geometry!) the layer information
    layers
    {
        {
            "(moto|rodad|rodat).*"
            {
                nSurfaceLayers 5;
            }
        }
    }
    meshShrinker    displacementMotionSolver;
    solver          displacementSBRStress;
    displacementSBRStressCoeffs

```

```

    {
        diffusivity    quadratic inverseDistance 1(motorBikeGroup);
    }
    // Expansion factor for layer mesh
    expansionRatio 2;
    // Wanted thickness of final added cell layer. If multiple layers
    // is the thickness of the layer furthest away from the wall.
    // Relative to undistorted size of cell outside layer.
    // See relativeSizes parameter.
    finalLayerThickness 0.5;
    // Minimum thickness of cell layer. If for any reason layer
    // cannot be above minThickness do not add layer.
    // Relative to undistorted size of cell outside layer.
    minThickness 0.1;
    // If points get not extruded do nGrow layers of connected faces that are
    // also not grown. This helps convergence of the layer addition process
    // close to features.
    // Note: changed(corrected) w.r.t 1.7.x! (didn't do anything in 1.7.x)
    nGrow 0;
    // Advanced settings
    // When not to extrude surface. 0 is flat surface, 90 is when two faces
    // are perpendicular
    featureAngle 90;
    // At non-patched sides allow mesh to slip if extrusion direction makes
    // angle larger than slipFeatureAngle.
    slipFeatureAngle 30;
    // Maximum number of snapping relaxation iterations. Should stop
    // before upon reaching a correct mesh.
    nRelaxIter 3;
    // Number of smoothing iterations of surface normals
    nSmoothSurfaceNormals 3;
    // Number of smoothing iterations of interior mesh movement direction
    nSmoothNormals 3;
    // Smooth layer thickness over surface patches
    nSmoothThickness 10;
    // Stop layer growth on highly warped cells
    maxFaceThicknessRatio 20000000.0;
    // Reduce layer growth where ratio thickness to medial
    // distance is large
    maxThicknessToMedialRatio 20000000.0;
    // Angle used to pick up medial axis points
    // Note: changed(corrected) w.r.t 1.7.x! 90 degrees corresponds to 130
    // in 1.7.x.
    minMedialAxisAngle 5;
    // Create buffer region for new layer terminations
    nBufferCellsNoExtrude 0;
    // Overall max number of layer addition iterations. The mesher will exit
    // if it reaches this number of iterations; possibly with an illegal
    // mesh.
    nLayerIter 15;
}
// Generic mesh quality settings. At any undoable phase these determine
// where to undo.
meshQualityControls
{
    #include "meshQualityDict"
    // Advanced
    //- Number of error distribution iterations
    nSmoothScale 4;
    //- Amount to scale back displacement at error points
    errorReduction 0.75;
}
// Advanced
// Write flags
writeFlags
(
    scalarLevels
    layerSets
    layerFields    // write volScalarField for layer coverage
);
// Merge tolerance. Is fraction of overall bounding box of initial mesh.
// Note: the write tolerance needs to be higher than this.
mergeTolerance 1e-6;
// ***** //

```

# system\surfaceFeatureExtractDict

```
/*-----*- C++ -----*\
| ===== |
| \ \ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \ \ / O p e r a t i o n | Version: v2112 |
| \ \ / A n d | Website: www.openfoam.com |
| \ \ / M a n i p u l a t i o n |
\*-----*\
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       surfaceFeatureExtractDict;
}
// ***** //
moto.stl
{
    // How to obtain raw features (extractFromFile || extractFromSurface)
    extractionMethod    extractFromSurface;
    // Mark edges whose adjacent surface normals are at an angle less
    // than includedAngle as features
    // - 0 : selects no edges
    // - 180: selects all edges
    includedAngle      150;
    subsetFeatures
    {
        // Keep nonManifold edges (edges with >2 connected faces)
        nonManifoldEdges    no;
        // Keep open edges (edges with 1 connected face)
        openEdges           yes;
    }
    // Write options
    // Write features to obj format for postprocessing
    writeObj              yes;
}
rodad.stl
{
    // How to obtain raw features (extractFromFile || extractFromSurface)
    extractionMethod    extractFromSurface;
    // Mark edges whose adjacent surface normals are at an angle less
    // than includedAngle as features
    // - 0 : selects no edges
    // - 180: selects all edges
    includedAngle      150;
    subsetFeatures
    {
        // Keep nonManifold edges (edges with >2 connected faces)
        nonManifoldEdges    no;
        // Keep open edges (edges with 1 connected face)
        openEdges           yes;
    }
    // Write options
    // Write features to obj format for postprocessing
    writeObj              yes;
}
rodad.stl
{
    // How to obtain raw features (extractFromFile || extractFromSurface)
    extractionMethod    extractFromSurface;
    // Mark edges whose adjacent surface normals are at an angle less
    // than includedAngle as features
    // - 0 : selects no edges
    // - 180: selects all edges
    includedAngle      150;
    subsetFeatures
    {
        // Keep nonManifold edges (edges with >2 connected faces)
        nonManifoldEdges    no;
        // Keep open edges (edges with 1 connected face)
        openEdges           yes;
    }
}
```

```

// Write options
// Write features to obj format for postprocessing
writeObj          yes;
}
// ***** //

```

## constant\transportProperties

```

/*-----* C++ *-----*\
| ===== | | |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O p e r a t i o n | Version: v2112 |
| \\ / A n d | Website: www.openfoam.com |
| \\ / M a n i p u l a t i o n | |
\*-----*\
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       transportProperties;
}
// ***** //
transportModel  Newtonian;
nu              1.436e-05;
// ***** //

```

## constant\turbulenceProperties

```

/*-----* C++ *-----*\
| ===== | | |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O p e r a t i o n | Version: v2112 |
| \\ / A n d | Website: www.openfoam.com |
| \\ / M a n i p u l a t i o n | |
\*-----*\
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       turbulenceProperties;
}
// ***** //
simulationType  RAS;
RAS
{
    RASModel     kOmegaSST;
    turbulence   on;
    printCoeffs  on;
}
// ***** //

```

**Ok**

```

/*-----* C++ *-----*\
| ===== | | |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O p e r a t i o n | Version: v2112 |
| \\ / A n d | Website: www.openfoam.com |
| \\ / M a n i p u l a t i o n | |
\*-----*\

```

```

\*-----*
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    object       k;
}
// * * * * *
#include        "include/initialConditions"
dimensions     [0 2 -2 0 0 0 0];
internalField  uniform $turbulentKE;
boundaryField
{
    #includeEtc "caseDicts/setConstraintTypes"
    //- Define inlet conditions
    #include "include/fixedInlet"
    outlet
    {
        type          inletOutlet;
        inletValue    $internalField;
        value         $internalField;
    }
    lowerWall
    {
        type          kqRWallFunction;
        value         $internalField;
    }
    motorBikeGroup
    {
        type          kqRWallFunction;
        value         $internalField;
    }
    #include "include/frontBackUpperPatches"
}
// *****

```

## 0\nut

```

\*-----* C++ *-----*
| ===== |
| \\      / F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\      / O peration  | Version: v2112 |
| \\      / A nd        | Website: www.openfoam.com |
|  \\/    M anipulation | |
\*-----*
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    object       nut;
}
// * * * * *
dimensions     [0 2 -1 0 0 0 0];
internalField  uniform 0;
boundaryField
{
    #includeEtc "caseDicts/setConstraintTypes"
    frontAndBack
    {
        type          calculated;
        value         uniform 0;
    }
    inlet
    {
        type          calculated;
        value         uniform 0;
    }
    outlet

```



```

    {
        type            calculated;
        value            uniform 0;
    }
    lowerWall
    {
        type            nutkWallFunction;
        value            uniform 0;
    }
    upperWall
    {
        type            calculated;
        value            uniform 0;
    }
    motorBikeGroup
    {
        type            nutkWallFunction;
        value            uniform 0;
    }
}
// *****

```

## Omega

```

/*-----*- C++ -*/
| ===== |
| \ \ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \ \ / O p e r a t i o n | Version: v2112 |
| \ \ / A n d | Website: www.openfoam.com |
| \ \ / M a n i p u l a t i o n | |
/*-----*/
FoamFile
{
    version            2.0;
    format              ascii;
    class               volScalarField;
    object              omega;
}
// ***** //
#include              "include/initialConditions"
dimensions            [0 0 -1 0 0 0 0];
internalField         uniform $turbulentOmega;
boundaryField
{
    #includeEtc "caseDicts/setConstraintTypes"
    #include "include/fixedInlet"
    outlet
    {
        type            inletOutlet;
        inletValue      $internalField;
        value            $internalField;
    }
    lowerWall
    {
        type            omegaWallFunction;
        value            $internalField;
    }
    motorBikeGroup
    {
        type            omegaWallFunction;
        value            $internalField;
    }
    #include "include/frontBackUpperPatches"
}
// ***** //

```

# Op

```
/*-----* C++ *-----*\
| ===== |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O p e r a t i o n | Version: v2112 |
| \\ / A n d | Website: www.openfoam.com |
| \\ / M a n i p u l a t i o n | |
\*-----*\
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    object       p;
}
// ***** //
#include        "include/initialConditions"
dimensions     [0 2 -2 0 0 0 0];
internalField  uniform $pressure;
boundaryField
{
    #includeEtc "caseDicts/setConstraintTypes"
    inlet
    {
        type          zeroGradient;
    }
    outlet
    {
        type          fixedValue;
        value         $internalField;
    }
    lowerWall
    {
        type          zeroGradient;
    }
    motorBikeGroup
    {
        type          zeroGradient;
    }
    #include "include/frontBackUpperPatches"
}
// ***** //
```

# OU

```
/*-----* C++ *-----*\
| ===== |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O p e r a t i o n | Version: v2112 |
| \\ / A n d | Website: www.openfoam.com |
| \\ / M a n i p u l a t i o n | |
\*-----*\
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volVectorField;
    object       U;
}
// ***** //
#include        "include/initialConditions"
dimensions     [0 1 -1 0 0 0 0];
internalField  uniform $flowVelocity;
boundaryField
{
    #includeEtc "caseDicts/setConstraintTypes"
    #include "include/fixedInlet"
    outlet
}
```

```

    {
        type            inletOutlet;
        inletValue      uniform (0 0 0);
        value           $internalField;
    }
    lowerWall
    {
        type            fixedValue;
        value           $internalField;
    }
    motorBikeGroup
    {
        type            noSlip;
    }
    #include "include/frontBackTire"
    #include "include/frontBackUpperPatches"
}
// ***** //

```

## **`\include\fixedInlet`**

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O p e r a t i o n | Version: v2112 |
| \\ / A n d | Website: www.openfoam.com |
| \\ / M a n i p u l a t i o n |
|-----*\
inlet
{
    type fixedValue;
    value $internalField;
}
// ***** //

```

## **`\include\frontBackTire`**

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O p e r a t i o n | Version: v2112 |
| \\ / A n d | Website: www.openfoam.com |
| \\ / M a n i p u l a t i o n |
|-----*\
rodad
{
    type rotatingWallVelocity;
    origin (0.01 0 0.3);
    axis (0 1 0);
    omega -225.8064;
}
rodad
{
    type rotatingWallVelocity;
    origin (1.43 0 0.3);
    axis (0 1 0);
    omega -229.5081;
}
// ***** //

```

## **0\include\frontBackUpperPatches**

```
/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\ / F ield | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O peration | Version: v2112 |
| \\ / A nd | Website: www.openfoam.com |
| \\ / M anipulation |
|-----*\
upperWall
{
    type slip;
}
frontAndBack
{
    type slip;
}
// ***** //
```

## **0\include\initialConditions**

```
/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\ / F ield | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O peration | Version: v2112 |
| \\ / A nd | Website: www.openfoam.com |
| \\ / M anipulation |
|-----*\
flowVelocity (70 0 0);
pressure 0;
turbulentKE 0.24;
turbulentOmega 1.78;
// ***** //
```