



M 2014

U. PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

ANÁLISE CFD DE CARROCERIA DE AUTOMÓVEL DESPORTIVO

JOÃO VITOR MOREIRA RAMOS DA ROCHA
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Análise CFD de carroceria de automóvel desportivo

João Vitor Moreira Ramos da Rocha

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. António Tomé Ribeiro



FEUP

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Outubro 2014

À minha família, namorada e amigos

Resumo

Hoje-em-dia, a aerodinâmica possui extrema importância na indústria automóvel. Como tal, o estudo do comportamento aerodinâmico de um automóvel, durante a sua fase de desenvolvimento, é muito importante para que se consiga um produto final com boa performance aerodinâmica e, consequentemente, boa performance dinâmica. Estudar o escoamento de ar sobre um automóvel tem como objetivo a obtenção de um veículo com um bom comportamento dinâmico, principalmente a altas velocidades e em curvas rápidas (no caso de um veículo desportivo ou de competição). No caso de automóveis de passageiros, o objetivo principal é a redução do coeficiente de arrasto para minimização dos consumos de combustível. Nos veículos desportivos e de competição, além da redução do coeficiente de arrasto, procura-se a redução do coeficiente de sustentação. É muito importante um coeficiente de sustentação baixo para a estabilidade a altas velocidades e para a aderência em curvas rápidas.

Existem diferentes formas de estudar as características aerodinâmicas de um automóvel: testes em túnel de vento, teste em estrada e simulações computacionais (CFD). Na realização deste trabalho, foi utilizado o programa ANSYS *Fluent* como ferramenta CFD, simulando um túnel de vento, para a análise aerodinâmica de um automóvel desportivo. Também foram usados os programas complementares ANSYS *Meshing*, ANSYS *Design Modeler* e ANSYS *CFD-Post*, para a geração das malhas, tratamento do modelo 3D e visualização de resultados, respetivamente.

Foram efetuadas análises em situação normal (veículo posicionado paralelamente ao escoamento de ar frontal) às velocidades de 100, 150, 200 e 250 km/h, assim como simulações com diferentes números de elementos das malhas. Também se realizaram simulações com diferentes distâncias ao solo da carroceria, com uma distância ao solo superior à frente e com um modelo 3D da carroceria com radiador e condutas de refrigeração incorporados. Todas as situações referidas apresentaram resultados que permitiram tirar conclusões acerca das características aerodinâmicas do automóvel proposto.

Obteve-se um coeficiente de arrasto C_d de 0.4 e um coeficiente de sustentação C_l de 0.11 para a carroceria. Verificou-se que, com a distância ao solo superior à frente a 200 km/h (simulando uma lomba), não haverá continuação do levantamento, causando um acidente, devido às cargas aerodinâmicas. Os coeficientes diminuem com a diminuição da distância ao solo e aumentam com o aumento da distância ao solo e com a introdução de condutas de refrigeração.

CFD analysis of a sports car body

Abstract

Nowadays, aerodynamics is extremely relevant in the automotive industry. Therefore, the study of aerodynamic behavior of a car during its development phase is very important to achieve a final product with good aerodynamic performance and hence good dynamic performance. Studying the air flow over a car aims to obtain a vehicle with a good dynamic behavior, especially at high speeds and fast corners (in the case of a sports or race car). In the case of passenger cars, the main objective is to reduce the drag coefficient to minimize fuel consumption. In sports and race cars, besides the reduction of drag coefficient reducing the lift coefficient is also sought. A low lift coefficient is very important for high-speed stability and grip in fast corners.

There are different ways to study the aerodynamic characteristics of a car: wind tunnel testing, road testing and computational simulations (CFD). In this work, ANSYS Fluent CFD program was used as a tool to a wind tunnel aerodynamic analysis simulation of a sports car. The complementary programs ANSYS Meshing, ANSYS Design Modeler, and ANSYS CFD-Post, were also used to mesh generation, 3D model processing and visualization of the results, respectively.

Analysis in normal situation (vehicle positioned parallel to the flow) at speeds of 100, 150, 200 and 250 km/h were performed, as well as simulations with different mesh element number. Were also performed simulations with different body ground clearance, with higher ground clearance at front, and with a 3D model of the body containing a radiator and cooling ducts. All the mentioned situations showed results that allowed conclusions about the aerodynamic characteristics of the proposed vehicle.

A drag coefficient C_d of 0.4 and a lift coefficient C_l of 0.11 were obtained to the body. It was found that, with bigger ground clearance at front at 200 km/h (simulating a bump), there is no further lifting, causing an accident, due to the aerodynamic loads. The coefficients decrease with decreasing ground clearance and increase with increasing ground clearance and the introduction of cooling ducts.

Agradecimentos

Ao orientador, o professor António Tomé Ribeiro, pelo apoio prestado, pela disponibilidade, por ter possibilitado a realização deste trabalho e pelo voto de confiança.

Ao Eng.º Frederico Tomé Robeiro, pelo apoio prestado, pela disponibilidade e pelo fornecimento do material necessário.

Aos meus amigos, à minha namorada e família pelo apoio.

Índice de Conteúdos

1	Introdução	1
1.1	Aerodinâmica	1
1.2	Aerodinâmica na engenharia automóvel	1
1.3	Análise CFD de carroceria de um automóvel: objetivos	1
2	Revisão Bibliográfica	3
2.1	Fundamentos de Mecânica dos Fluidos	3
2.1.1	Propriedades do fluido	3
2.1.2	Equação de Bernoulli para a pressão	5
2.1.3	Camada limite	6
2.1.4	Efeitos da viscosidade	9
2.1.5	Linhas de corrente, escoamento ligado e escoamento separado	12
2.1.6	Distribuição de velocidade	13
2.1.7	Tipos de escoamento: laminar e turbulento	14
2.1.8	Escoamento sobre corpos e coeficiente de pressão	15
2.2	Aerodinâmica de automóveis	20
2.2.1	O impacto da aerodinâmica na forma de um veículo	20
2.2.2	Criação de força descendente	21
2.2.3	Valores típicos dos coeficientes de arrasto e sustentação	24
2.2.4	Coeficientes de arrasto e de sustentação de vários veículos de estrada	26
2.2.5	Fontes de arrasto e de sustentação	27
2.2.6	Veículos descapotáveis	28
2.2.7	Túnel de vento	29
2.3	Performance de automóveis	31
2.3.1	Resistências ao movimento do veículo	32
2.4	Conceitos teóricos do processamento de CFD	37
2.4.1	Modelação do escoamento de um fluido	37
2.4.2	Modelação de turbulência	38
2.4.3	Tratamentos da região de parede	38
2.4.4	Discretização	40
3	Metodologia Usada no Processamento das Simulações CFD	43
3.1	Preparação do modelo CAD	43
3.1.1	Geometria do veículo	43
3.1.2	Domínio computacional (túnel de vento)	44
3.2	Geração da malha de elementos	45
3.2.1	Estratégias para geração de uma malha de elementos	45
3.2.2	Geração de uma malha de superfície	46
3.2.3	Geração de uma malha de volume	46
3.2.4	Qualidade de uma malha	48
3.3	Obtenção da solução	50

3.3.1	Condições de fronteira.....	50
3.3.2	Modelação de turbulência.....	50
3.3.3	Cálculo da solução	50
4	Resultados das Simulações CFD	53
4.1	Propriedades da carroceria estudada	53
4.2	Simulação ao modelo de <i>Ahmed</i>	54
4.3	Simulações em situação normal	56
4.3.1	Propriedades das malhas de elementos.....	56
4.3.2	Coeficientes e forças aerodinâmicas	58
4.3.3	Gráfico do coeficiente de pressão	59
4.3.4	Distribuição da pressão	60
4.3.5	Distribuição de vetores de velocidade e linhas de corrente	62
4.3.6	Distribuição das forças de sustentação e de arrasto	64
4.3.7	Distribuição de y^+	66
4.4	Simulações com diferentes distâncias da carroceria ao solo	67
4.4.1	Propriedades das malhas de elementos.....	67
4.4.2	Resultados obtidos	67
4.5	Simulação com condutas de refrigeração	69
4.5.1	Propriedades da malha de elementos	70
4.5.2	Resultados obtidos	70
4.6	Simulação com distância ao solo da carroceria superior à frente	72
4.6.1	Propriedades da malha de elementos	72
4.6.2	Resultados obtidos	73
5	Discussão de Resultados.....	75
5.1	Coeficientes aerodinâmicos	75
5.2	Gráficos do coeficiente de pressão	78
5.3	Distribuição da pressão.....	80
5.4	Distribuição de vetores de velocidade.....	82
5.5	Linhas de corrente	85
5.6	Considerações finais	86
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	90
6.1	Conclusões	90
6.2	Trabalhos futuros	91
	Referências Bibliográficas	92
	ANEXO A: Figuras complementares dos resultados	93
	ANEXO B: Parâmetros das simulações	104
	ANEXO C: Estimativa da força descendente de uma possível asa traseira	105

Siglas

CFD – *Computational Fluid Dynamics*

NWF – *Non Equilibrium Wall Functions*

PISO – *Pressure-Implicit with Splitting of Operations*

RSM – *Reynolds Stress Models*

SIMPLE – *Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*

SIMPLEC – *Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations – Consistent*

Índice de Figuras

Figura 1 - Distribuição da velocidade entre duas placas paralelas, causada pelo movimento da placa superior. [5]	4
Figura 2 - Terminologia usada para descrever a aplicação da equação de <i>Bernoulli</i> . [5]	6
Figura 3 - Camada limite na proximidade de uma superfície de um veículo e distribuição de velocidade típica nessa camada. [5]	7
Figura 4 - Variação da espessura da camada limite ao longo de uma placa plana. [5]	7
Figura 5 - Valores do coeficiente de atrito C_f de uma placa plana, colocada paralelamente ao escoamento, para camadas limite laminares e turbulentas, <i>versus</i> o número de <i>Reynolds</i> . [5]	8
Figura 6 - Descrição esquemática da “bolha” laminar e da transição de camada limite laminar para turbulenta. [5]	9
Figura 7 - Separação do fluxo da camada limite na parede. [2]	9
Figura 8 - Forças e momentos aerodinâmicos que atuam sobre um veículo. [2]	11
Figura 9 - Linhas de corrente de um escoamento sobre um perfil alar. [5]	12
Figura 10 - Visualização das linhas de corrente (por injeção de fumo) durante um teste em túnel de vento. [5]	13
Figura 11 - Escoamento ligado sobre um veículo de forma esbelta (A), e a separação local do escoamento na parte de trás de uma forma automóvel mais real (B). [5]	13
Figura 12 - Vista lateral da distribuição da velocidade sobre uma placa plana atravessada por um escoamento livre, V_∞ . [5]	14
Figura 13 - Traços de partículas de fluido em escoamentos laminar e turbulento. [5]	15
Figura 14 - Distribuição dos coeficientes de velocidade e de pressão negativa na linha de simetria de um hemisfério que se encontra sob um escoamento livre V_∞ . [5]	17
Figura 15 - Distribuição do coeficiente de pressão medido sobre uma forma bidimensional de um automóvel. [5]	18
Figura 16 - Esteira atrás de um <i>bluff body</i> (com separação de escoamento na zona da base). [5]	19
Figura 17 - Descrição esquemática da formação de um vórtice periódico na esteira de um camião. [5]	19
Figura 18 - A pressão mais baixa na parte superior do que na parte inferior deste perfil alar resulta na força de sustentação (<i>lift</i>). [5]	20
Figura 19 - Cilindro e perfil alar de grandes dimensões com arrasto aerodinâmico idêntico. [5]	20
Figura 20 - Escoamento de ar sobre um veículo. [2]	21
Figura 21 - Aplicação típica de uma asa invertida atrás do eixo traseiro (Ferrari F138). [8]	22
Figura 22 - Asa invertida montada na frente do Ferrari F14 T. [9]	22
Figura 23 - <i>Spoiler</i> montado na traseira de um veículo de competição. [10]	22
Figura 24 - Descrição esquemática do “efeito de solo” que aumenta a sustentação aerodinâmica de asas quando se situam perto do solo. [5]	23

Figura 25 - Conduitas (difusores) situados na base de veículos de competição. [5]	23
Figura 26 - Coeficientes de arrasto e de sustentação típicos para várias configurações. [5]	25
Figura 27 - Efeito da proximidade ao solo na sustentação aerodinâmica de dois elipsóides. [5]	26
Figura 28 – Regime de escoamento em torno do habitáculo de um veículo descapotável. [2]	29
Figura 29 – Prevenção da recirculação do fluxo de ar com a adição de um defletor de vento. [2]	29
Figura 30 - Túnel de vento com retorno fechado (tipo <i>Göttingen</i>) e retorno aberto (tipo <i>Eiffel</i>). [2]	30
Figura 31 - Diagrama que demonstra o aumento da aceleração curvilínea entre 1950 e 2000. [5].....	32
Figura 32 - Definições de peso do veículo G , força de tração F_T , resistência ao rolamento R , arrasto aerodinâmico D e grau de inclinação da estrada α . [2]	33
Figura 33 - Variação típica do coeficiente de resistência ao rolamento dos pneus f_R versus velocidade de estrada V . [2]	34
Figura 34 – Diagrama típico tração-força de um automóvel de passageiros, com um diagrama de velocidade do motor. [2].....	35
Figura 35 - Subdivisões da região próxima da parede. [14].....	39
Figura 36 - Tratamentos da região próxima da parede no ANSYS <i>Fluent</i> . [14].....	40
Figura 37 - Superfície criada no modelo 3D para eliminar ângulo entre a roda e o solo (imagem gerada com o ANSYS <i>Design Modeler</i>).	43
Figura 38 - Ilustração das caixas criadas para controlo do tamanho dos elementos em volta do veículo.	44
Figura 39 - Camada prismática criada na superfície da carroceria e elementos tetraédricos.....	47
Figura 40 - Malha de elementos, definida pelas caixas de controlo do tamanho de elemento, usada para o processamento de uma simulação no ANSYS <i>Fluent</i>	47
Figura 41 - Vetores usados para calcular a qualidade ortogonal. [15].....	48
Figura 42 - Cálculo da razão de aspeto de um cubo unitário. [15].....	49
Figura 43 - Vista lateral da carroceria.	54
Figura 44 - Vistas da frente e retaguarda da carroceria.....	54
Figura 45 - Modelo de <i>Ahmed</i> (dimensões em milímetros). [16]	55
Figura 46 - Malha de elementos gerada para a simulação ao modelo de <i>Ahmed</i>	55
Figura 47 - Distribuição de vetores de velocidade na linha de simetria do modelo de <i>Ahmed</i> a 144 km/h (40 m/s).	56
Figura 48 - Malha de elementos 8.6M.	58
Figura 49 - Distribuição da pressão na carroceria a 150 km/h (frente).	61
Figura 50 – Distribuição da pressão na da carroceria a 150 km/h (retaguarda).	61
Figura 51 - Distribuição da pressão na carroceria a 150 km/h (fundo plano).....	62
Figura 52 - Distribuição de vetores de velocidade no plano de simetria a 150 km/h.	63
Figura 53 - Linhas de corrente em torno da carroceria a 150 km/h.	63
Figura 54 - Distribuição da força na direção y (força de sustentação) na carroceria a 150km/h (frente).	64

Figura 55 - Distribuição da força na direção y (força de sustentação) na carroceria a 150 km/h (retaguarda). 64

Figura 56 - Distribuição da força na direção z (força de arrasto) na carroceria 150 km/h (frente). 65

Figura 57 - Distribuição da força na direção z (força de arrasto) na carroceria a 150 km/h (retaguarda). 65

Figura 58 - Distribuição de y^+ na carroceria a 150 km/h (frente). 66

Figura 59 – Distribuição de y^+ na carroceria a 150 km/h (retaguarda). 66

Figura 60 - Radiador e conduta de refrigeração introduzidos no interior da carroceria. 69

Figura 61 – Colocação da carroceria usada para a simulação com distância ao solo da carroceria superior à frente. 72

Figura 62 - Distribuição da pressão na carroceria a 150 km/h (em cima) e 250 km/h (em baixo). 81

Figura 63 - Distribuição da pressão na carroceria com distância ao solo superior à frente a 200 km/h (em cima) e carroceria com condutas de refrigeração a 150 km/h (em baixo). 82

Figura 64 - Distribuição de vetores de velocidade no plano de simetria da carroceria em situação normal a 150 km/h (em cima) e 250 km/h (em baixo). 83

Figura 65 - Distribuição de vetores de velocidade no plano de simetria na carroceria com distância ao solo superior à frente a 200 km/h (em cima) e carroceria com condutas de refrigeração a 150 km/h (em baixo). 84

Figura 66 – Distribuição de vetores de velocidade no plano de simetria (zona do para-brisas) da carroceria em situação normal (à esquerda) e com condutas de refrigeração (à direita). 84

Figura 67 - Linhas de corrente em torno da carroceria em situação normal a 150 km/h (em cima) e com distância ao solo superior à frente a 200 km/h (em baixo). 85

Figura 68 - Linhas de corrente em torno da carroceria com condutas de refrigeração a 150 km/h. 86

Figura 69 - Parte inferior traseira da carroceria. 88

Figura 70 – Distribuição da pressão na carroceria em situação normal a 250 km/h (as zonas a azul são de especial reforço para cargas aerodinâmicas). 89

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Valores típicos do coeficiente de pressão (C_p). [5].....	16
Tabela 2 - Coeficientes de arrasto e de sustentação de vários automóveis. [5, 11-13].....	27
Tabela 3 - Gama das várias contribuições para o arrasto aerodinâmico de um automóvel. [5].....	27
Tabela 4 - Gama das várias contribuições para a sustentação aerodinâmica de um automóvel. [5]	28
Tabela 5 - Largura das caixas e tamanho dos elementos usado para cada uma.	44
Tabela 6 - Valores usados nas simulações CFD para as variáveis físicas.	51
Tabela 7 - Dimensões do veículo em estudo.	53
Tabela 8 - Propriedades das malhas de elementos usadas nas simulações de situação normal.	57
Tabela 9 - Resultados obtidos nas simulações em situação normal (modelo de turbulência $k-\epsilon$ realizável).	58
Tabela 10 - Resultados obtidos na simulação em situação normal (modelo de turbulência RSM).	59
Tabela 11 - Propriedades das malhas de elementos usadas nas simulações com diferentes distâncias ao solo.	67
Tabela 12 - Resultados obtidos nas simulações com diferentes alturas ao solo.	68
Tabela 13 - Propriedades da malha de elementos usada na simulação com condutas de refrigeração.	70
Tabela 14 - Resultados obtidos na simulação com condutas de refrigeração.	71
Tabela 15 - Propriedades da malha de elementos usada na simulação com altura ao solo superior à frente.	73
Tabela 16 - Resultados obtidos na simulação com altura ao solo superior à frente.	73

Índice de Gráficos

Gráfico 1 - Gráfico do coeficiente de pressão C_p na linha de simetria da carroceria a 150 km/h.....	60
Gráfico 2 - Gráfico do coeficiente de pressão C_p na linha de simetria da carroceria com menor distância ao solo a 150 km/h (80-90).....	68
Gráfico 3 - Gráfico do coeficiente de pressão C_p na linha de simetria da carroceria com maior distância ao solo a 150 km/h (120-130).....	69
Gráfico 4 - Gráfico do coeficiente de pressão C_p na linha de simetria da carroceria com condutas de refrigeração a 150 km/h.	71
Gráfico 5 - Gráfico do coeficiente de pressão C_p na linha de simetria da carroceria com distância ao solo superior à frente a 200 km/h.	74
Gráfico 6 - Variação dos coeficientes de arrasto C_d e sustentação C_l com a velocidade (resultado das simulações efetuadas com a malha 8.6M).....	75
Gráfico 7 - Variação das forças de arrasto D e sustentação L com a velocidade do escoamento V_∞	76
Gráfico 8 - Variação dos coeficientes de arrasto C_d e sustentação C_l com o número de elementos da malha.....	77
Gráfico 9 - Variação dos coeficientes de arrasto C_d e sustentação C_l com as diferentes situações estudadas. ...	78
Gráfico 10 - Gráficos do coeficiente de pressão na linha de simetria da carroceria em situação normal (em cima) e carroceria com distância ao solo superior à frente (em baixo).....	79
Gráfico 11 - Gráfico de C_p na linha de simetria da carroceria com condutas de refrigeração.....	80

Lista de Símbolos

A	Área, área frontal
a_{∞}	Velocidade do som
C_d	Coefficiente de arrasto
C_f	Coefficiente de atrito
C_l	Coefficiente de sustentação
C_m	Coefficiente de momento
C_p	Coefficiente de pressão
C_y	Coefficiente de força lateral
D	Arrasto
D_f	Arrasto por atrito
D_p	Arrasto por pressão
f_R	Coefficiente de resistência ao rolamento
F_T	Força de tração
$F_{T,Vmáx}$	Força de tração à velocidade máxima
g	Aceleração gravítica
I	Intensidade de turbulência
L	Sustentação
m	Massa
M	Momento <i>pitch</i> (no centro geométrico)
M_P	Momento <i>pitch</i>
N	Momento de rotação
p	Pressão
p_{∞}	Pressão ambiente
$P_{b,A}$	Potência de perdas do motor
$P_{b,nom}$	Potência máxima do motor nas rodas
$P_{b,T}$	Potência do motor nas rodas
P_T	Potência de tração
$P_{T,máx}$	Potência de tração à velocidade máxima
R	Momento de rolamento
Re	Número de <i>Reynolds</i>
T	Temperatura

u_τ	Velocidade de atrito
V	Velocidade
$V_{m\acute{a}x}$	Velocidade máxima
V_∞	Velocidade do escoamento livre
Y	Força lateral
y^+	Distância adimensional à parede
α	Ângulo de inclinação da estrada
β	Ângulo de ataque de ventos cruzados
δ	Espessura da camada limite
Δ	Variação
η_D	Eficiência do sistema de tração
μ	Viscosidade dinâmica
ν	Viscosidade cinemática
ν_T	Viscosidade cinemática turbulenta
ρ	Densidade
τ	Força de corte
τ_w	Tensão de corte na parede
∂	Diferencial parcial

1 Introdução

Neste capítulo será introduzido o tema e os principais objetivos pretendidos, começando com a aerodinâmica e a sua importância na engenharia automóvel. Depois apresentar-se-á uma descrição do CFD e de como se aplica no mundo automóvel.

1.1 Aerodinâmica

A aerodinâmica é uma ciência aplicada, com muitas aplicações práticas em engenharia. Esta área científica estuda as forças e momentos nos corpos que se movem através de um fluido (normalmente ar). Do movimento através de um fluido resultam a geração de sustentação, arrasto e momentos. Estas forças aerodinâmicas têm um impacto considerável, como tal o seu estudo é fundamental. [1]

1.2 Aerodinâmica na engenharia automóvel

A performance, manobrabilidade, segurança e conforto de um automóvel são significativamente afetados pelas suas propriedades aerodinâmicas. É importante um baixo arrasto para bons consumos de combustível e baixas emissões de poluentes. Os outros aspetos dependentes da aerodinâmica também são muito importantes para a qualidade de um automóvel: estabilidade direcional; ruído do vento: sujidade dos faróis, vidros e carroceria; arrefecimento do motor, caixa de velocidades e travões; aquecimento, ventilação e ar condicionado do habitáculo.

Devido a estes fatores, a aerodinâmica possui uma importância extrema no desenvolvimento de um automóvel, sendo obrigatório o seu estudo. [2]

1.3 Análise CFD de carroceria de um automóvel: objetivos

A dinâmica de fluidos computacional – CFD – é usada para verificar os ensaios em túnel de vento, otimizar a forma dos automóveis em termos de sustentação e arrasto e estudar características mais salientes do escoamento. [3]

O CFD pode ser descrito como o uso de computadores para produzir informação sobre a forma como os fluidos se movem em dadas situações. Engloba uma variedade de tecnologias que inclui matemática, ciência de computadores, engenharia e física. Estas disciplinas têm de ser reunidas para proporcionar os meios de modelação do escoamento de fluidos.

O *hardware* e o *software* dos computadores são meras ferramentas para assistir ao entendimento dos modos como os fluidos se movimentam e a interação entre este movimento (escoamento) e algum objeto que está a ser ou já está desenvolvido. Consequentemente é muito importante que todos os utilizadores de CFD tenham alguns conhecimentos sobre o fenómeno físico que ocorre quando os fluidos se movem.

Para a maioria das situações que vão ser consideradas, assumir-se-á que a densidade do fluido não varia, o que é verídico para escoamentos de baixa velocidade onde não há efeitos de aquecimento. Quando a densidade permanece constante, o escoamento é dito incompressível. [4]

Este trabalho tem como principais objetivos saber quais as características aerodinâmicas da carroceria proposta em várias situações do seu movimento através da análise computacional, simulando testes em túnel de vento. Pretende-se perceber quais as razões dos resultados obtidos assim como a apresentação de possíveis alterações e cuidados a ter na construção da carroceria em questão.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica de conceitos relacionados com o tema da dissertação. Esta revisão bibliográfica resulta de uma pesquisa contínua, efetuada durante a execução do trabalho de modo a entender a forma como se processam os fenómenos aerodinâmicos e a aplicação do CFD.

2.1 Fundamentos de Mecânica dos Fluidos

Apresentam-se os principais conceitos da Mecânica dos Fluidos recorrendo a exemplos aplicados a veículos automóveis. Também são referidos factos desta área científica para os veículos de competição automóvel, devido à finalidade desportiva do veículo em estudo.

2.1.1 Propriedades do fluido

As cargas exercidas sobre um veículo que se move através do ar, ou num modelo de pequena escala num túnel de água, dependem das propriedades do material fluido (temperatura, pressão, densidade, viscosidade, etc.). [5]

Densidade

A densidade de qualquer material é definida como a sua massa por unidade de volume. Nos fluidos, esta propriedade depende da pressão p e da temperatura T . A maioria dos veículos, incluindo veículos de competição, são operados a velocidades V inferiores a um terço da velocidade do som, $V_\infty < a_\infty/3$. Nesta gama de velocidades, as variações de pressão e temperatura no campo do escoamento são pequenas em comparação com os valores da velocidade do escoamento livre e, como tal, as correspondentes alterações da densidade podem ser desprezadas. Assim, o fluido pode ser considerado incompressível. No caso do ar, a densidade é uma propriedade constante, cujo valor numérico é $\rho = 1.2250 \text{ kg/m}^3$, de acordo com as normas norte-americanas de condições atmosféricas normalizadas ao nível do mar ($p = 1 \text{ atm}$, $T = 288 \text{ K}$). [2]

Viscosidade de um fluido

O efeito da viscosidade de um fluido pode ser demonstrado pelo simples exemplo da Figura 1 (segundo a analogia de fricção seca) onde um fluido viscoso é colocado entre duas superfícies sólidas e paralelas. As partículas do fluido, situadas junto às duas paredes, tendem a aderir à superfície sólida e a manter uma velocidade relativa nula (condição “anti-deslizamento”).

Este exemplo pode também ajudar a definir a viscosidade através da medição da força de corte necessária para mover a placa superior. É também explícito que quando a viscosidade aumenta, a força de corte (que causa arrasto por atrito) também aumenta.

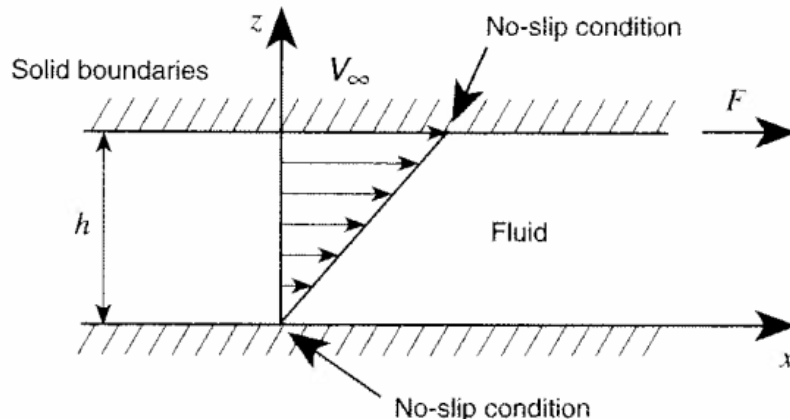


Figura 1 - Distribuição da velocidade entre duas placas paralelas, causada pelo movimento da placa superior. [5]

A propriedade conhecida por viscosidade pode ser descrita através da experiência mostrada na Figura 1, onde a superfície superior é movida por uma força de corte F a uma velocidade V_∞ . A magnitude da força de corte pode ser relacionada com a velocidade da placa superior e com a viscosidade do fluido pela seguinte relação:

$$\frac{F}{A} = \frac{\mu V_\infty}{h} \quad (2.1)$$

Aqui, μ é o coeficiente de viscosidade (viscosidade dinâmica) e A é a área da superfície superior. O valor de μ para o ar, segundo as normas norte-americanas de condições atmosféricas normalizadas ao nível do mar, é $\mu = 1.7894 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$. [2, 5]

Número de Reynolds

O número de *Reynolds* (Re) representa efeitos de escala e pode ser usado para quantificar o produto da velocidade pelo comprimento do veículo. A sua importância torna-se evidente quando comparando resultados de testes de diferentes escalas de modelos ou de diferentes velocidades. Saber a magnitude do número de *Reynolds* indica se o escoamento é laminar ou turbulento (com velocidade crescente o escoamento torna-se mais turbulento).

Quando usado no campo da aerodinâmica de automóveis, quantifica o produto da velocidade pelo tamanho. Mais precisamente, o número Re representa a razão entre as forças viscosas (atrito) e de inércia criadas no ar e é definido pela seguinte fórmula:

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (2.2)$$

Aqui, ρ é a densidade do fluido, μ é a viscosidade deste, V representa a velocidade e L é uma característica de comprimento (do veículo, por exemplo). [5]

2.1.2 Equação de Bernoulli para a pressão

A forma de um veículo em movimento provoca alterações de direção e velocidade no escoamento do ar. Este movimento do escoamento de ar junto da carroceria cria uma distribuição de velocidade que, por sua vez, cria as cargas aerodinâmicas que atuam no veículo. Estas cargas, em geral, podem ser divididas em duas principais. A primeira é a força de corte (devido ao atrito), que resulta da camada limite viscosa - descrita pelas equações (2.1) e (2.6) - que atua tangencialmente à superfície e contribui para o arrasto. A segunda força é resultante da pressão e atua perpendicularmente à superfície, contribuindo para a sustentação e arrasto (logo, a sustentação de um veículo é o efeito adicional da distribuição da pressão).

De notar que a força de pressão é originada, principalmente, pela velocidade fora da camada limite, tal como a V_0 mostrada na Figura 3 (a velocidade no fundo da camada limite é nula).

As duas cargas principais dependem da velocidade perto da superfície do veículo (fora da camada limite), que é o resultado da forma da carroceria. De forma a compreender totalmente a origem das cargas aerodinâmicas, é necessário relacionar a geometria do veículo com o campo de velocidades resultante, através da equação de *Bernoulli*.

A equação de *Bernoulli* descreve a relação entre a velocidade e a pressão do ar. A fórmula pode ser aplicada às linhas de corrente, como as descritas pela Figura 9 ou pela Figura 10. Ao longo de qualquer ponto de uma linha de corrente, a relação entre a pressão estática local p , densidade ρ e velocidade V é a seguinte: [5-7]

$$\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} = \text{Constante} \quad (2.3)$$

O valor da constante não é realmente importante porque a equação será usada somente para comparar a velocidade e pressão entre dois pontos do escoamento - ver equação (2.4).

Uma conclusão importante que se pode retirar da equação de *Bernoulli* é que, de forma a originar força descendente num veículo, tem de se criar um escoamento mais rápido na superfície inferior do que na superfície superior. Isto, por sua vez, vai originar uma pressão mais baixa na superfície inferior, resultando em força descendente. [5]

Aplicação da equação de Bernoulli

De forma a compreender a importância desta equação, assume-se o escoamento sobre um veículo que se move para a frente a uma velocidade V_∞ , como mostrado na Figura 2. Como o veículo deforma as linhas de corrente, a velocidade aumenta perto da carroceria. Pode-se escrever a equação (2.3) para um ponto muito à frente do veículo (por exemplo, em qualquer um dos três pontos no infinito - ∞ - mostrados do lado esquerdo da figura) e para um segundo ponto na carroceria (por exemplo no ponto A). Como a constante da equação (2.3) é a mesma para os dois pontos, pode-se escrever:

$$\frac{p_A}{\rho} + \frac{V_A^2}{2} = \frac{p_\infty}{\rho} + \frac{V_\infty^2}{2} \quad (2.4)$$

O subscrito A, representa as quantidades medidas no ponto A. Portanto, sabendo-se a pressão ambiente p_∞ , a velocidade do veículo V_∞ e a pressão estática p_A na superfície do veículo, pode-se então calcular a velocidade local do ar V_A .

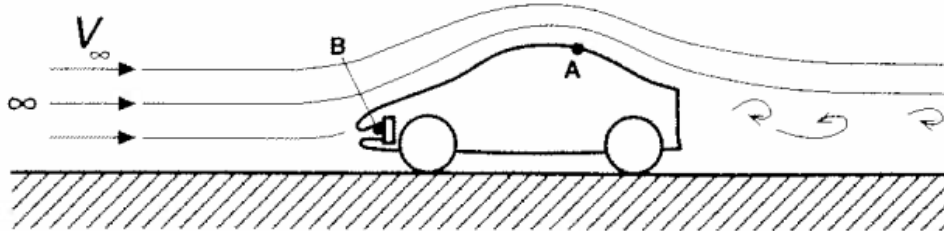


Figura 2 - Terminologia usada para descrever a aplicação da equação de Bernoulli. [5]

Para demonstrar a aplicação desta equação, seleciona-se um ponto do escoamento onde a velocidade é nula no veículo em movimento, como no caso de uma cavidade fechada criada na frente do automóvel (ponto B na Figura 2). Escrevendo esta equação para os pontos ∞ e B, obtém-se: [5]

$$\frac{p_B}{\rho} = \frac{p_\infty}{\rho} + \frac{V_\infty^2}{2} \quad (2.5)$$

2.1.3 Camada limite

A camada de mudança rápida na velocidade tangencial (mostrada esquematicamente pelo perfil de velocidades destacado na Figura 3) é designada por camada limite. A camada limite é consequência dos efeitos da viscosidade (tensão de corte) na superfície dos corpos e existe em formas mais complicadas como no automóvel mostrado na Figura 3. Verifica-se, através da análise da figura, que o aumento da espessura δ da camada limite com a distância ao longo do corpo e que a velocidade do escoamento, no interior da camada, aumenta com a distância à superfície. [1, 5]

Uma camada limite espessa cria mais arrasto por atrito viscoso e um aumento repentino da sua espessura pode originar separação do escoamento, resultando em arrasto adicional e perda de força descendente (no caso de veículos de competição) criada pelos apêndices aerodinâmicos, como por exemplo as asas invertidas.

A camada limite pode ser laminar ou turbulenta. Normalmente, as camadas limite iniciam-se laminares e tornam-se turbulentas gradualmente. Teoricamente, num escoamento não perturbado, a camada limite é inicialmente laminar, mas à medida que a distância local L (e o correspondente número de *Reynolds* local) aumenta, o escoamento torna-se turbulento. A região onde se concretiza esta mudança é a região de transição. Como a Figura 4 demonstra, devido aos componentes de velocidade turbulenta, a camada limite turbulenta é mais espessa. Portanto, a quantidade de movimento perdida nesta camada limite é superior e o atrito turbulento (superfície) é expectável que seja também superior (assim como a força de arrasto).

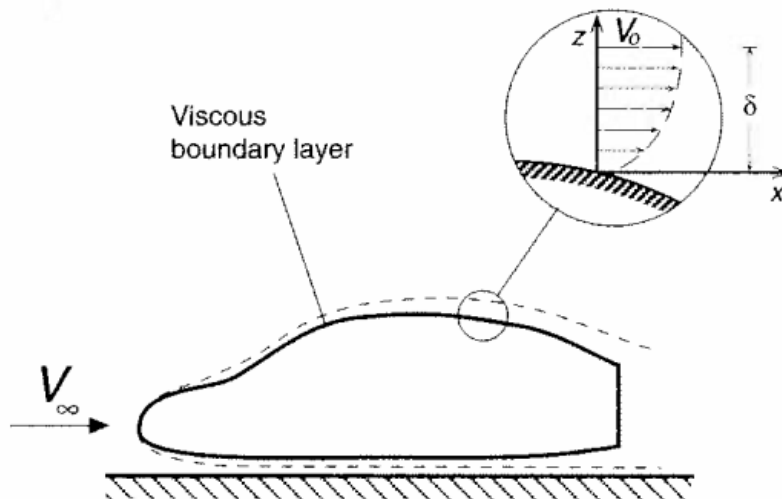


Figura 3 - Camada limite na proximidade de uma superfície de um veículo e distribuição de velocidade típica nessa camada. [5]

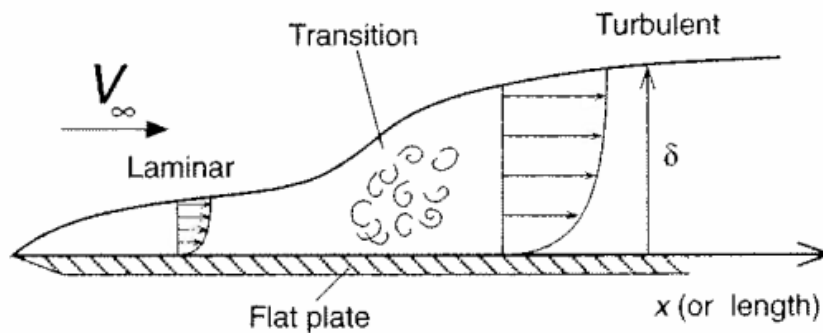


Figura 4 - Variação da espessura da camada limite ao longo de uma placa plana. [5]

Em relação ao efeito da velocidade no atrito, nota-se que a espessura da camada limite diminui com o aumento da velocidade do ar. Isto é consequência da maior quantidade de movimento do escoamento livre (produto da massa pela velocidade) comparada com a perda de quantidade de movimento causada pela viscosidade perto da superfície sólida. Portanto, o coeficiente de atrito (que contribui para o arrasto do veículo) será reduzido com o aumento da velocidade do escoamento. Esta tendência é reforçada pelo resultado experimental típico do coeficiente de atrito, na Figura 5, para o caso de uma placa plana sob um escoamento paralelo.

Com os veículos de competição em mente, para um baixo arrasto, têm de se manter grandes regiões de camada limite fina e laminar (e a transição adiada). Contudo, em casos onde a separação de escoamento é provável, como na secção traseira de um veículo ou nas asas, é preferível haver uma camada limite turbulenta (com alguma penalização no arrasto) evitando-se separações de escoamento (que levam a perdas de forças descendente). [1, 2, 5]

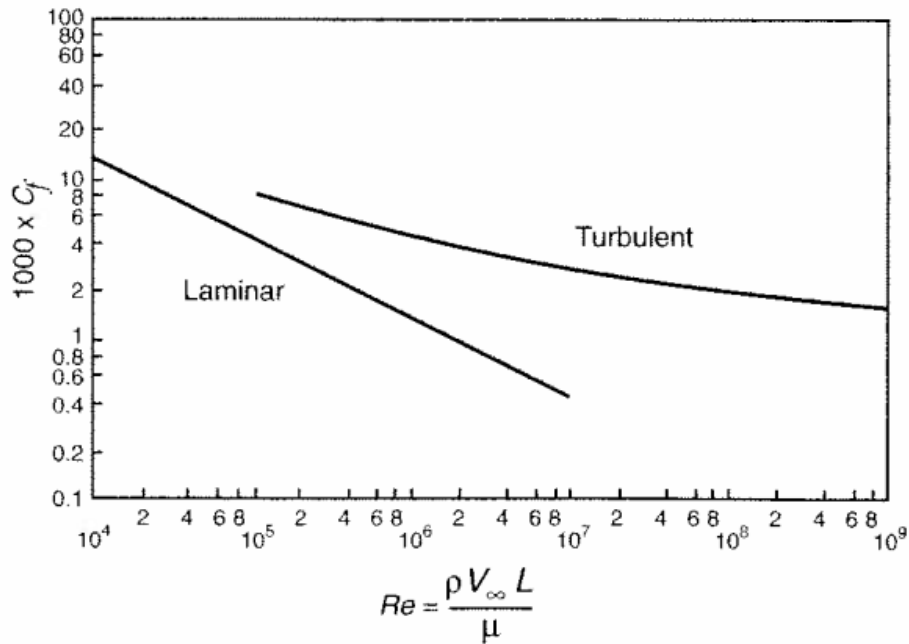


Figura 5 - Valores do coeficiente de atrito C_f de uma placa plana, colocada paralelamente ao escoamento, para camadas limite laminares e turbulentas, versus o número de Reynolds. [5]

Coeficiente de atrito

O coeficiente de atrito é um número adimensional (independente das unidades) que indica o nível de atrito entre a superfície do veículo e o ar. Este coeficiente é definido pela seguinte equação:

$$C_f = \frac{\tau}{\frac{1}{2\rho V_\infty^2}} \quad (2.6)$$

Onde τ é a força de corte por unidade de superfície (resistência por atrito) e é adimensionado pela quantidade $1/(2\rho V_\infty^2)$ (pressão dinâmica), para que o valor numérico de C_f seja independente da velocidade. [2, 5]

Transição e "bolha" laminar

Na aerodinâmica de automóveis, a ordem de magnitude do número de Reynolds é cerca de 10^7 e, baseado na Figura 5, é possível a existência de grandes regiões de camada limite laminar. A camada limite laminar é desejada quando o objetivo é reduzir o arrasto devido ao atrito. Mas, se a curvatura da superfície é elevada, o escoamento pode separar-se e esta vantagem no arrasto perde-se.

Um caso típico é demonstrado na Figura 6, onde a camada limite no capô é inicialmente laminar. Contudo, devido à elevada curvatura da superfície superior, a camada limite laminar separa-se inicialmente, ligando-se mais tarde. A ligação é, normalmente, o resultado da camada limite se tornar turbulenta e, devido à superior transferência de quantidade de movimento no escoamento turbulento, a separação é atrasada (ou evitada). Esta separação precoce do

escoamento é designada por separação laminar e as linhas de corrente em circuito fechado (onde existe escoamento invertido) são conhecidas por “bolha” laminar.

A “bolha” laminar é sensível e, como consequência, o escoamento separa-se totalmente sem se ligar novamente, resultando num aumento considerável de arrasto. Esta “bolha” aparece na baixa gama do número de *Reynolds* ($10^4 - 0.2 \times 10^6$) e desaparece à medida que a velocidade aumenta. [5]

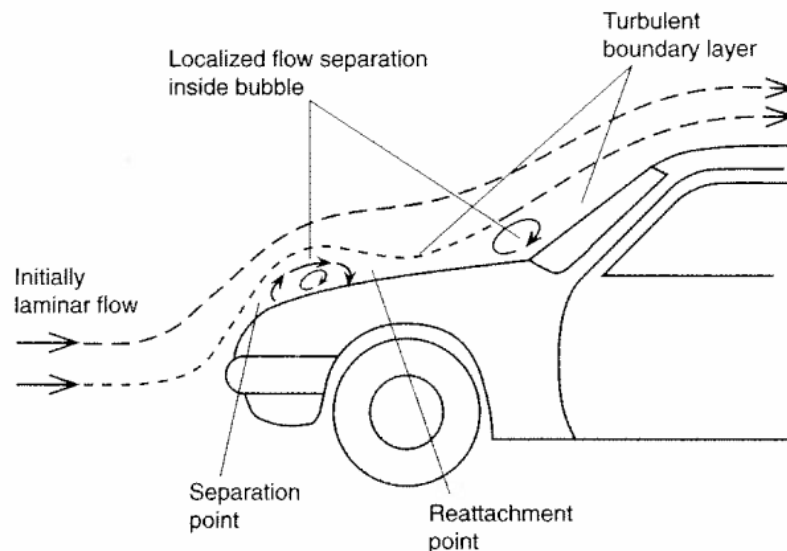


Figura 6 - Descrição esquemática da “bolha” laminar e da transição de camada limite laminar para turbulenta. [5]

2.1.4 Efeitos da viscosidade

Apesar da pequena espessura da camada limite na parede, o escoamento viscoso no interior desta possui uma forte influência no desenvolvimento de todo o campo de escoamento. [2]

Separação

O escoamento laminar e turbulento na camada limite depende muito da distribuição da pressão que é imposta pelo escoamento externo. Para um aumento da pressão na direção do escoamento, o fluxo na camada limite é retardado, especialmente perto da parede, podendo até existir fluxo inverso. Este comportamento é mostrado esquematicamente na Figura 7. [2]

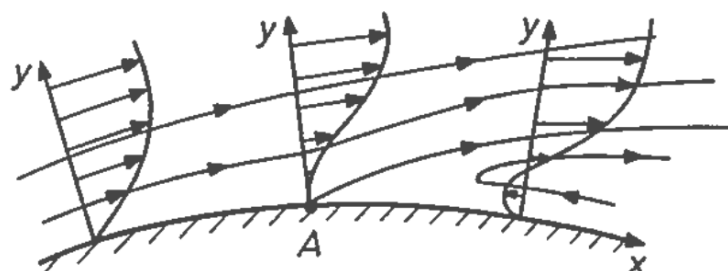


Figura 7 - Separação do fluxo da camada limite na parede. [2]

Arrasto por atrito

Quando na presença de um fluido viscoso, existe na parede do corpo um gradiente de velocidade du/dy . Devido ao atrito molecular, atua uma tensão de corte em toda a superfície do corpo. A integração dos correspondentes componentes de força na direção do escoamento livre, na equação (2.7), leva ao chamado arrasto por atrito D_f . Na ausência de separação de escoamento, está é a principal contribuição para o arrasto total de um corpo em escoamentos viscosos bidimensionais.

$$D_f = \oint \tau_w \cos \varphi dS \quad (2.7)$$

O arrasto de corpos com espessura finita consiste principalmente em arrasto por atrito, que é baixo em todos os casos onde não ocorre separação de escoamento. Isto pode ser alcançado através do uso de formas esbeltas na parte de trás do corpo que produzam apenas um moderado aumento de pressão na direção do escoamento. Os perfis alares e os corpos esbeltos (*streamlined bodies*) são formas deste tipo. [2]

Arrasto por pressão

Corpos como cilindros circulares, esferas ou uma placa plana normal ao escoamento (*blunt bodies*), mostram características de arrasto muito diferentes. Na presença de um escoamento invíscido sobre estes corpos, ocorrem gradientes de pressão extremamente íngremes na parte de trás que levam à separação em escoamentos viscosos. A distribuição de pressão é assim consideravelmente diferente quando comparada com o caso teórico de escoamento invíscido.

A distribuição de pressão é assimétrica em relação ao eixo perpendicular ao escoamento. Integrando os componentes de força na direção do escoamento livre, resultantes da distribuição da pressão, na equação (2.8), resulta o chamado arrasto por pressão D_p .

$$D_p = \oint p \sin \varphi dS \quad (2.8)$$

O arrasto por pressão é predominante neste tipo de corpos em comparação com o arrasto por atrito resultante da tensão de corte na parede. Em geral, o arrasto de um corpo pode ser escrito como:

$$D = D_f + D_p \quad (2.9)$$

Normalmente, para um veículo, deve ser evitada uma mudança brusca do coeficiente de arrasto em função do seu número de *Reynolds*. Para esta finalidade, a separação de escoamento é fixada em certos pontos, por exemplo na extremidade superior da janela traseira. A forma do corpo deve ser modelada de modo a manter o escoamento ligado e que o aumento de pressão seja o maior possível em várias condições do escoamento livre. A esteira resultante deve ser o mais pequena possível para a obtenção de baixo arrasto. [2]

Forças e momentos globais

A Figura 8 mostra as forças e os momentos aerodinâmicos que exercem sobre um veículo. Em escoamento simétrico ($\beta = 0$), o arrasto D é acompanhado por uma força de sustentação L . Adicionalmente, está presente um momento de *pitch* M segundo o eixo lateral (eixo y). Os três componentes L , D e M determinam completamente o vetor da força aerodinâmica resultante. Quando o ponto de referência do momento de *pitch* é sabido (em aerodinâmica de automóveis está, geralmente, situado na superfície da estrada a meio da distância entre eixos e na linha de simetria), as forças adicionais que atuam nos eixos da frente e de trás, resultantes do escoamento em torno do veículo, podem ser avaliadas. [2]

O momento *pitch* permite estabelecer uma relação entre a força descendente no eixo da frente e no eixo de trás, sendo extremamente importante para a estabilidade a elevadas velocidades. [5]

Em condições de vento cruzado ($\beta \neq 0$), está presente um campo de escoamento assimétrico. Neste caso, além das forças e momentos mencionados, é observada uma força lateral Y . Além disso, ocorre um momento de rolamento R segundo o eixo longitudinal (eixo x) e um momento de rotação N segundo o eixo vertical (eixo z).

Assim, os seis componentes, L , D , M e Y , R , N , determinam o vetor da força total. Para uma posição conhecida do ponto de referência, as forças adicionais que atuam nas quatro rodas do veículo podem ser avaliadas. [2]

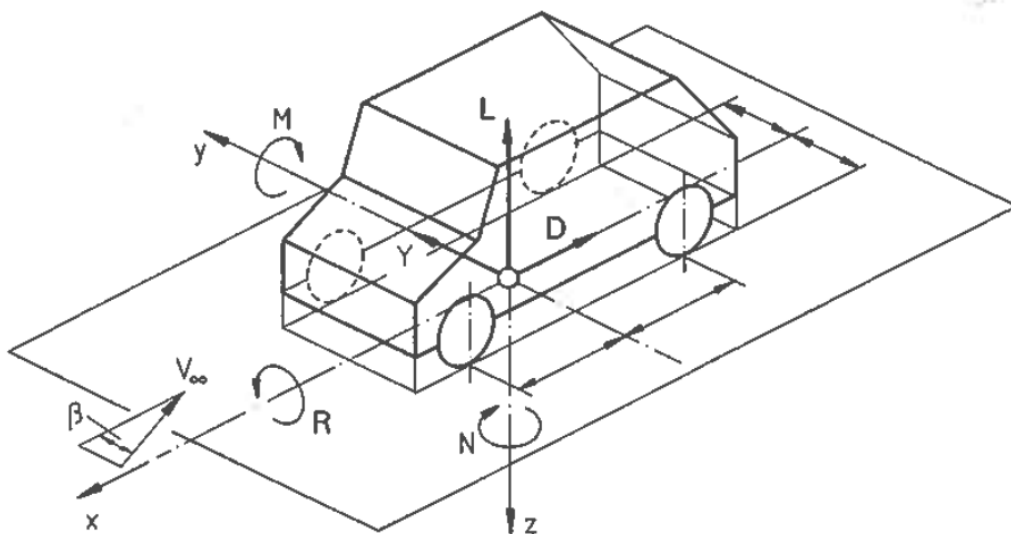


Figura 8 - Forças e momentos aerodinâmicos que atuam sobre um veículo. [2]

Coeficientes adimensionais

A ideia básica da definição de coeficientes adimensionais para o arrasto e para a sustentação é que o valor destes coeficientes será independente da velocidade e estará relacionado apenas com a forma do veículo.

De forma a obter coeficientes adimensionais de carga, tem de se dividir por V_∞^2 . As definições exatas dos coeficientes aerodinâmicos de sustentação C_l , de arrasto C_d e de força lateral C_y são mostradas nas seguintes equações: [1, 2, 5]

$$C_d = \frac{D}{\left(\frac{1}{2}\right)\rho V_\infty^2 A} \quad (2.10)$$

$$C_l = \frac{L}{\left(\frac{1}{2}\right)\rho V_\infty^2 A} \quad (2.11)$$

$$C_y = \frac{Y}{\left(\frac{1}{2}\right)\rho V_\infty^2 A} \quad (2.12)$$

Na prática, a sustentação L , o arrasto D e a força lateral Y são divididos pela pressão dinâmica e pela área de referência A . Para aplicações automóvel, a área frontal é normalmente usada como área de referência. É de notar também que, por vezes, os coeficientes são definidos apenas pela direção (especialmente na Europa). Neste caso, são usados C_x , C_y e C_z em vez de C_d , C_y e C_l , respetivamente. Adicionalmente, é usada uma dimensão característica, como o comprimento total (por vezes é usado, alternativamente, a distância entre eixos), para os três momentos. [2, 5]

2.1.5 Linhas de corrente, escoamento ligado e escoamento separado

As linhas de corrente são as curvas associadas a uma descrição pictórica do movimento de um fluido. Quando um veículo se move a uma velocidade constante, o escoamento está em regime estacionário. Neste caso as partículas de ar movem-se ao longo das linhas de corrente (linhas paralelas à direção da velocidade local). A Figura 9 demonstra as formas das linhas de corrente em torno de um perfil alar.

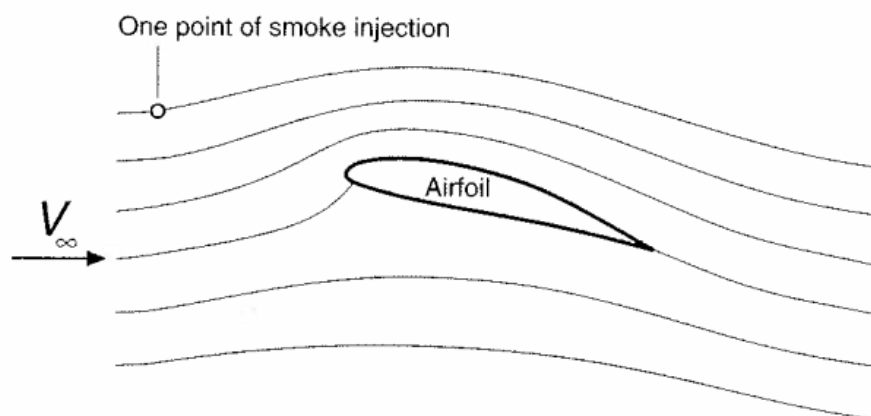


Figura 9 - Linhas de corrente de um escoamento sobre um perfil alar. [5]

Observando os vários traços de linhas de corrente no escoamento da Figura 10, é possível verificar se o escoamento segue, ou não, a forma do carro perto da sua superfície. Quando as linhas de corrente seguem a forma do veículo, de modo exato (como na parte A da Figura 11), o escoamento é considerado ligado. Se o escoamento não segue a forma da superfície (como na

parte de trás do veículo na Figura 9 e na parte B da Figura 11), então o escoamento é considerado separado (um desvio acentuado na forma de um corpo origina a separação do escoamento). Normalmente, os escoamentos separados atrás do veículo resultarão numa esteira com regime transiente, que se pode estender por grandes distâncias.

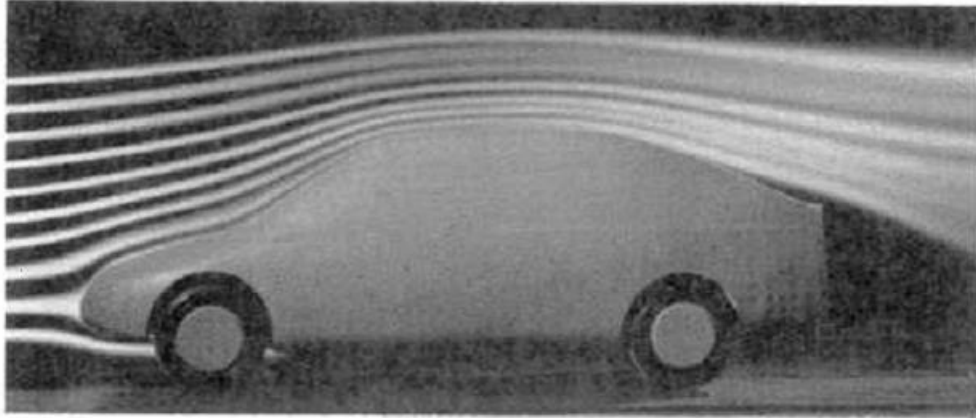


Figura 10 - Visualização das linhas de corrente (por injeção de fumo) durante um teste em túnel de vento. [5]

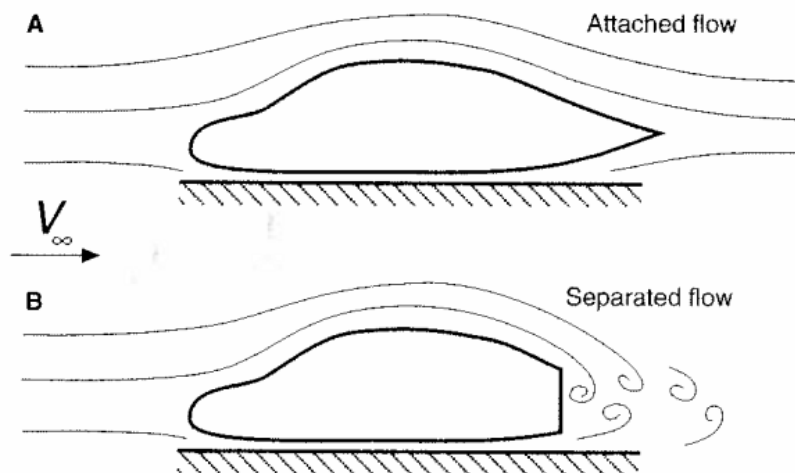


Figura 11 - Escoamento ligado sobre um veículo de forma esbelta (A), e a separação local do escoamento na parte de trás de uma forma automóvel mais real (B). [5]

Concluindo, a presença de escoamentos ligados é extremamente importante na redução do arrasto e/ou aumento de força descendente (no caso da competição automóvel). [1, 5]

2.1.6 Distribuição de velocidade

Quando um veículo se move através de ar parado, a sua forma perturba as partículas de ar de modo que a sua velocidade não é igual em todos os pontos do escoamento. Como exemplo, para ilustrar a distribuição da velocidade sobre uma placa plana, considera-se um escoamento com velocidade constante (V_∞), como mostrado no lado esquerdo da Figura 12. De seguida, é

inserida uma placa plana no escoamento, paralelamente às linhas de corrente, como ilustrado no lado direito da figura.

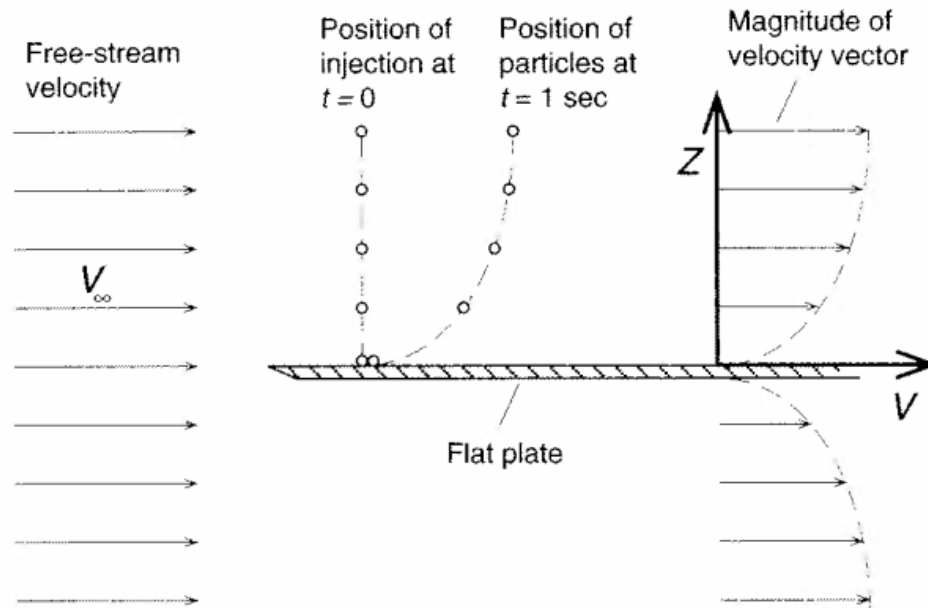


Figura 12 - Vista lateral da distribuição da velocidade sobre uma placa plana atravessada por um escoamento livre, V_∞ . [5]

A placa plana introduz uma perturbação, mesmo posicionada paralelamente à direção do escoamento (e às linhas de corrente). O diagrama descreve a variação da velocidade do fluido ao longo da linha vertical (ordenada Z) e a magnitude da velocidade (V) é representada paralelamente à abcissa (direção de escoamento livre) deste diagrama. Portanto, o diagrama descreve a distribuição da velocidade na superfície superior da placa.

Analisando este exemplo, observam-se duas características interessantes. A velocidade do ar anula-se perto da superfície. Isto é conhecido como a “condição anti-deslizamento” (anteriormente mencionada). As partículas do fluido que contactam com o corpo fixam-se à superfície, não possuindo velocidade relativa. A velocidade aumenta com a distância ao corpo sólido até alcançar o valor da velocidade do escoamento livre V_∞ . Esta camada é designada por camada limite. [5]

2.1.7 Tipos de escoamento: laminar e turbulento

Quando as linhas de corrente são paralelas (parte superior da Figura 13), seguem a direção da velocidade média e o movimento do fluido aparenta ser “bem organizado”, então este escoamento é laminar. Por outro lado, é possível ter a mesma velocidade média no escoamento, mas as partículas do fluido movem-se momentaneamente noutra direção (parte inferior da Figura 13). O fluido é então turbulento (mesmo sendo a velocidade média igual para ambos os escoamentos laminar e turbulento).

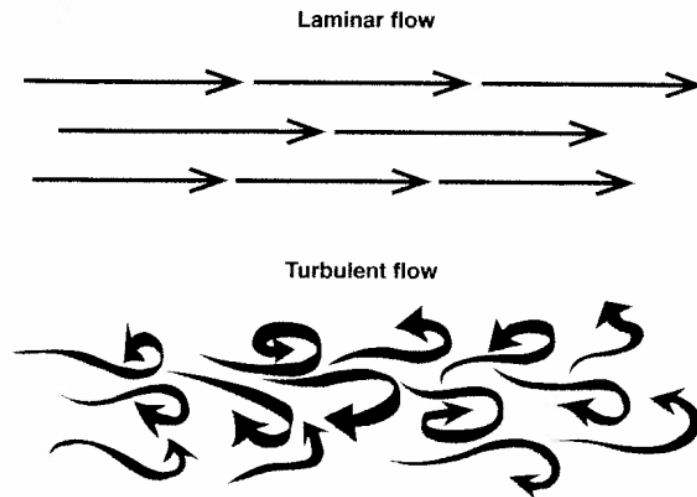


Figura 13 - Traços de partículas de fluido em escoamentos laminar e turbulento. [5]

Saber se o escoamento é laminar ou turbulento é muito importante para os engenheiros de automóveis, dado que características como separação de escoamento e arrasto ou sustentação do veículo podem mudar drasticamente entre estes dois escoamentos. Normalmente, quando um veículo viaja num ambiente imperturbável, o escoamento dominante pode ser considerado laminar. Contudo, condições como ventos ou o movimento de outros veículos pode levar o escoamento a tornar-se turbulento. Além disso, mesmo se o escoamento for inicialmente laminar, este pode tornar-se turbulento perto do veículo devido à perturbação criada por este. [5]

2.1.8 Escoamento sobre corpos e coeficiente de pressão

De forma a avaliar as cargas aerodinâmicas é necessário saber a distribuição da pressão na superfície. Para o efeito, é usado um coeficiente de pressão adimensional, descrito nas equações (2.13) e (2.14).

O coeficiente de pressão, C_p , apesar da sua aparência complexa, é uma medição da pressão local p (uma vez que as outras quantidades são as mesmas para todos os pontos de veículo). A distribuição da pressão é independente da velocidade do veículo e, em termos de C_p , deverá ser a mesma para todas as velocidades (por exemplo, $V_\infty = 100, 150, 200$ km/h, etc.).

O coeficiente de pressão adimensional está diretamente relacionado com a pressão. Para o tornar independente da velocidade este é dividido pela pressão dinâmica. A equação para o C_p é a seguinte:

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\left(\frac{1}{2}\right)\rho V_\infty^2} \quad (2.13)$$

Todos os termos são constantes, exceto a pressão p . É possível encontrar o coeficiente de pressão através da velocidade local usando a relação $p - p_\infty = \left(\frac{1}{2}\right)\rho(V_\infty^2 - V^2)$. Esta relação

é proveniente da equação (2.5) - assumindo que não há alteração da densidade do ar. Trocando o numerador com esta expressão resulta na seguinte forma mais simples para o coeficiente de pressão:

$$C_p = 1 - \frac{V^2}{V_\infty^2} \quad (2.14)$$

De forma a familiarizar com alguns valores típicos do coeficiente de pressão, analise-se a Tabela 1. Primeiro, no ponto de estagnação (por exemplo, o ponto B na Figura 2) onde a velocidade é zero, tem-se um $C_p = 1.0$ - ver equação (2.14). Segundo, num ponto sem perturbação, longe do veículo ($p = p_\infty$) tem-se $C_p = 0$ - ou usar $V = V_\infty$ na equação (2.14). Também, se a velocidade local é superior à velocidade do escoamento livre (V_∞), então o C_p torna-se negativo.

Tabela 1 - Valores típicos do coeficiente de pressão (C_p). [5]

Local	Velocidade	C_p
Ponto de estagnação	0	1.0
No veículo	Se V menor que V_∞	0 a 1.0
No veículo	Se V maior que V_∞	Negativo

Assim, a gama típica do C_p é de +1 (para velocidade nula) até -8 (para uma velocidade local de três vezes V_∞). [2, 5]

Distribuição da pressão sobre corpos

Analisar-se-á o caso de um escoamento ligado sobre uma forma simples como, por exemplo, um hemisfério. Os resultados deste caso estão resumidos na Figura 14, onde a velocidade e a pressão estão representadas ao longo da linha central do hemisfério (θ mede a posição angular do corpo). Na frente do hemisfério, perto do solo, há um ponto de estagnação ($V = 0$ e $C_p = 1.0$). No topo a velocidade é máxima e o coeficiente de pressão é mínimo. Como este corpo é simétrico, haverá outro ponto de estagnação na parte de trás. Portanto, conclui-se que a velocidade aumenta com o aumento da espessura (ou altura) do corpo. Da mesma forma, a pressão diminui, de acordo com a equação de *Bernoulli*. [5]

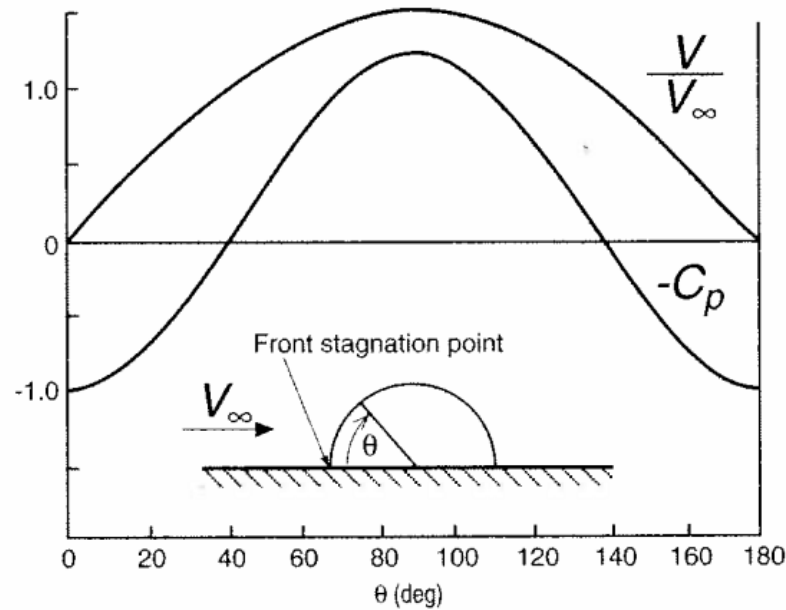


Figura 14 - Distribuição dos coeficientes de velocidade e de pressão negativa na linha de simetria de um hemisfério que se encontra sob um escoamento livre V_∞ . [5]

Distribuição de pressão num corpo com forma de automóvel

Quando o escoamento contorna uma superfície côncava (como na parte da frente do hemisfério na Figura 14), a velocidade diminui e a pressão aumenta. Por outro lado, quando o escoamento contorna uma superfície convexa (como na parte superior do hemisfério), então a velocidade aumenta e a pressão diminui.

Analisando agora a Figura 15, pode-se verificar que à frente do corpo há um ponto de estagnação e $C_p = 1.0$, consequência da forma côncava da superfície. O escoamento acelera depois sobre o capô e o C_p torna-se negativo, visto que a forma da superfície pode ser classificada como convexa. Na base do para-brisas, o escoamento diminui novamente de velocidade (côncavo) e a pressão aumenta. O escoamento torna a acelerar no topo do veículo (convexo), onde a pressão mínima é observada. Através da zona traseira do veículo toda a sequência é revertida, mesmo sendo a forma da frente diferente da forma traseira. Como tal, a pressão atrás do veículo não atinge o valor de $C_p = 1.0$, como no caso do escoamento ligado presente na Figura 14. Isto é devido à separação do escoamento atrás do veículo. A distribuição da pressão na parte inferior do veículo também é mostrada na figura e, nesta secção, a pressão atrás também não recupera para o nível da pressão de estagnação. Como resultado da separação do escoamento, as pressões atrás do veículo são inferiores às da frente (onde $C_p = 1.0$), criando arrasto. Este componente de força de arrasto, que resulta de separações de escoamento, designa-se por arrasto devido à forma. [5]

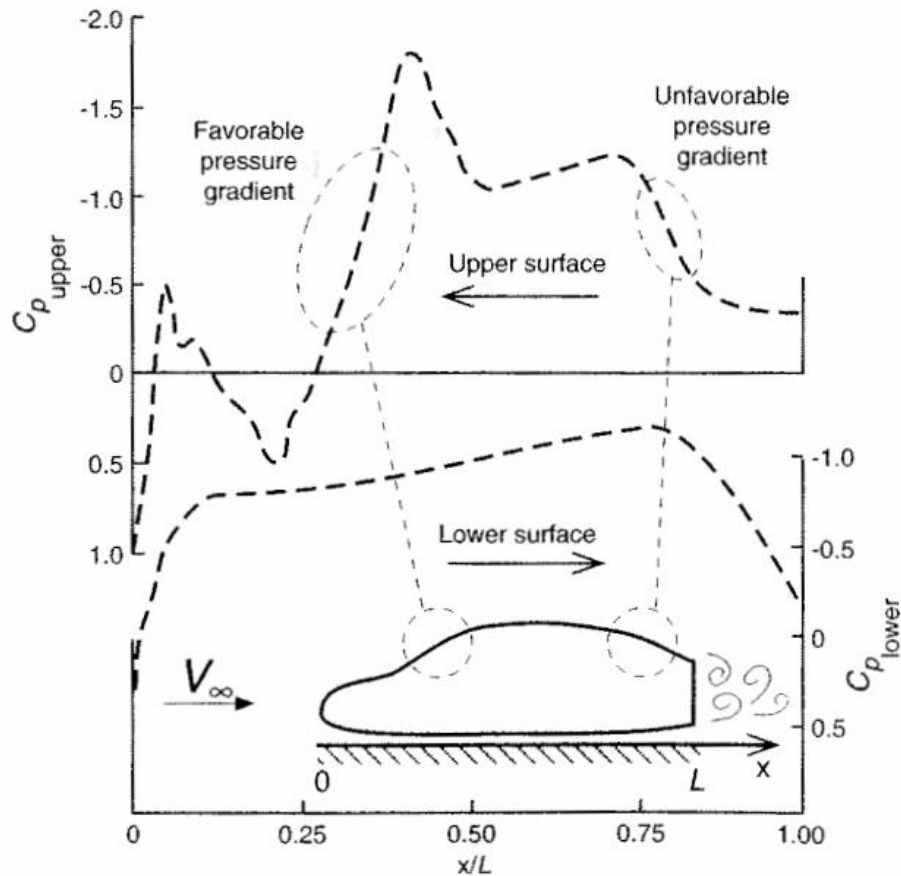


Figura 15 - Distribuição do coeficiente de pressão medido sobre uma forma bidimensional de um automóvel. [5]

Distribuições de pressão favoráveis e desfavoráveis

A importância da distribuição de pressão reside na possibilidade de usar essa informação na aplicação de entradas e saídas de ar para arrefecimento (certificando-se de que a pressão na saída é inferior à da entrada). Também se podem identificar áreas no veículo onde a pressão decresce ao longo de uma linha de corrente. Esta condição é denominada distribuição de pressão favorável (ou gradiente favorável). A distribuição de pressão oposta, perto da janela traseira, é denominada distribuição de pressão desfavorável (ou gradiente), visto que a pressão aumenta ao longo da linha de corrente.

Ao longo de um gradiente de pressão favorável, o escoamento permanece ligado durante distâncias superiores. A camada limite, em escoamentos livres não perturbados, também permanecerá laminar durante maiores distâncias ao longo da superfície de um corpo. Tudo isto resulta em menos atrito e menos arrasto devido à forma. Por outro lado, gradientes de pressão desfavoráveis muito inclinados iniciam separações de escoamento e/ou transição para camadas limite turbulentas. [5]

Esteiras

O rasto de escoamento perturbado, gerado atrás de um corpo que se move através de um fluido anteriormente não perturbado, é chamado esteira. Exemplos típicos de esteiras incluem os vórtices visíveis atrás de aviões quando voam em ar húmido, ou as nuvens de pó que se formam atrás de um camião quando a estrada se encontra suja.

Esta perturbação local no padrão do escoamento atrás de um veículo provoca a perda de quantidade de movimento (ou ganho de arrasto devido à forma), que se estende muito atrás do veículo e é descrito esquematicamente pela Figura 16. Se uma medição de velocidade é efetuada a uma distância razoável à frente do veículo (por exemplo, mais do que um veículo de comprimento), o perfil de velocidades indica uma distribuição de velocidade quase uniforme. Mas, se a mesma medição é efetuada atrás do veículo, mesmo a distâncias relativamente grandes de 10 a 20 comprimentos do veículo, será detetada uma deficiência da velocidade, como mostrado no ponto B. Se o escoamento se separa atrás de um corpo que origina esteira (*bluff body*), então surgirá uma esteira e, no seu interior, o escoamento aparenta ser arrastado atrás do veículo. A energia de arrastar esta esteira resulta em arrasto acrescido. Como o escoamento na esteira se move em direção ao veículo, outro veículo que se mova perto e atrás do primeiro pode usar os efeitos do arrasto deste escoamento separado.

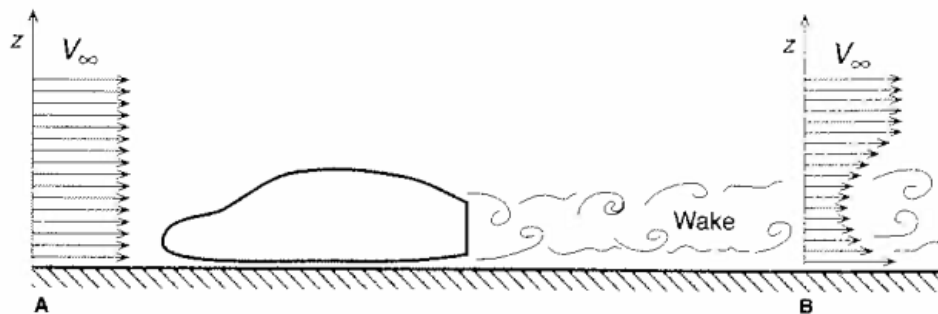


Figura 16 - Esteira atrás de um *bluff body* (com separação de escoamento na zona da base). [5]

Um aspeto importante da esteira é o facto de variar com o tempo, com natureza periódica, como mostrado na Figura 17. [5]

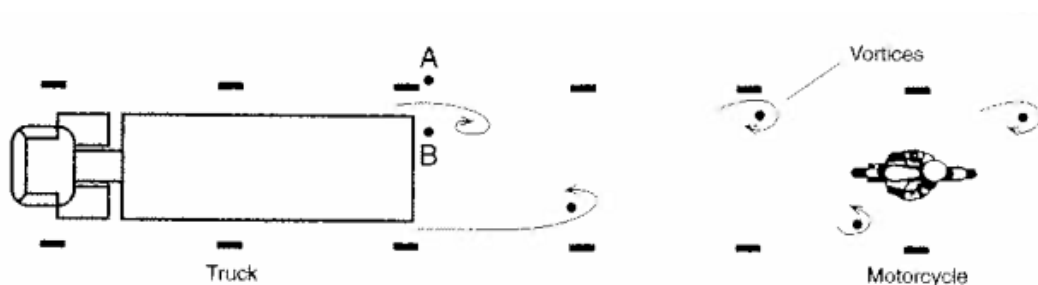


Figura 17 - Descrição esquemática da formação de um vórtice periódico na esteira de um camião. [5]

2.2 Aerodinâmica de automóveis

2.2.1 O impacto da aerodinâmica na forma de um veículo

As cargas aerodinâmicas são significativas e examinam alguns dos termos usados frequentemente quando se fala sobre a aerodinâmica de um veículo em movimento.

Para compreender como as forças aerodinâmicas podem ser criadas, é mostrada na Figura 18 uma secção transversal de uma asa. Assumindo movimento da direita para a esquerda, devido à forma e ângulo desta secção de perfil alar, o ar move-se com maior velocidade na superfície superior do que na superfície inferior. Esta diferença de velocidades cria uma pressão baixa (sucção) na superfície superior e uma pressão maior na superfície inferior. O resultado desta diferença de pressões é a força que sustenta um avião ou um pássaro.

Quando as asas geram sustentação também geram arrasto, que é a força resistente ao movimento. Normalmente, o arrasto é muito menor que a sustentação, e pode ser reduzido através da criação de formas mais esbeltas para o veículo (e tendo uma superfície externa suave). Qualquer melhoria no arrasto de um veículo leva a potenciais melhoramentos na economia de combustível, daí o arrasto ser muito importante para a indústria de automóveis de passageiros.

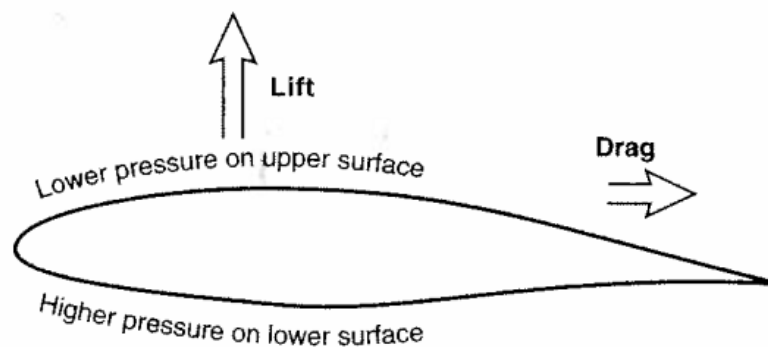


Figura 18 - A pressão mais baixa na parte superior do que na parte inferior deste perfil alar resulta na força de sustentação (*lift*). [5]

O efeito das formas esbeltas na redução do arrasto pode ser demonstrado pelo exemplo da Figura 19. Esta figura mostra a secção transversal de uma vara circular que possui a mesma quantidade de arrasto que um perfil alar muito mais espesso (cerca de 10 vezes) e comprido.

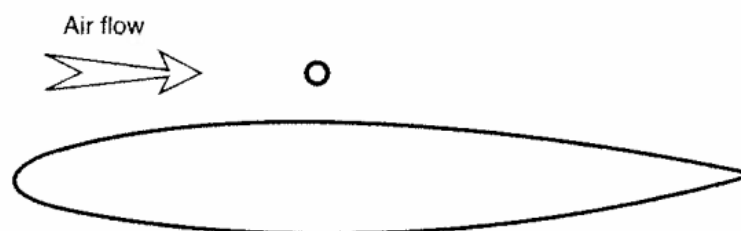


Figura 19 - Cilindro e perfil alar de grandes dimensões com arrasto aerodinâmico idêntico. [5]

O escoamento externo em torno de um veículo é mostrado na Figura 20. Em ar parado, a velocidade imperturbável V_∞ é a velocidade de estrada do carro. Desde que não haja separação de escoamento, os efeitos viscosos no fluido estão restritos a uma camada fina de alguns milímetros de espessura, chamada camada limite. Acima desta camada, o escoamento pode ser considerado como invíscido e a sua pressão é imposta na camada limite. No interior da camada limite, a velocidade decresce do valor do escoamento externo invíscido no limite exterior da camada limite para zero na parede, onde o fluido cumpre uma condição anti-deslizamento. Quando o escoamento se separa (a Figura 20 mostra a separação na parte de trás do carro), a camada limite é dispersada e o escoamento é totalmente definido por efeitos viscosos.

O conceito de camada limite é válido apenas para elevados valores do número de *Reynolds*:

$$Re_l = \frac{V_\infty l}{\nu} > 10^4 \quad (2.15)$$

Onde V_∞ é a velocidade do veículo, ν é a viscosidade cinemática e l o comprimento característico, definido na Figura 20. [2]

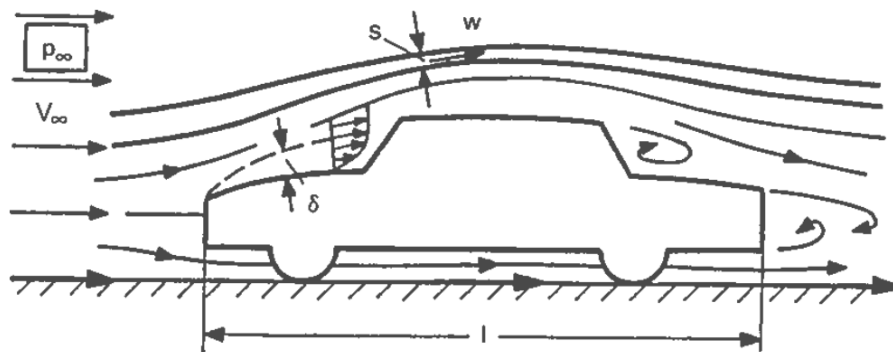


Figura 20 - Escoamento de ar sobre um veículo. [2]

2.2.2 Criação de força descendente

A primeira e mais óbvia abordagem para criar força descendente em vez de sustentação positiva é o uso de asas invertidas. Estas asas podem ser encontradas em todo o espectro da competição automóvel. Na Figura 21 e Figura 22 são mostradas asas frontais e traseiras típicas de um monolugar de competição.

Outra opção é a geração de força descendente através da alteração da forma da carroceria. Os muitos *spoilers*, frontais e traseiros, que aparecem nos automóveis de produção desportivos são uma prova clara deste conceito. Na Figura 23 encontra-se um exemplo de *spoiler* que pode ser observado em vários automóveis. Um desenvolvimento interessante, no esforço para usar a carroceria do veículo para criar benefícios aerodinâmicos, ocorreu quando engenheiros de veículos de competição, no fim dos anos 1970, prestaram atenção ao bem conhecido facto (na comunidade aeronáutica) de que a sustentação de uma asa aumenta com a proximidade ao solo.



Figura 21 - Aplicação típica de uma asa invertida atrás do eixo traseiro (Ferrari F138). [8]



Figura 22 - Asa invertida montada na frente do Ferrari F14 T. [9]



Figura 23 - Spoiler montado na traseira de um veículo de competição. [10]

Este efeito é mostrado na Figura 24, e torna-se notório quando a distância ao solo é menor que o tamanho da corda (corda = distância desde o bordo de ataque até ao bordo de fuga) do perfil alar.

Esta lógica leva a um esforço para usar a carroceria para criar força descendente. Como resultado, o fundo dos veículos de competição tornou-se uma superfície lisa, imitando a forma de uma asa.

Isto levou à criação dos difusores no fundo dos veículos de competição. A Figura 25 mostra como estas condutas são integradas na carroceria. Basicamente, estas duas condutas formam um difusor longitudinal que é inclinado para cima, em direção à traseira do veículo. A similaridade com um perfil alar invertido é visível apenas através da vista lateral, imaginando um corte longitudinal no centro destas condutas. [5]

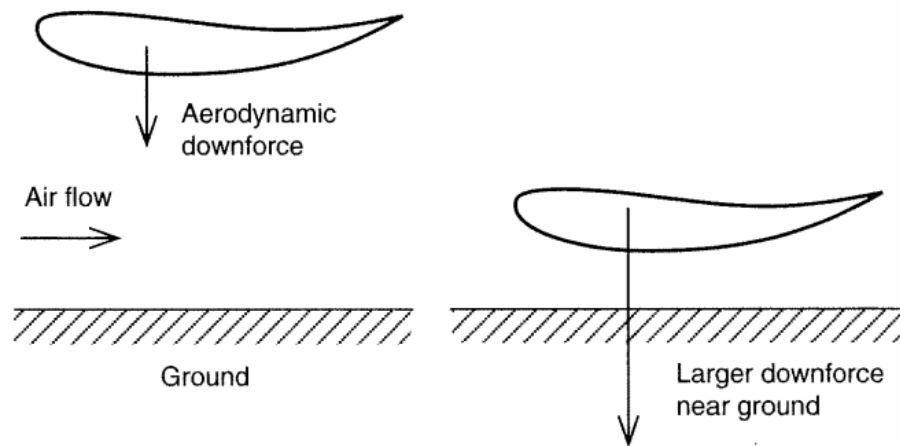


Figura 24 - Descrição esquemática do “efeito de solo” que aumenta a sustentação aerodinâmica de asas quando se situam perto do solo. [5]

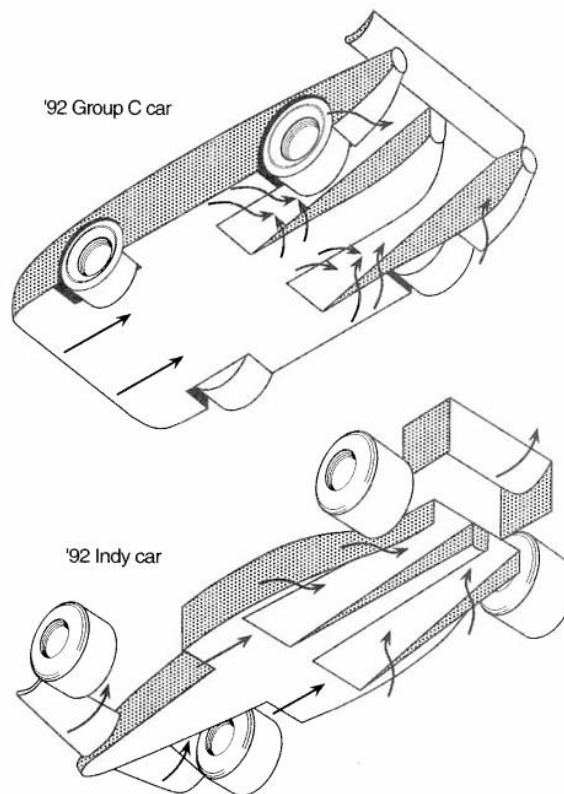


Figura 25 - Conduitas (difusores) situados na base de veículos de competição. [5]

2.2.3 Valores típicos dos coeficientes de arrasto e sustentação

A Figura 26 mostra a gama geral dos coeficientes aerodinâmicos para algumas formas genéricas (assume-se que todas possuem a mesma área frontal, A). A razão para o elevado arrasto da circunferência de espessura igual a zero é a separação do escoamento provocada por esta placa. Aumentando a espessura da placa, o escoamento terá mais comprimento para se ligar atrás do corpo, reduzindo o arrasto, como mostrado pelos dois exemplos seguintes. Modificando (para uma forma mais esbelta) a frente e, especialmente, a secção traseira do cilindro, as separações do escoamento podem ser completamente eliminadas, diminuindo o coeficiente de arrasto para uma gama muito baixa perto de $C_d = 0.04$.

Quando se tenta desenvolver uma forma esbelta para um veículo de estrada, como mostrada pela quinta figura, bloqueia-se a maior parte do escoamento perto do solo e cria-se arrasto nas rodas e, para estas formas genéricas, é possível obter um C_d de cerca de 0.15. Devido à proximidade do solo, o escoamento deixa de ser simétrico e terá velocidade superior (e pressão inferior) perto do tejadilho, que resulta em sustentação positiva. Um automóvel comum terá mais detalhes na carroceria que, por sua vez, causarão separações de escoamento e aumento de arrasto (o valor de 0.43 é representativo de *designs* dos anos 1960-80). Também, a superfície inferior destes veículos está longe de ser suave (o motor, refrigeração e suspensão perturbam o escoamento) e, como consequência, os veículos de passageiros originam mais sustentação (por exemplo, $C_l \approx 0.32$).

A força descendente pode melhorar o desempenho de um veículo de competição e, como tal, os projetistas acrescentam asas para a gerar. O último exemplo na Figura 26 mostra um protótipo genérico de competição. Coeficientes de sustentação na ordem de $C_l = -3.00$ são comuns neste tipo de veículos. O aumento de arrasto nestes veículos é, parcialmente, resultado de arrasto induzido (uma penalização pelo uso de asas finitas de elevada sustentação).

Há três conclusões muito importantes que se podem retirar deste simples conjunto de exemplos:

- Para um corpo esbelto (nº 4), sem separação de escoamento, o efeito das forças de pressão anula-se na direção x . Portanto, o arrasto é apenas resultado do atrito. Assim, através deste simples exemplo, foi possível estimar a ordem de magnitude do efeito do atrito na força de arrasto (ou seja, $C_d = 0.04$).
- Os corpos mais compridos podem possuir coeficientes de arrasto mais baixos (dentro da gama da geometria automóvel).
- A proximidade ao solo pode criar sustentação aerodinâmica (positiva quando o escoamento na parte inferior do veículo é limitado).


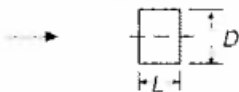
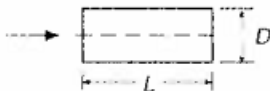
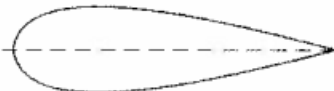
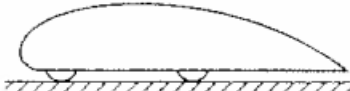

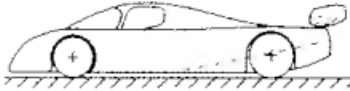
			C_L	C_D
1	Circular plate		0	1.17
2	Circular cylinder $L/D < 1$		0	1.15
3	Circular cylinder $L/D > 2$		0	0.82
4	Low drag body of revolution		0	0.04
5	Low drag vehicle near the ground		0.18	0.15
6	Generic automobile		0.32	0.43
7	Prototype race car		-3.00	0.75

Figura 26 - Coeficientes de arrasto e de sustentação típicos para várias configurações. [5]

Para compreender o efeito da proximidade ao solo, consideram-se os dois corpos genéricos mostrados na Figura 27. No caso do elipsoide simétrico, a diminuição da distância ao solo h provoca a aceleração do escoamento na parte inferior do corpo, criando mais força descendente. O arrasto também aumenta, devido à superior separação de escoamento atrás do elipsoide. Esta tendência é revertida no escoamento sobre o semi-elipsoide porque a redução da distância ao solo tende a bloquear o fluxo sob o corpo (devido às arestas em torno da superfície inferior). [5]

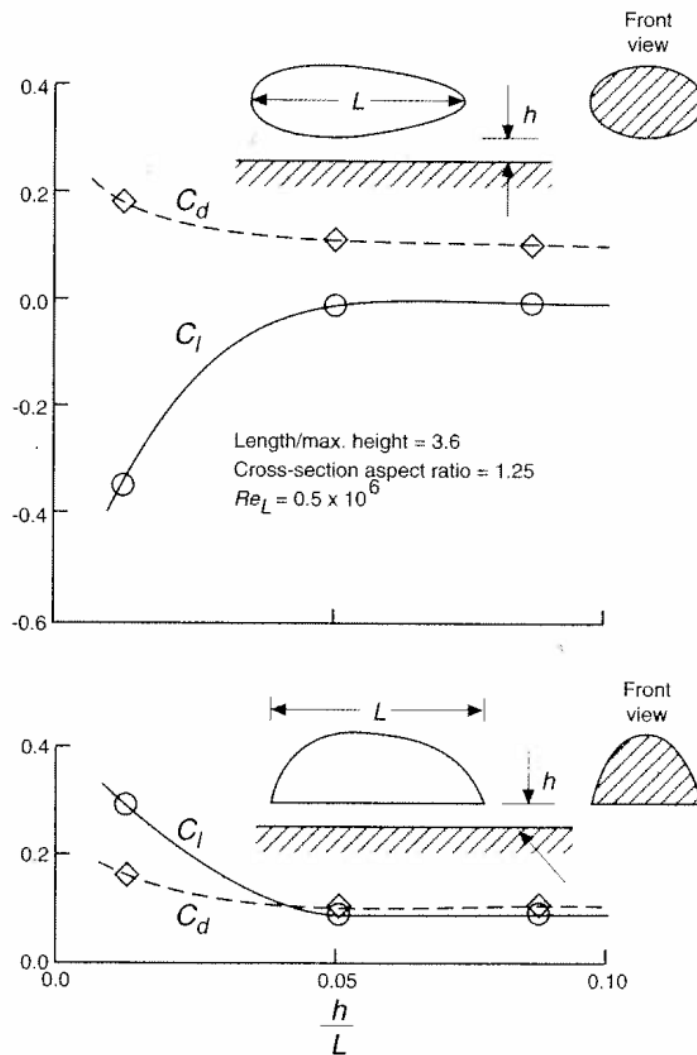


Figura 27 - Efeito da proximidade ao solo na sustentação aerodinâmica de dois elipsóides. [5]

2.2.4 Coeficientes de arrasto e de sustentação de vários veículos de estrada

As formas dos veículos de estrada podem ser divididas em duas categorias aerodinâmicas básicas (baseado na Figura 27). Há projetistas que tentam bloquear o fluxo sob o veículo e outros que tentam colocar ar, o mais possível, sob o veículo. Ambos os estilos conseguem originar baixos coeficientes de arrasto. No entanto, se se procura força descendente, a última abordagem é inevitável.

Na Tabela 2 está uma pequena lista dos coeficientes aerodinâmicos de vários veículos para demonstrar a gama em que se encontram.

Tabela 2 - Coeficientes de arrasto e de sustentação de vários automóveis. [5, 11-13]

	Ano/marca	C_d	C_l
Automóveis de passageiros	1973 Opel Record	0.47	0.36
	1980 Peugeot 305 GL	0.44	0.44
	1986 Subaru XT	0.29-0.31	0.1
	2014 Mercedes-Benz Classe S	0.24	NA
	2013 Ford Focus ST	0.30	NA
Automóveis Desportivos	Porsche 911 Carrera	0.38-0.39	NA
	1982 Camaro Z28	0.37-0.38	NA
	1982 Corvette	0.36-0.38	NA
	2015 Porsche 918 Spyder	0.36	NA
	2012 Caterham 7 CSR	0.65	NA
Automóveis de competição	1991 Mazda GTO (<i>rear wing</i>)	0.48	-0.53
	1990 Mazda GTO (<i>rear deck spoiler</i>)	0.51	-0.44

2.2.5 Fontes de arrasto e de sustentação

As duas tabelas presentes nesta secção mostram a gama das várias fontes de força em termos de aumento dos coeficientes de arrasto e de sustentação (ΔC_d – Tabela 3 e ΔC_l – Tabela 4). Os números aqui citados são muito generalizados e cada classe de veículos terá uma variação diferente das várias fontes listadas.

Tabela 3 - Gama das várias contribuições para o arrasto aerodinâmico de um automóvel. [5]

Local	ΔC_l
1. Atrito	0.04-0.05
2. Arrasto devido à refrigeração	0-0.06
3. Escoamento interno, ventilação	0-0.05
4. Arrasto devido à forma (separações de escoamento)	0-0.45
5. Arrasto devido à sustentação induzida	0-0.60

Já foi estabelecido que a contribuição do atrito (devido às camadas limite) encontra-se na gama de $\Delta C_d = 0.04-0.05$, mas as outras fontes de força de arrasto requerem discussão adicional. O arrasto de refrigeração é o componente criado pela perda de quantidade de movimento do ar de refrigeração ao atravessar os radiadores e as condutas internas. O componente de escoamento interno (compartimento dos passageiros) pode ser muito pequeno mas, com janelas abertas, pode elevar-se a $\Delta C_d = 0.06$.

A maior parte do arrasto nos veículos de estrada é resultado das separações de escoamento, especialmente na secção traseira do veículo (arrasto devido à forma). O valor de zero nesta tabela está apenas relacionado com veículos ideais extremamente esbeltos mas, para a maioria das configurações, este componente do arrasto é responsável por cerca de $\Delta C_d = 0.30$.

O arrasto devido à sustentação induzida é um resultado inerente dos esforços de geração de força descendente. Este é, parcialmente, devido às asas adicionadas, à sustentação da própria carroceria e ao efeito destas asas no escoamento sobre a carroceria (chamado “interação”). Este arrasto aumenta com o aumento da força de sustentação. O valor de $\Delta C_d = 0.60$ aplica-se apenas a veículos com coeficientes de sustentação muito elevados (por exemplo, onde $\Delta C_l \approx -3.00$).

Através da Figura 27, pode-se concluir que a maioria das formas básicas de automóveis terá sustentação positiva na gama de $\Delta C_l = 0.1-0.35$. Através do aprimoramento do escoamento sob o veículo, como o uso de condutas na base, a sustentação pode ser reduzida para cerca de -0.10 . Este primeiro componente é função da forma do veículo e está listada como fonte principal de sustentação na Tabela 4. [5]

Tabela 4 - Gama das várias contribuições para a sustentação aerodinâmica de um automóvel. [5]

Local	ΔC_l
1. Carroceria do veículo	0.35 a -0.10
2. Asas	0 a -2.00
3. Interação asa/carroceria	0 a -2.00

2.2.6 Veículos descapotáveis

Um veículo que apresenta o habitáculo aberto deve possuir as seguintes propriedades:

- Elevado conforto dos passageiros – não deve ocorrer ruído excessivo devido ao vento e o compartimento do passageiro deve estar livre de fortes correntes.
- O aumento do arrasto não deve ser muito acentuado.

Com o habitáculo aberto, o escoamento em torno do carro é alterado consideravelmente em comparação com um veículo semelhante com o habitáculo fechado. O escoamento separa-se na extremidade superior do para-brisas e, dependendo da posição das janelas laterais (abertas ou fechadas), no pilar A (primeiro pilar do para-brisas/tejadilho a contar da frente do automóvel), o resultado é recirculação do fluxo de ar, como esquematizado na Figura 28.

O arrasto de um veículo com o habitáculo aberto aumenta de 15 a 30% em comparação com o arrasto do mesmo veículo com o habitáculo fechado.

O conforto dos passageiros no interior do habitáculo de um veículo descapotável pode ser melhorado com a adição de um defletor de vento, como mostrado na Figura 29. Com isto, a recirculação do fluxo de ar pode ser reduzida quase completamente. A eficácia desta medida pode ser visualizada na Figura 29. Sem defletor de vento (lado direito da figura) o cabelo do ocupante é consideravelmente perturbado pela recirculação. O defletor de vento retém completamente o fluxo revertido, como pode ser concluído a partir do cabelo imperturbado mostrado no lado esquerdo da figura. [2]

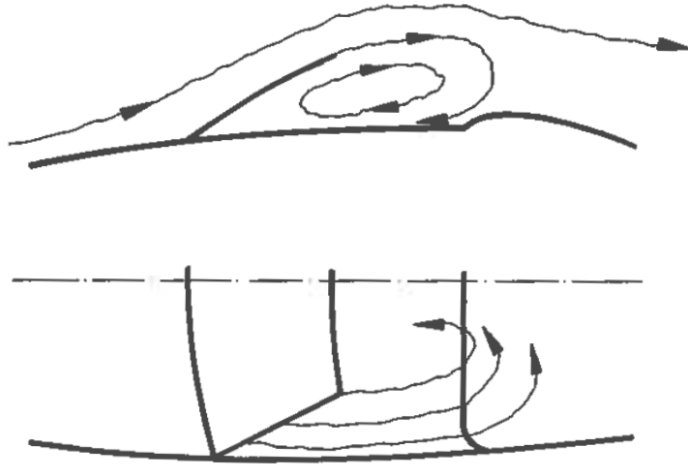


Figura 28 – Regime de escoamento em torno do habitáculo de um veículo descapotável. [2]



Figura 29 – Prevenção da recirculação do fluxo de ar com a adição de um defletor de vento. [2]

2.2.7 Túnel de vento

A medição da performance aerodinâmica é muito importante, visto que a maioria dos projetistas gostaria de ter uma estimativa muito próxima das cargas aerodinâmicas (força descendente e arrasto) antes de o veículo ser construído. A localização mais comum, onde a avaliação aerodinâmica é efetuada, é em sofisticados e dispendiosos túneis de vento, tanto durante o desenvolvimento inicial de novos veículos como durante o constante refinamento de veículos de competição já existentes.

Um túnel de vento (Figura 30) é um longo túnel através do qual o ar é movido por grandes ventiladores. A sua vantagem é que a dispendiosa instrumentação e aquisição de dados é alojada numa infraestrutura permanente (em vez de num veículo em movimento). É também um ambiente controlado onde a velocidade do ar, direção do escoamento, temperatura e outras variáveis não são influenciadas pelo ambiente exterior. São usados traços de fumo para identificar a direção do fluxo de ar e para examinar onde essas linhas se separam da carroceria do veículo. [5]

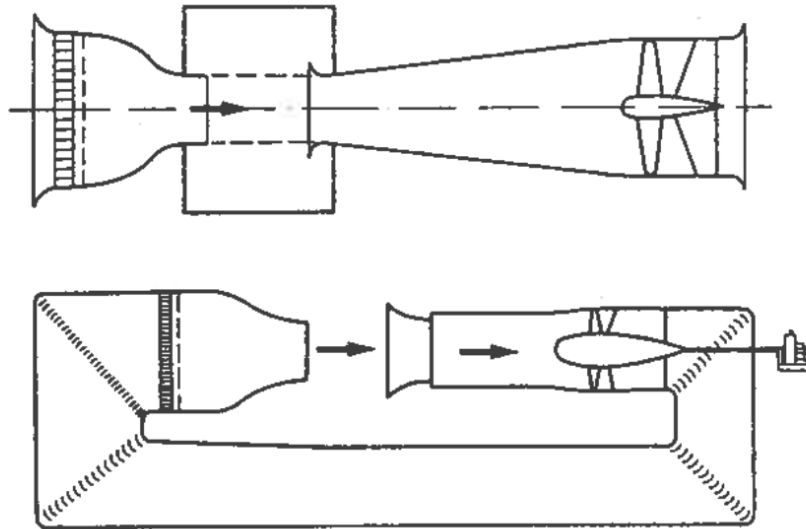


Figura 30 - Túnel de vento com retorno fechado (tipo *Göttingen*) e retorno aberto (tipo *Eiffel*). [2]

Tem de ser realizado muito trabalho de desenvolvimento para produzir todas as características aerodinâmicas e térmicas de um veículo. Muitas das propriedades desejadas podem ser conseguidas modificando apenas a forma exterior. Contudo, a forma de um veículo é fixada muito cedo durante o curso de desenvolvimento, conseqüentemente, o trabalho aerodinâmico tem de começar ainda mais cedo. Devem ser trabalhadas boas propriedades aerodinâmicas no primeiro projeto de um veículo novo, fazendo uso da experiência ou utilizando CFD. A relação entre os resultados obtidos por CFD e os obtidos pelo túnel de vento é por vezes difícil de aferir, existindo na maior parte dos casos uma pequena diferença entre eles. Mas, para o futuro previsível, a experimentação irá ter uma forte influência no desenvolvimento da forma. [2, 3]

De uma forma muito simplificada, o desenvolvimento aerodinâmico é realizado em quatro fases. Começa com um modelo de pequena escala ou em tamanho real. Continuando com um protótipo pronto a conduzir, é depois realizado com veículos de produção e concluído com amostras retiradas da linha de produção, ainda na produção de volume.

Um túnel de vento apenas simula as condições na estrada; não as reproduz exatamente. [2]

2.3 Performance de automóveis

Num automóvel são criadas forças motrizes, de travagem e radiais (devido às curvas), na área de contacto entre o pneu e a estrada. Estas forças de atrito são fortemente afetadas pela força vertical aplicada nos pneus e estão limitadas por um coeficiente de atrito máximo. Por exemplo, pode-se curvar até uma certa velocidade máxima, mas quando se excede essa velocidade o carro irá deslizar. Isto é resultado de se exceder o limite de aderência dos pneus (coeficiente de atrito).

Assim, se há possibilidade de aumentar a força normal no pneu (e atrito máximo) através de o comprimir mais contra a estrada, a força radial será também aumentada sem o risco de deslizar. Uma forma de se conseguir isto é adicionando mais peso ao automóvel. Mas isto não irá funcionar porque um aumento da massa do automóvel vai afetar, proporcionalmente, a sua aceleração lateral (força lateral). Portanto, não haverá melhoria na capacidade de curvar do veículo e, negativamente, este será mais pesado.

Contudo, a força descendente aerodinâmica aumenta a carga nos pneus sem aumentar o peso do veículo. O resultado é uma capacidade superior de curvar sem penalização do peso, o que proporciona a redução dos tempos de volta (em veículos de competição). O aspeto mais interessante da força descendente é que só foi apreciada (descoberta) pela comunidade de engenharia de automóveis de competição na década de 1960.

A Figura 31 mostra o aumento da aceleração máxima em curva dos automóveis de competição, com e sem força descendente, nas últimas décadas. O crescimento gradual, representado pela linha contínua, é o resultado do contínuo melhoramento da tecnologia dos pneus. A linha interrompida representa as tendências de performance dos veículos mais avançados, incluindo veículos de competição de F1, *Indy* e protótipos. O enorme aumento da capacidade de curvar nos anos 1970 é o resultado do uso de asas invertidas. Esta tendência acelerou no fim da década de 1970 com a introdução do princípio de efeito do solo, que usava a carroceria do veículo para criar força descendente adicional. [5]

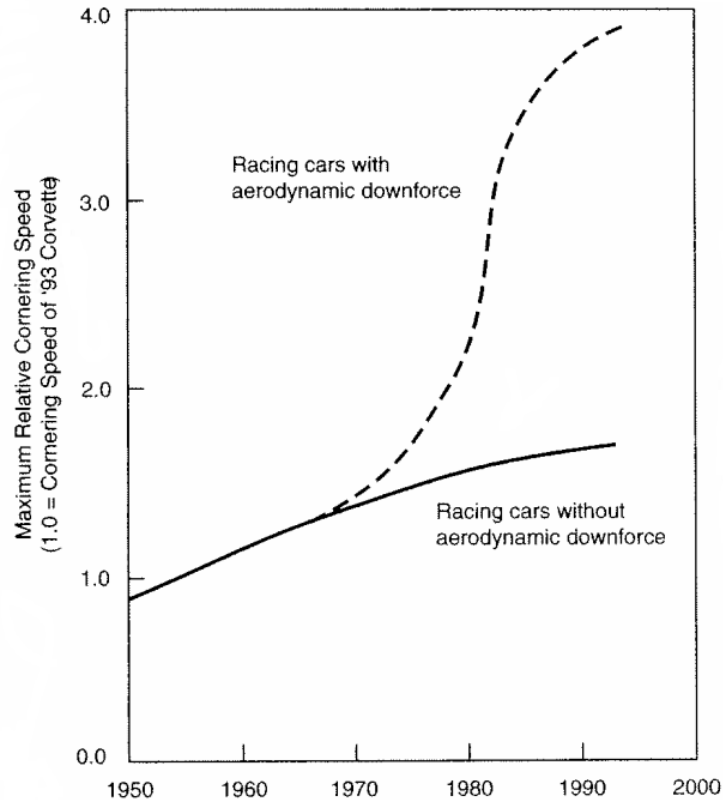


Figura 31 - Diagrama que demonstra o aumento da aceleração curvilínea entre 1950 e 2000. [5]

2.3.1 Resistências ao movimento do veículo

A força que resiste ao movimento e aponta para trás é a de arrasto. A segunda componente de força, que aponta para cima, é de sustentação. Em altas velocidades, é necessário mais esforço para manter o movimento do automóvel em linha reta, sendo esta instabilidade normalmente causada pela força de sustentação, que na maioria dos veículos de passageiros é superior nas rodas traseiras. A terceira força, a força lateral (positiva para a direita), é também importante, mas com níveis relativamente baixos de vento lateral esta componente de força aerodinâmica é normalmente baixa.

Para um automóvel de passageiros ou mesmo um automóvel de competição, o objetivo principal seria a redução do arrasto e da sustentação ou até criar sustentação negativa (*downforce*). [5]

Equação do movimento

De acordo com a Segunda Lei de Newton, a força de tração F_T necessária na interface entre os pneus e a estrada é representada pela seguinte equação:

$$F_T = D + R + m \frac{dV}{dt} + mg \cdot \sin\alpha \quad (2.16)$$

Onde D é a força de arrasto aerodinâmico, R é a resistência ao rolamento, m é a massa do veículo, V é a velocidade de estrada, g é a aceleração gravítica e α é o ângulo de inclinação da

estrada, como mostrado na Figura 32. Os dois últimos termos da equação (2.16) são também chamados resistências. Resistência de aceleração e resistência de inclinação, respetivamente. [2]

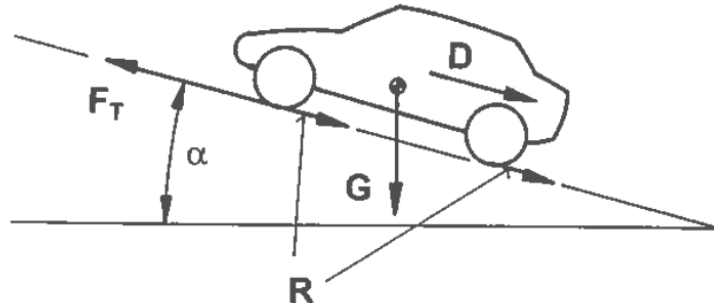


Figura 32 - Definições de peso do veículo G , força de tração F_T , resistência ao rolamento R , arrasto aerodinâmico D e grau de inclinação da estrada α . [2]

Análise das resistências ao movimento

Arrasto aerodinâmico

O arrasto aerodinâmico depende do tamanho do veículo (caracterizado pela sua área frontal A), o coeficiente de arrasto C_d (medida da qualidade do escoamento em torno do veículo) e do quadrado da velocidade V_∞ – ver equação (2.7).

A equação (2.7) é válida para o movimento através de ar parado. [2]

Resistência ao rolamento

A resistência ao rolamento R de um veículo depende da sua massa m e de um coeficiente de resistência ao rolamento f_R , sendo expressa da seguinte forma:

$$R = f_R G \quad (2.17)$$

Onde $G = mg$ é a força que o veículo exerce sobre o solo devido à sua massa m .

O coeficiente de resistência ao rolamento f_R é função das seguintes variáveis: construção e tamanho dos pneus, pressão dos pneus, geometria dos eixos (*caster* e *camber*), velocidade e se as rodas são de tração ou livres. O f_R deve ser determinado experimentalmente, encontrando-se um resultado típico na Figura 33. [2]

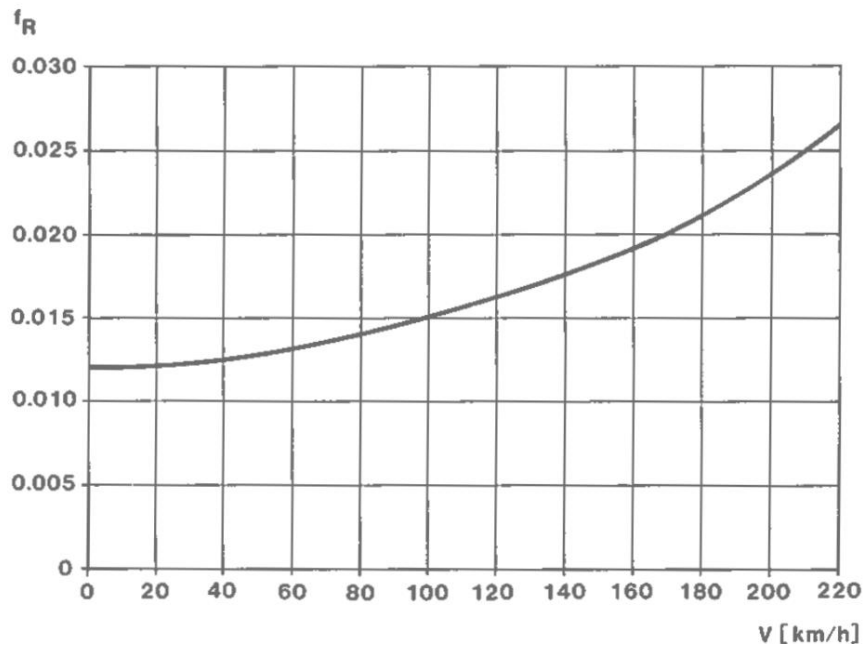


Figura 33 - Variação típica do coeficiente de resistência ao rolamento dos pneus f_R versus velocidade de estrada V . [2]

Diagrama de tração

A performance de um carro pode ser descrita por um diagrama tração-força. Na Figura 34 é mostrado um exemplo típico de um carro europeu de classe média. No canto superior direito estão compilados dados fundamentais do carro e a transmissão é manual de cinco velocidades. A força de tração F_T é representada em função da velocidade de estrada V . As linhas de potência de tração constante são hipérbolas. As curvas de carga na estrada – em princípio parábolas de segunda ordem – são desenhadas para vários graus. As linhas espessas são curvas de motor WOT (*wide open throttle*) – plena carga – em todas as cinco velocidades. Para qualquer ponto na curva de carga na estrada, a força de tração excedente ΔF_T disponível em cada velocidade para aceleração e subidas é a distância vertical à curva de motor WOT nessa velocidade.

Por exemplo, o seguinte pode ser retirado do diagrama: com uma potência de tração de 80 kW percorrendo uma estrada nivelada (0% de inclinação), a velocidade máxima do carro em consideração é aproximadamente 200 km/h, na quinta velocidade. Para uma inclinação de 5%, a velocidade máxima é reduzida para aproximadamente 160 km/h, usando a quarta velocidade.

No diagrama acessório desenhado na parte inferior da figura, a velocidade do motor em rpm é representada em função da velocidade de estrada V ; as linhas retas identificam as cinco velocidades da transmissão manual. Em transmissões automáticas com conversor de binário, as curvas para cada velocidade não são lineares. [2]

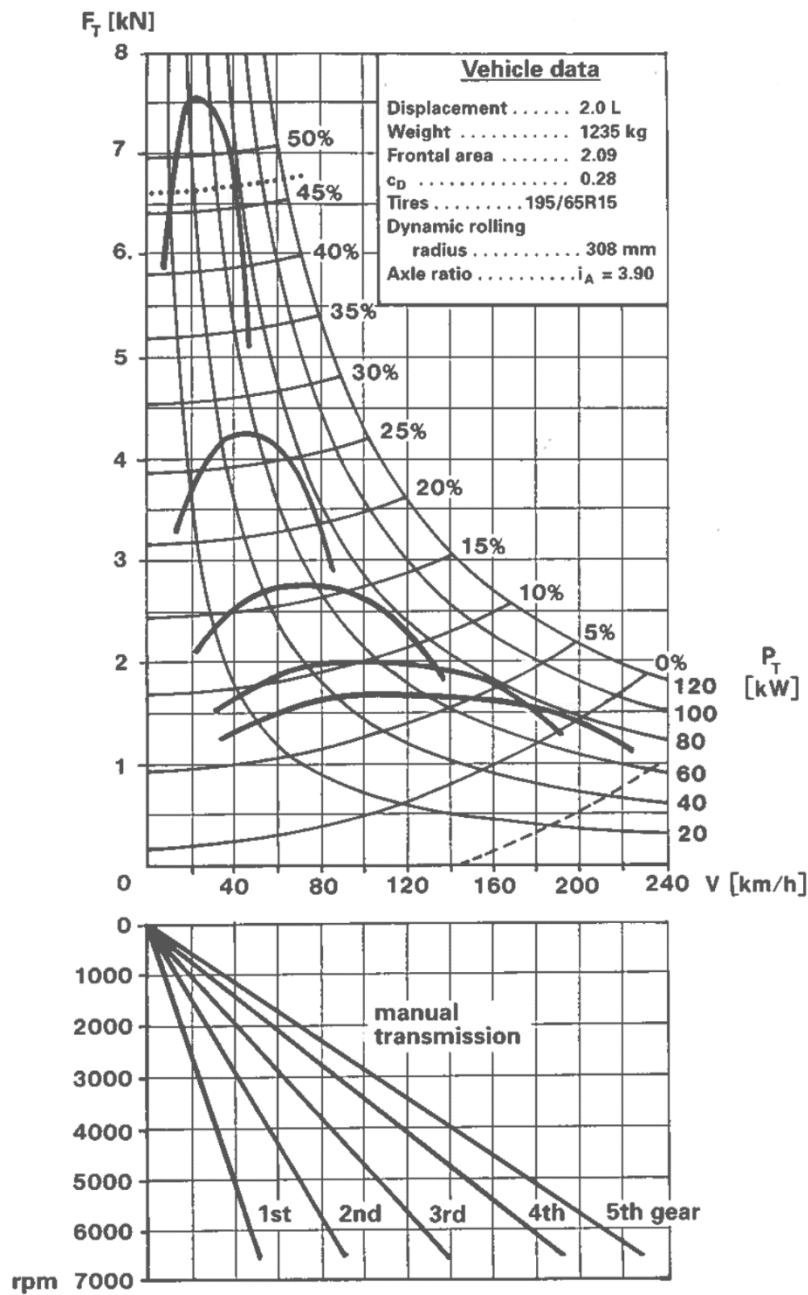


Figura 34 – Diagrama típico tração-força de um automóvel de passageiros, com um diagrama de velocidade do motor. [2]

Velocidade máxima

A velocidade máxima pode ser calculada a partir da força de tração F_T e da potência máxima do motor que atinge as rodas $P_{b, nom}$. Geralmente, a seguinte equação é válida para a potência de tração:

$$P_T = F_T V \tag{2.18}$$

No ponto de máxima velocidade, torna-se:

$$V_{m\acute{a}x} = P_{T,V\ m\acute{a}x} / F_{T,V\ m\acute{a}x} \quad (2.19)$$

A eficiência do sistema de transmissão entre a entrada da transmissão e a superfície de contacto dos pneus das rodas motrizes retira-se da seguinte fórmula:

$$\eta_D = \frac{P_T}{P_{b,T}} \quad (2.20)$$

Onde $P_{b,T}$ é a potência do motor, usada para fornecer tração (não inclui a potência do motor $P_{b,A}$ requerida para mover os acessórios do veículo). Usando a equação (2.20) na equação (2.19), vem:

$$V_{m\acute{a}x} = \frac{\eta_D (P_{b,T})_{V\ m\acute{a}x}}{F_{T,V\ m\acute{a}x}} \quad (2.21)$$

Pode ser obtida uma aproximação rápida desta relação com a seguinte fórmula:

$$V_{m\acute{a}x} = 100 \cdot \sqrt[3]{\frac{P_{b,nom}}{k C_d A}} \quad (2.22)$$

Onde $P_{b,nom}$ é a potência máxima anunciada do motor em kW e a velocidade do veículo $V_{m\acute{a}x}$ é em km/h. A constante k depende do veículo e, implicitamente, conta para vários fatores (por exemplo, η_D ; $P_{b,nom}$ diferente de $P_{b,V\ m\acute{a}x}$; $P_{b,V\ m\acute{a}x}$ diferente de $P_{b,m\acute{a}x}$; massa do veículo; etc.). São valores típicos $14 < k < 18$. [2]

2.4 Conceitos teóricos do processamento de CFD

Nas seguintes secções vão ser apresentados os conceitos referentes aos parâmetros de funcionamento do *software* usado na realização deste trabalho (ANSYS *Fluent*).

2.4.1 Modelação do escoamento de um fluido

Para todos os escoamentos, os programas de análise CFD (no caso deste trabalho o ANSYS *Fluent*), usam o método do volume de controlo para o processamento dos problemas de mecânica dos fluidos, resolvendo as equações da conservação da massa e da quantidade de movimento. Estas equações (2.24), (2.25), (2.26) e (2.27), descrevem matematicamente um escoamento em regime permanente e incompressível de um fluido Newtoniano. [6, 14]

Equação da conservação da massa

A equação diferencial da conservação da massa, ou equação da continuidade, para um escoamento tridimensional, pode ser escrita da seguinte forma: [1, 6, 7]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.23)$$

Onde ρ é a densidade do ar, u , v e w são os componentes da velocidade segundo x , y e z respetivamente. Para escoamentos externos, em regime permanente e incompressíveis (escoamentos analisados neste trabalho), a equação (2.23) pode ser escrita da seguinte forma: [1, 6, 7]

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.24)$$

Equações da conservação da quantidade de movimento

As equações da conservação da quantidade de movimento (equações de *Navier-Stokes*), para um escoamento tridimensional, nas direções x , y e z , respetivamente: [1, 6, 7]

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.25)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.26)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.27)$$

Onde u , v , w são os componentes x , y e z da velocidade. Os termos do lado esquerdo são de aceleração e os do lado direito são de força. As equações de *Navier-Stokes* são as equações diferenciais básicas que descrevem o escoamento de fluidos Newtonianos.

2.4.2 Modelação de turbulência

Modelos *k-épsilon* ($k-\epsilon$)

Os modelos de duas equações são os modelos de turbulência mais usados no CFD industrial devido à robustez, economia e boa precisão com que resolvem uma grande gama de escoamentos turbulentos. Resolvem duas equações de transporte e modelam a Tensão de *Reynolds* usando a abordagem da Viscosidade Turbulenta (*Eddy Viscosity*). [15]

Modelo *K-épsilon* Realizável

Este modelo de turbulência foi concebido para resolver as deficiências dos modelos *k-épsilon* tradicionais, através da adoção das seguintes características:

- Uma nova fórmula para a viscosidade turbulenta, originalmente proposta por *Reynolds*.
- Uma nova equação do modelo para a dissipação baseada na equação dinâmica da flutuação da vorticidade quadrática média.

O termo “realizável” significa que o modelo satisfaz certas restrições matemáticas nas tensões de *Reynolds*, consistentes com a física de escoamentos turbulentos.

As aplicações industriais deste modelo mostram que é possível atingir bons resultados em termos de valores integrais (por exemplo, coeficiente de arrasto). Este modelo é muito estável e de rápida convergência. [3, 14]

Modelos da tensão de *Reynolds* (*RSM – Reynolds Stress Models*)

Os modelos da tensão de *Reynolds* (*RSM*) incluem vários efeitos que não são facilmente manipulados pelos modelos da viscosidade turbulenta. O efeito mais importante é a estabilização da turbulência devido à forte rotação e curvatura das linhas de corrente. O uso deste modelo, geralmente, não é recomendado e deve ser restrito aos escoamentos para os quais a sua superioridade foi estabelecida, especialmente escoamentos com forte turbulência e rotação. [5]

O modelo da Tensão de *Reynolds* define rigorosamente a anisotropia da turbulência e o transporte de todas as Tensões de *Reynolds*. Estas vantagens são acompanhadas por um elevado tempo computacional (+40%) e uso da memória RAM (+20%). [3]

2.4.3 Tratamentos da região de parede

Os escoamentos turbulentos são significativamente afetados pela presença de paredes. O campo de velocidades médio é afetado através da condição anti-deslizamento que tem de ser satisfeita na parede. Junto à parede, o amortecimento viscoso reduz as flutuações da velocidade tangente, enquanto o bloqueio cinemático reduz as flutuações da velocidade normal. Na parte externa da região próxima da parede, a turbulência é rapidamente aumentada pela produção de energia cinética de turbulência devido aos grandes gradientes na velocidade média.

A modelação de parede tem um impacto significativo na fiabilidade das soluções numéricas, na medida em que as paredes são a principal fonte de vorticidade e turbulência média. As variáveis da solução apresentam grandes gradientes na região próxima da parede, onde a quantidade de

movimento ocorre mais vigorosamente. Portanto, uma representação precisa do escoamento na região próxima da parede determina previsões bem-sucedidas de escoamentos turbulentos limitados por paredes.

Várias experiências mostraram que a região próxima da parede pode ser subdividida em três camadas. Na camada mais interna, chamada “subcamada viscosa”, o escoamento é praticamente laminar e a viscosidade molecular representa um papel dominante na quantidade de movimento e na transferência de massa. Na camada externa, chamada camada totalmente turbulenta, a turbulência representa um papel importante. Finalmente, há uma região de transição entre a subcamada viscosa e a camada totalmente turbulenta onde os efeitos da viscosidade molecular e da turbulência apresentam a mesma importância. A Figura 35 ilustra as três camadas referidas.

Na figura, u_τ é a velocidade de atrito e y^+ é a distância adimensional à parede. Estas variáveis podem ser representadas pelas equações (2.28) e (2.29).

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \tag{2.28}$$

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau y}{\mu} \tag{2.29}$$

Onde τ_w é a tensão de corte na parede, ρ a densidade do fluido, y é a distância à parede mais próxima e μ é a viscosidade dinâmica do fluido. [14]

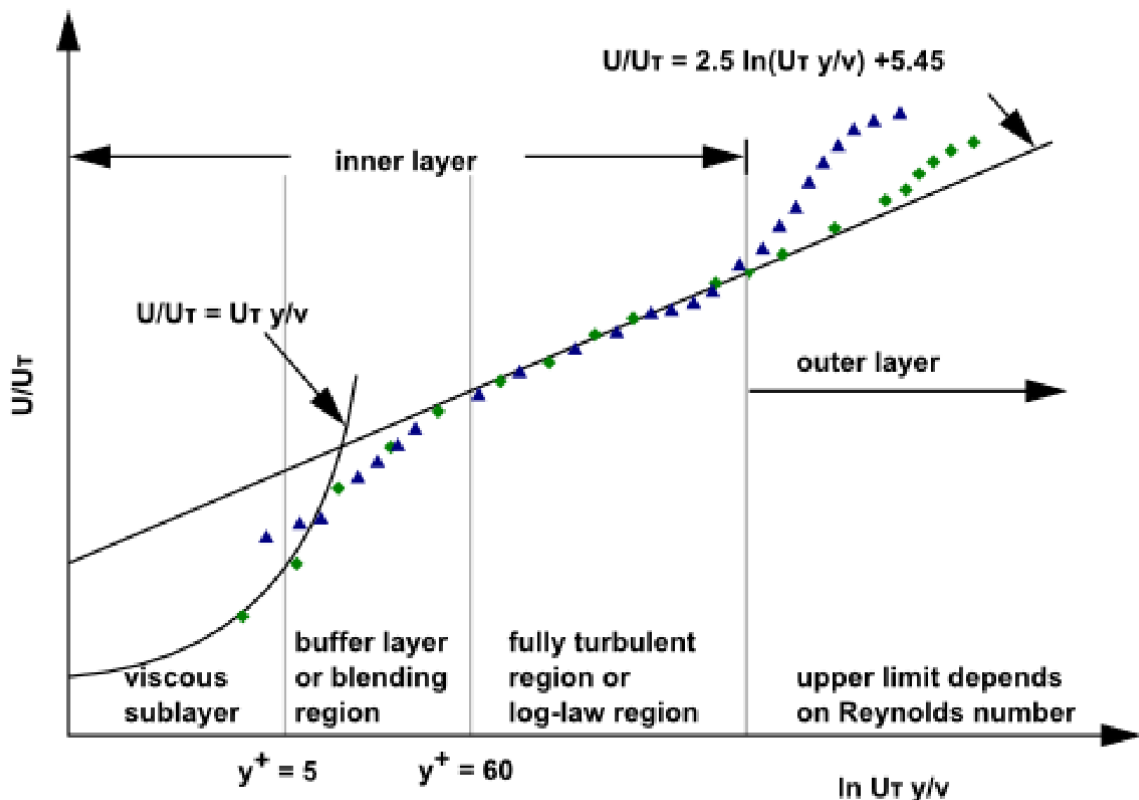


Figura 35 - Subdivisões da região próxima da parede. [14]

Funções de parede e modelo da região próxima da parede

Existem duas abordagens para modelar a região próxima da parede. Na primeira abordagem, a região interna afetada pela viscosidade (subcamada viscosa e região combinada – *blending region*) não é resolvida. Alternativamente, são usadas fórmulas semiempíricas chamadas “funções de parede” para preencher a região afetada pela viscosidade entre a parede e a região totalmente turbulenta.

Na segunda abordagem, os modelos de turbulência são modificados para permitir que a região afetada pela viscosidade seja resolvida com uma malha até à parede, incluindo a subcamada viscosa. Estas duas abordagens estão retratadas na Figura 36, respetivamente. [14]

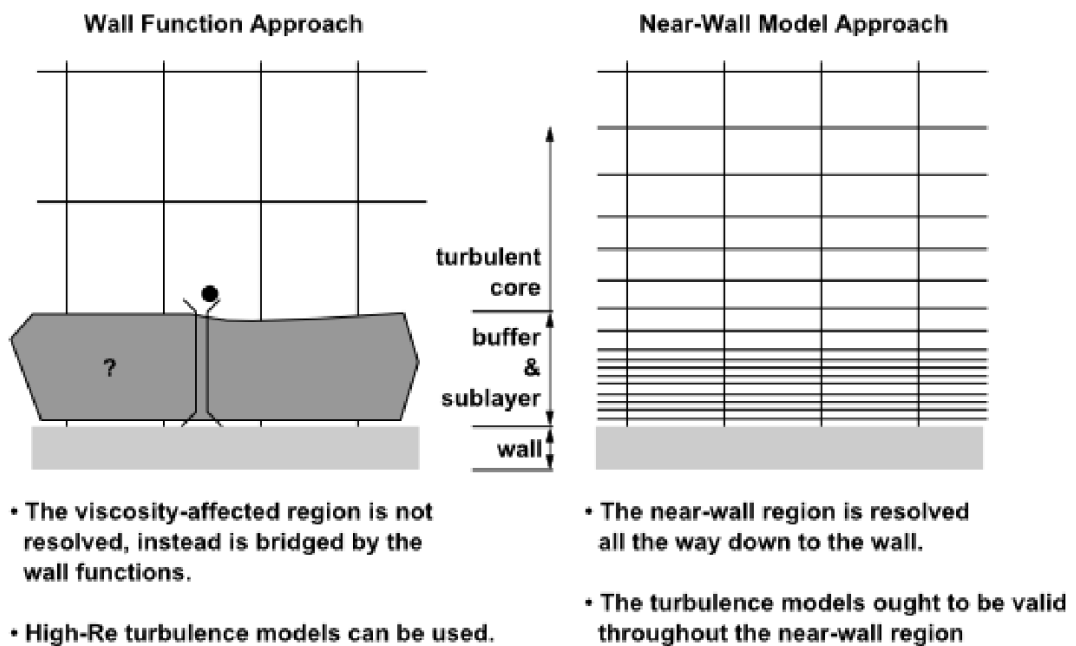


Figura 36 - Tratamentos da região próxima da parede no ANSYS Fluent. [14]

Em escoamentos com elevado Número de *Reynolds*, como em torno de veículos terrestres, resolver da região próxima parede é muito complexo. Por isso, são usadas funções de paredes semiempíricas. Para ultrapassar as limitações das funções de parede tradicionais, devem-se usar as funções de parede não-equilíbrio (*Non-Equilibrium Wall Functions - NWF*), referidas anteriormente.

Em comparação com as funções de parede tradicionais, as NWF fornecem previsões mais realísticas do comportamento das camadas limite turbulentas, incluindo separações de escoamento. [3]

2.4.4 Discretização

Discretização numérica

As equações que regem o movimento dos fluidos são equações diferenciais parciais. A transformação de uma equação diferencial parcial na sua análoga numérica é efetuada pelo processo de discretização numérica. Podem ser usadas varias técnicas para realizar a

discretização numérica e, sendo cada uma baseada em diferentes princípios, existem vários fatores comuns nos métodos que estas usam. [4]

O ANSYS *Fluent* usa o método dos volumes finitos e o método dos elementos finitos, como técnicas de discretização numérica. O método usado depende da malha de elementos, sendo mais comum o método dos volumes finitos. [15]

Método dos elementos finitos

Neste método, o domínio sobre o qual as equações diferenciais parciais se aplicam é dividido num número finito de subdomínios conhecidos como elementos. [4]

Método dos volumes finitos

Este método de discretização é o mais usado em CFD. As equações diferenciais parciais são convertidas na forma numérica através de uma transformação de base física das equações. Por exemplo, as equações de quantidade de movimento podem ser consideradas como uma série de fluxos para um volume de fluido, em conjunto com um termo de origem, que é o gradiente de pressão. [4]

Discretização espacial

Os gradientes são necessários para a construção de valores de um escalar nas faces das células e, também, para o cálculo de termos de difusão secundários e derivadas de velocidade. O gradiente $\nabla\phi$ de uma dada variável ϕ é usado para discretizar os termos de difusão e de convecção nas equações de conservação de escoamento.

Os três gradientes disponíveis no ANSYS *Fluent* são *Green-Gauss Cell Based*, *Green-Gauss Node Based* e *Least Squares Cell Based*. [15]

O ANSYS *Fluent* armazena valores discretos do escalar ϕ no centro das células. Os valores das faces ϕ_f são necessários para os termos de convecção e devem ser interpolados a partir do centro da célula. [14]

Esquema *First-Order Upwind*

Neste esquema de primeira ordem de precisão, as quantidades nas faces das células são determinadas assumindo que os valores dos centros das células de qualquer variável de campo representam um valor médio e se mantém ao longo de toda a célula. As quantidades da face são idênticas às quantidades da célula. Assim, usando este esquema, o valor da face ϕ_f é definido igual ao valor ϕ do centro da célula, na célula a montante. Este esquema é viável quando o escoamento é alinhado com a malha. Caso contrário, é recomendado o uso do esquema *second-order upwind*. [14, 15]

Esquema *Power-Law*

Este esquema interpola o valor da face de uma variável ϕ usando a solução exata para uma equação de convecção-difusão, unidimensional. Este esquema, normalmente, possui a mesma precisão que o esquema *first-order upwind*. [14, 15]

Esquema *Second-Order Upwind*

No esquema de segunda ordem de precisão, as quantidades nas faces das células são calculadas através de uma abordagem de reconstrução linear multidimensional. Nesta abordagem, é

alcançada uma precisão de ordem superior nas faces da célula, através de uma expansão em série de *Taylor* da solução no centro da célula em torno do seu centróide. Assim, o valor da face ϕ_f é calculado através da seguinte equação:

$$\phi_{f,SOU} = \phi + \nabla\phi \cdot \vec{r} \quad (2.30)$$

Onde ϕ e $\nabla\phi$ são o valor no centro da célula e o seu gradiente na célula a montante, respetivamente; \vec{r} é o vetor do deslocamento que vai do centróide da célula a montante ao centróide da face. [14]

Este esquema é recomendado quando o escoamento não é alinhado com a malha (quando atravessa as linhas da malha obliquamente). Desta forma, diminui-se o erro de discretização numérica, que seria superior com o esquema de primeira ordem. [15]

Combinado *First-to-Higher Order*

Em certos casos e em certas condições de escoamento, pode não ser possível a obtenção de uma solução convergida, para regime permanente, através do uso de esquemas de discretização de ordem superior devido às flutuações de escoamento locais (físicas ou numéricas). Por outro lado, pode ser possível uma solução convergida para as mesmas condições de escoamento com um esquema de discretização de primeira ordem. Para este tipo de escoamento e situação, se é desejada uma solução melhor do que com precisão de primeira ordem, então o esquema combinado *first-to-higher-order* (de primeira ordem para ordem superior) pode obter uma solução convergida em regime permanente. [14]

Esquema *Central-Differencing*

Este esquema de diferenciação central está disponível para as equações da quantidade de movimento quando se usa o modelo de turbulência LES, fornecendo maior precisão nos cálculos deste. [14]

Esquema *Central-Differencing* delimitado

Esquema composto que reduz as oscilações não-físicas nos campos da solução. É composto por um esquema de diferenciação central puro, por um esquema combinado de diferenciação central com o esquema de segunda de precisão e pelo esquema de primeira ordem de precisão. [14]

Esquema QUICK (*Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinetics*)

Esquema para malhas quadriláteras e hexaédricas, onde faces e células únicas, a montante e a jusante, podem ser encontradas. O ANSYS *Fluent* também fornece o esquema QUICK para o cálculo de um valor de ordem superior da variável de convecção ϕ na face. Os esquemas do tipo QUICK são baseados numa média ponderada de segunda ordem de precisão e interpolações centrais da variável. [14]

Esquema *Third-Order MUSCL*

Este esquema de convecção de terceira ordem foi concebido a partir do MUSCL original (*Monotone Upstream-Centered Schemes for Conservation Laws*), combinando um esquema *central-differencing* e um esquema de segunda ordem de precisão. [14]

3 Metodologia Usada no Processamento das Simulações CFD

Neste capítulo vai ser definida a metodologia a adotar para a realização das simulações. Vão ser determinados os parâmetros de cálculo e das malhas de elementos.

Para usar CFD durante o ciclo de desenvolvimento é necessária uma abordagem fiável e simples, que possibilite a comparação de resultados entre diferentes veículos e entre várias modificações alternativas do mesmo veículo. [3]

3.1 Preparação do modelo CAD

3.1.1 Geometria do veículo

A malha de superfície deve ser o mais suave possível para permitir a extrusão de camadas prismáticas a partir da superfície do automóvel. Devem ser evitados ângulos muito agudos, como *spoilers* e os ângulos entre as rodas e o solo. Isto é uma fonte de células altamente distorcidas (*skewed cells*). É necessário introduzir pequenas superfícies que ligam as rodas e o solo para neutralizar estes ângulos (Figura 37), facilitando a geração da malha. [3]

Foram também fundidas as arestas e as superfícies mais pequenas para simplificação do modelo CAD assim como adicionada uma secante no local de contacto da roda com a estrada. Refira-se que este processo de tratamento do modelo 3D foi muito demorado devido às incompatibilidades que os programas encontraram.

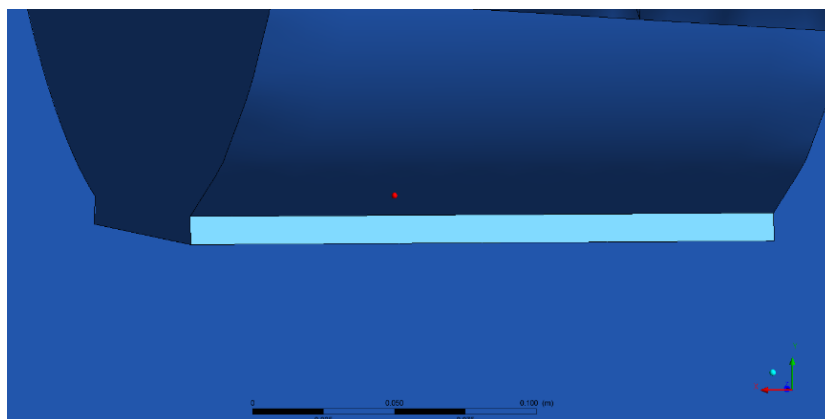


Figura 37 - Superfície criada no modelo 3D para eliminar ângulo entre a roda e o solo (imagem gerada com o ANSYS *Design Modeler*).

3.1.2 Domínio computacional (túnel de vento)

As dimensões do domínio computacional devem ser de, pelo menos, três comprimentos do veículo para a frente e cinco comprimentos para trás. A área do automóvel não deve ser superior a 1-1.5% da área de secção total. De forma a controlar a malha de volume junto ao veículo, é aconselhável uma caixa interior. [3]

Foram criadas três caixas para controlo do tamanho dos elementos junto à carroceria. As dimensões das caixas podem ser verificadas na Figura 38. O domínio contém apenas metade da carroceria devido à sua simetria, significando que apenas se calcula uma metade, das duas simétricas, do domínio total.

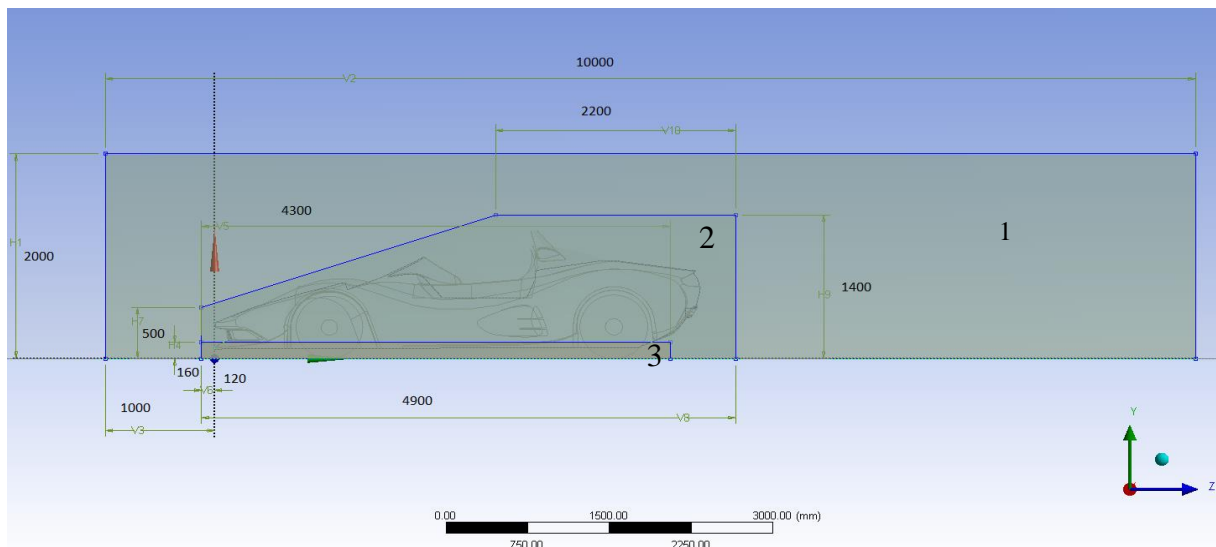


Figura 38 - Ilustração das caixas criadas para controlo do tamanho dos elementos em volta do veículo.

O tamanho dos elementos atribuídos a cada caixa, assim como a largura, estão presentes na Tabela 5. De notar que foi usado um tamanho de 18 mm para a caixa 3 na malha para a simulação em que o carro apresenta uma distância ao solo superior à frente. Nas restantes foi usado um tamanho de 15 mm. Foram também usados outros tamanhos para o estudo da variação dos resultados com o número de elementos, que serão apresentados no próximo capítulo.

Tabela 5 - Largura das caixas e tamanho dos elementos usado para cada uma.

Caixa	Largura [mm]	Tamanho dos elementos [mm]
1	1600	41
2	1100	22
3	1100	15/18

3.2 Geração da malha de elementos

A resolução da superfície triangular facetada deve cumprir vários requerimentos. Em situações de escoamento sobre um automóvel, o arrasto por pressão é dominante perante o arrasto por atrito. Portanto, a precisão das previsões do arrasto e sustentação é fortemente determinada pela precisão da distribuição da pressão estática prevista no corpo. Esta distribuição de pressão é fortemente afetada pelos locais de separação e ligação do escoamento. Assim, é importante que a malha de superfície resolva todos os detalhes relevantes da geometria e satisfaça os requerimentos dos modelos físicos usados na simulação.

Para escoamentos com elevado número de *Reynolds*, tais como os escoamentos em torno de veículos, resolver a região próxima da parede através de uma subcamada viscosa não é uma opção prática porque o número de elementos que deve ser alocado para esse efeito é proibitivamente grande. Para ultrapassar as desvantagens das funções de parede tradicionais, o *Fluent* oferece a possibilidade de usar as chamadas funções de parede não-equilíbrio. As NWF estão sensibilizadas para os efeitos do gradiente de pressão. Esta funcionalidade é um grande benefício para previsão da aerodinâmica de um veículo terrestre. Além da sensibilidade ao gradiente de pressão, as NWF representam os efeitos da variação da espessura local da subcamada viscosa, quando calculam o valor da energia cinética turbulenta em elementos de parede adjacentes.

O primeiro passo no procedimento normal é calcular um tamanho médio dos elementos de superfície, através de valores desejados de y^+ . Este tamanho será, mais tarde, atribuído a todas as extremidades do veículo para alcançar uma distribuição inicial da malha de superfície. [3]

3.2.1 Estratégias para geração de uma malha de elementos

Geralmente, existem três estratégias diferentes para a criação da malha de volume no ANSYS *Fluent*:

- Estratégia A (adaptação)
- Estratégia B (*boxes* – caixas)
- Estratégia C (controles)

A estratégia A usa a funcionalidade de adaptação no *solver* do *Fluent*. Usa-se uma malha relativamente grossa no início como ponto de partida, calculando-se uma primeira solução. Para completar a simulação, são necessárias várias adaptações do gradiente de pressão estática. Em cada ciclo de adaptação, cerca de 1-3% do número total de elementos deve ser refinado.

A estratégia B baseia-se em caixas internas criadas em torno do veículo e da região da esteira para controlar explicitamente o tamanho da malha. É aplicado um tamanho de elementos constante nas superfícies de cada caixa. Este processo consome mais tempo do que o da estratégia A.

Na realização deste trabalho foi usada a estratégia C, onde as caixas internas da estratégia B são substituídas por caixas virtuais (caixas de refinamento local) para o refinamento dos elementos. Esta abordagem é muito precisa e evita a criação de superfícies adicionais. Esta estratégia é recomendada pela ANSYS. [3]

3.2.2 Geração de uma malha de superfície

O primeiro passo para a criação de uma malha de superfície é a imposição de um tamanho médio dos elementos para a totalidade da geometria do veículo. Isto possibilita a identificação dos locais onde as simplificações geométricas têm de ser aplicadas ou onde é necessário um maior grau de resolução da malha para capturar todos os detalhes. Deve-se controlar a qualidade geral (distorção das células - *skewness*) da malha de superfície para localizar problemas causados pelos detalhes geométricos, como aberturas estreitas ou ângulos muito agudos. Este problema pode ser resolvido através da fusão de superfícies ou manter certas áreas do detalhe e fundir a superfícies que formam o ângulo.

No próximo passo tem de se garantir que a malha é capaz de representar a forma dos objetos. Isto é essencial para as zonas situadas perto dos pontos de estagnação, (para-choques frontal, rodas, etc) e na traseira do carro, para descrever a separação com precisão.

A malha de superfície deve ser triangular não uniforme e de elevada qualidade, que resolva todos os detalhes geométricos e radiais.

3.2.3 Geração de uma malha de volume

A geração de uma malha de volume consiste em dois passos principais. É adequada, para formas reais de veículos industriais, uma abordagem híbrida para a criação da malha usando todos os elementos disponíveis no ANSYS *Fluent*. Para assegurar elementos com baixa distorção, onde os efeitos da viscosidade são grandes, são extraídos elementos prismáticos da superfície do carro, como primeiro passo. De seguida, o resto do domínio é preenchido com elementos hexaedros ou tetraédricos.

Camadas Prismáticas

Os elementos em camadas fornecem um bom alinhamento com o escoamento junto às fronteiras de parede. Isto é benéfico para a redução da difusão numérica. As camadas prismáticas são extraídas da base do túnel de vento (estrada) e das superfícies do carro (exceto as superfícies mais complexas).

É recomendada uma extrusão por razão de aspeto (*aspect ratio*) para todas as camadas prismáticas do veículo. Isto define a altura de cada prisma, proporcional ao tamanho do seu triângulo de base.

A Figura 39 mostra as camadas de prismas usadas na criação das malhas e os elementos tetraédricos. Estes prismas foram extraídos com uma razão de primeiro aspeto (*first aspect ratio*) igual a 5, uma taxa de crescimento de 20% e em cinco camadas. A transição para elementos tetraédricos é suave. [3]

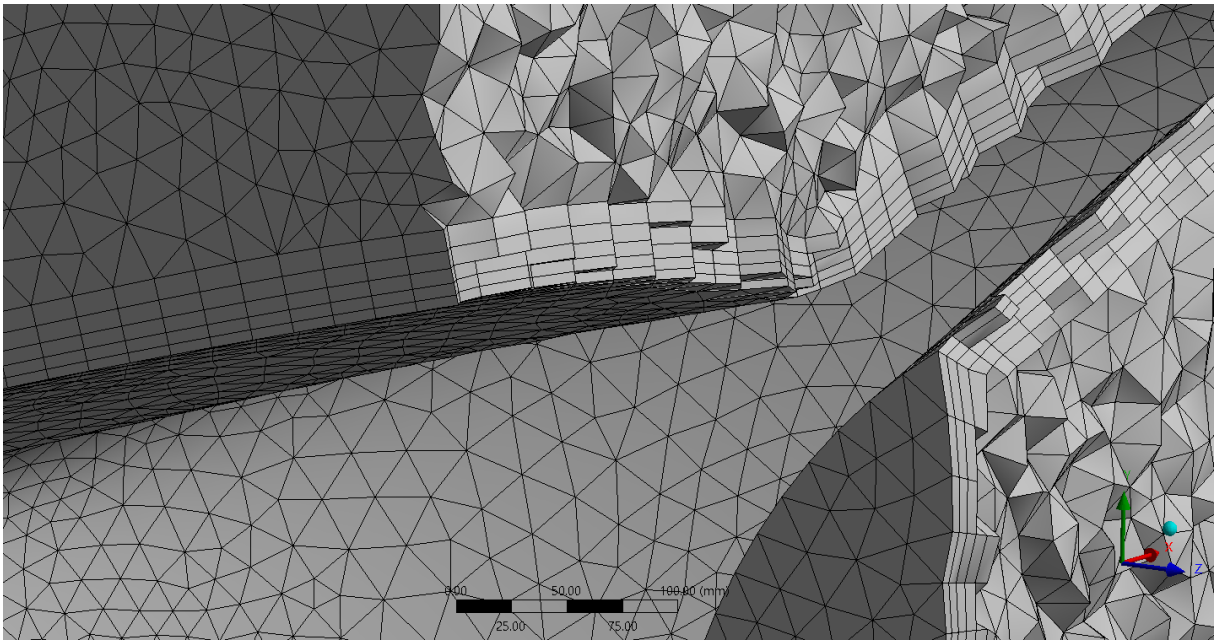


Figura 39 - Camada prismática criada na superfície da carroceria e elementos tetraédricos.

Malha de elementos tetraédricos

A natureza completamente desestruturada destes elementos permite o seu crescimento até um tamanho ilimitado, enquanto mantêm uma conectividade ajustada com os elementos vizinhos. Como tal, estes elementos preenchem eficientemente o restante volume do domínio. Isto facilita os cálculos para domínios com bloqueio sólido muito baixo, o que é necessário para previsões precisas de escoamentos externos. [3]

Na Figura 40 encontra-se a malha de elementos gerada para uma das simulações em situação normal, onde se destacam a forma das caixas de controlo do tamanho dos elementos à volta da carroceria.

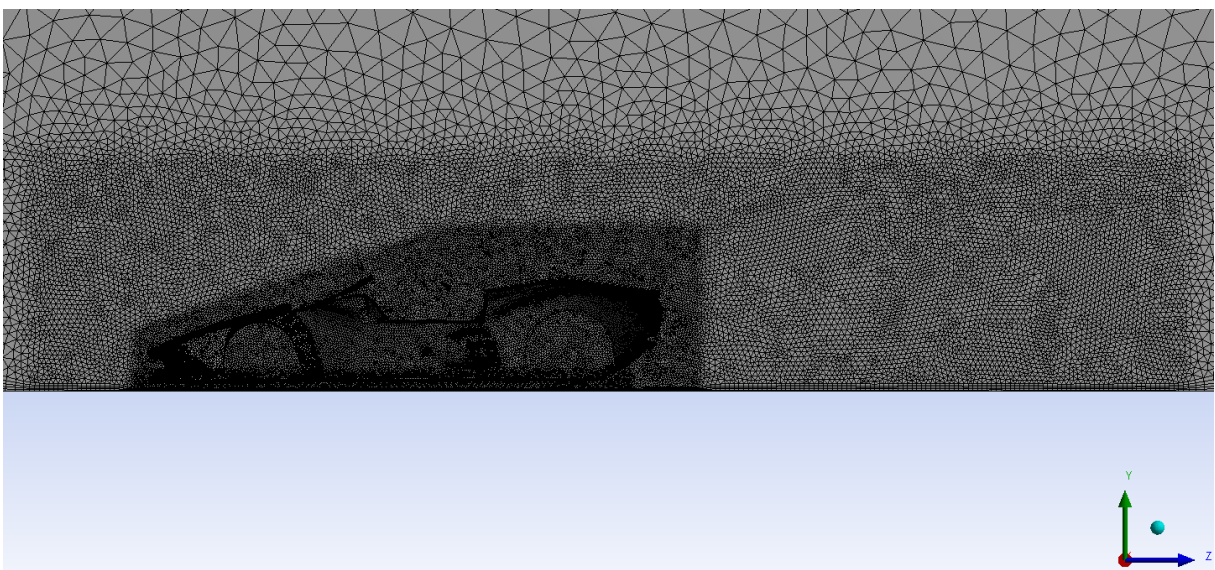


Figura 40 - Malha de elementos, definida pelas caixas de controlo do tamanho de elemento, usada para o processamento de uma simulação no ANSYS *Fluent*.

3.2.4 Qualidade de uma malha

Qualidade ortogonal

A qualidade da malha representa um papel importante na precisão e estabilidade da computação numérica. A qualidade ortogonal (*orthogonal quality*) é um indicador importante da qualidade da malha que o ANSYS *Fluent* permite calcular. De forma a determinar a qualidade ortogonal de uma dada célula, são calculadas as seguintes quantidades para cada face i :

- O produto escalar normalizado do vetor da área da face, \vec{A}_i , pelo vetor que vai do centróide da célula ao centróide dessa face, \vec{f}_i :

$$\frac{\vec{A}_i \cdot \vec{f}_i}{|\vec{A}_i| |\vec{f}_i|} \quad (3.1)$$

- O produto escalar normalizado do vetor da área da face, \vec{A}_i , pelo vetor que vai do centróide da célula ao centróide da célula adjacente que partilha essa face, \vec{c}_i :

$$\frac{\vec{A}_i \cdot \vec{c}_i}{|\vec{A}_i| |\vec{c}_i|} \quad (3.2)$$

O valor mínimo que resulta do cálculo das equações (3.1) e (3.2) para todas as faces é definido como a qualidade ortogonal da célula (elemento). Portanto, as piores células apresentam qualidade ortogonal próxima de 0, enquanto as melhores, a qualidade ortogonal será próxima de 1. A Figura 41 ilustra os vetores relevantes. A qualidade ortogonal mínima para todos os tipos de células deve ser superior a 0.01, com um valor médio significativamente superior.

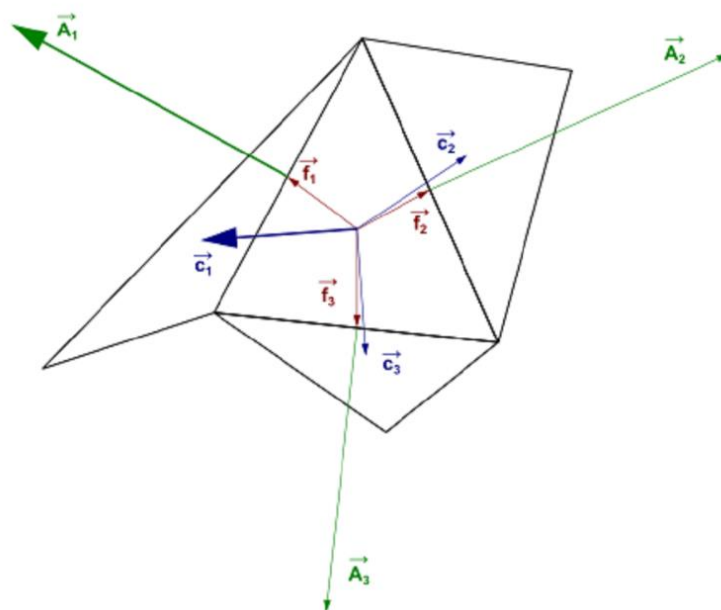


Figura 41 - Vetores usados para calcular a qualidade ortogonal. [15]

Razão de aspeto

A razão de aspeto é um indicador importante da qualidade da malha de elementos. Este fator corresponde à medida do alongamento de uma célula. É calculada como a razão entre o valor máximo e o valor mínimo de uma das distâncias seguintes: as distâncias normais entre o centróide da célula e os centróides das faces, e as distâncias entre o centróide da célula e os nós. Devem-se evitar mudanças grandes e bruscas na razão de aspeto das células em áreas onde o campo do escoamento também exhibe grandes mudanças ou fortes gradientes. A Figura 42 demonstra as distâncias usadas para calcular a razão de aspeto de um cubo unitário.

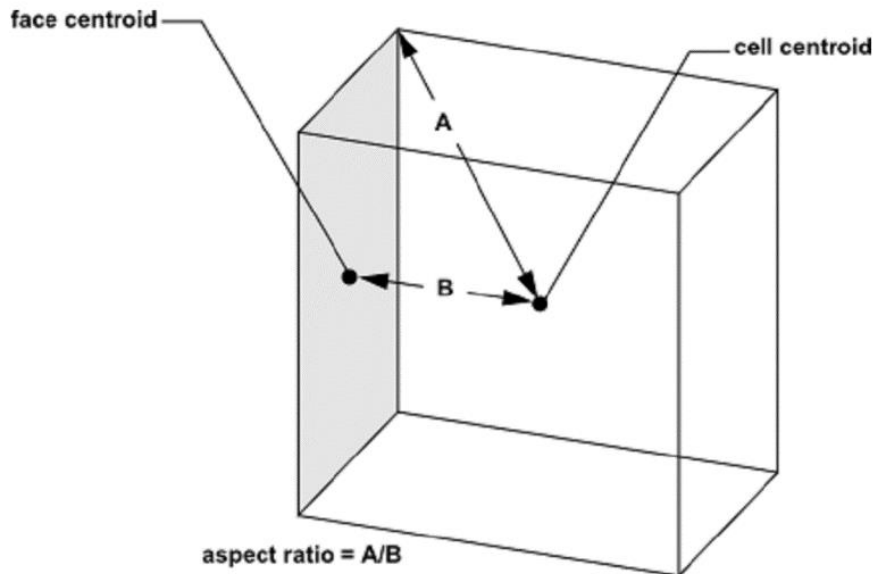


Figura 42 - Cálculo da razão de aspeto de um cubo unitário. [15]

Distorção das células

A qualidade da malha também pode ser avaliada pela distorção das células (*skewness*). A distorção das células é definida como a diferença entre a forma da célula e a forma de uma célula equilátera com o mesmo volume. As células altamente distorcidas podem diminuir a precisão e destabilizar a solução. Regra geral, a distorção máxima para uma malha triangular/tetraédrica deve ser mantida abaixo de 0.95, com um valor médio significativamente inferior. Um valor máximo da distorção acima de 0.95 pode levar a dificuldades de convergência e, conseqüentemente, requerer alterações nos controlos do *solver*, como a redução dos fatores de sob relaxamento e/ou a mudança para o *solver* acoplado baseado na pressão. [15]

3.3 Obtenção da solução

3.3.1 Condições de fronteira

A especificação das condições de fronteira deve ser orientada o mais próximo possível das condições de medição de um túnel de vento. Na maioria dos casos, a velocidade e a intensidade de turbulência do escoamento do túnel de vento são conhecidas. Portanto, é usada uma condição de fronteira de entrada em velocidade (*velocity-inlet*) para modelar o escoamento na entrada.

A magnitude da velocidade e a direção do escoamento são especificadas, completadas com os valores de turbulência na entrada. São também especificadas as condições de fronteira de saída em pressão (*pressure-outlet*) e de simetria nas restantes fronteiras do domínio. [3]

3.3.2 Modelação de turbulência

A fiabilidade das previsões de CFD para escoamentos turbulentos é altamente dependente da qualidade da modelação da turbulência. Isto é ainda mais significativo para escoamentos em torno de veículos terrestres, onde as características mais salientes incluem camadas limite tridimensionais com linhas de corrente de elevada curvatura, separação e fortes vórtices. Estas características requerem modelos de turbulência que sejam capazes de definir apropriadamente os efeitos de não-equilíbrio e de anisotropia.

Baseando-se na experiência, a ANSYS recomenda dois tipos de modelos de turbulência para estudos de aerodinâmica externa (modelo K-épsilon Realizável e o modelo da Tensão de *Reynolds*). [3]

Devido às limitações de *hardware* na realização deste trabalho, foi usado o Modelo K-épsilon Realizável (*K-epsilon Realizable Model*) para todas as situações. Efetuou-se apenas uma simulação com o modelo de turbulência RSM, que originou dificuldades de convergência.

3.3.3 Cálculo da solução

As simulações foram efetuadas usando o *solver* baseado na pressão (*pressure-based solver*) e em regime permanente, com monitorização dos valores de C_d , C_l , C_m (coeficiente do momento aplicado no centro geométrico do carro segundo a direção transversal – neste caso na direção x) e da velocidade de um ponto situado na zona da esteira. As iterações decorreram até estes valores apresentarem uma variação mínima (ver imagens da evolução das iterações no Anexo A). A escolha deste *solver* é consequência do tipo de escoamento ser considerado incompressível.

O cálculo foi processado pelo esquema acoplado (*Coupled*) usando equações de primeira ordem (*first order upwind*) para a quantidade de movimento, energia cinética de turbulência e taxa de dissipação de turbulência nas primeiras 100 iterações e de segunda ordem (*second order upwind*) nas seguintes. O *Fluent* permite também usar os esquemas de cálculo SIMPLE, SIMPLEC e PISO. Foi escolhido o esquema *Coupled* devido à possibilidade que este oferece, de obter uma solução mais rapidamente (recorrendo a menos iterações) e com boa estabilidade na evolução dos valores obtidos após cada iteração, apesar de exigir mais RAM. Foi também usado o esquema SIMPLE, mas rapidamente foi descartado devido ao elevado tempo de simulação (entre 5 a 10 vezes mais iterações), em comparação com o *Coupled*, e à instabilidade dos valores obtidos após cada iteração (dificuldade em obter convergência).

Solução inicial

O modelo k - ε realizável necessita da introdução de valores para as variáveis k e ε de forma a iniciar a solução. Estes valores são calculados pelas seguintes equações:

$$k = \frac{3}{2} (I V_{in})^2 \quad (3.3)$$

$$\varepsilon = 0,09 \frac{k^2}{v_T} \quad (3.4)$$

Onde I representa a intensidade de turbulência (5% por definição), V_{in} a velocidade do escoamento na entrada (*velocity-inlet*) e v_T a viscosidade cinemática turbulenta. [4, 15]

Em vez de calcular os valores de k e ε , foi usada a Iniciação Híbrida (*Hybrid Inicialization*) para obter uma solução inicial.

A iniciação híbrida é uma coleção de fórmulas e métodos de interpolação de fronteiras. Resolve a equação de *Laplace* para produzir um campo de velocidades que esteja de acordo com as geometrias complexas do domínio, assim como um campo de pressões que ligue suavemente valores de pressão alta e baixa no domínio computacional. Todas as outras variáveis (temperatura, turbulência, frações de espécies, frações de volume, etc.) serão automaticamente definidas com base nos valores médios do domínio ou através de uma fórmula pré-determinada. [14]

Na Tabela 6 encontram-se as propriedades do ar usadas para a realização das simulações CFD.

Tabela 6 - Valores usados nas simulações CFD para as variáveis físicas.

Propriedade	Quantidade
Pressão [Pa]	101350
Densidade [Kg/m ³]	1.225
Viscosidade [Kg/m.s]	1.7894 x 10 ⁻⁵
Temperatura [K]	288.16

Solver baseado na pressão

O *solver* baseado na pressão usa um algoritmo que pertence a uma classe geral de métodos chamada métodos de projeção. No método de projeção, a restrição da conservação da massa (continuidade) do campo de velocidades é conseguida através da resolução da equação da pressão. A equação da pressão deriva das equações da continuidade e da quantidade de movimento. Uma vez que as equações governantes são não-lineares e acopladas uma à outra, o processo de obtenção da solução envolve iterações em que todo o conjunto de equações governantes é resolvido repetidamente até que a solução convirja. [14]

*Algoritmos de Acoplamento Pressão-Velocidade***Algoritmos Segregados**

Os algoritmos segregados baseados na pressão resolvem a equação da quantidade de movimento e as equações de correção da pressão separadamente. Este método de solução semi-implícito resulta em convergência lenta.

SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations):

Este algoritmo usa a relação entre a velocidade e as correções da pressão para impor a conservação da massa e para obter o campo de pressões. [14]

SIMPLEC (SIMPLE-Consistent)

O procedimento deste algoritmo é semelhante ao do SIMPLE. A única diferença reside na expressão usada para a correção do fluxo de face. Vários problemas beneficiam com o uso deste algoritmo, particularmente devido ao aumento do sob relaxamento possível de aplicar. [14, 15]

PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operations)

Algoritmo recomendado para todos cálculos de escoamentos transientes, especialmente com grandes intervalos de tempo. Este esquema de acoplamento pressão-velocidade, pertencente aos algoritmos da família SIMPLE, é baseado no grau mais elevado da relação de aproximação entre as correções para a pressão e velocidade. [14, 15]

Algoritmo Acoplado (Coupled Algorithm)

O esquema acoplado consegue uma implementação monofásica robusta e eficiente para escoamentos em regime permanente, com performance superior em comparação com os esquemas de solução segregada (SIMPLE, SIMPLEC e PISO). Este algoritmo acoplado, baseado na pressão, oferece uma alternativa aos algoritmos segregados baseados na pressão e na densidade, através do acoplamento pressão-velocidade do tipo SIMPLE.

O algoritmo acoplado resolve a equação da quantidade de movimento e as equações da continuidade baseadas na pressão em simultâneo, permitindo uma rápida convergência. [14, 15]

4 Resultados das Simulações CFD

Depois de definida a metodologia a usar, segue-se a aplicação dos conceitos adquiridos. Assim, foram realizadas várias simulações (neste trabalho são apresentadas 12 simulações, mas foram realizadas mais na fase de aprendizagem dos programas) com diferentes posições e velocidades do escoamento, com o objetivo de encontrar as características aerodinâmicas deste automóvel em diferentes situações. Em todas estas situações, definiu-se o movimento em linha reta, ou seja, a carroceria movendo-se paralelamente ao escoamento, no sentido equivalente ao movimento de um veículo na estrada. De uma forma mais simples, simulou-se a colocação do veículo no interior de um túnel de vento.

As diferenças entre as várias situações residem na distância ao solo do veículo, na presença de condutas de refrigeração e no número de elementos das malhas. Os parâmetros escolhidos para o processamento das simulações efetuadas estão presentes no Anexo B.

Todas as figuras presentes neste capítulo (exceto as que apresentam referência), no capítulo seguinte assim como no Anexo A, foram retiradas dos programas usados na realização deste trabalho.

4.1 Propriedades da carroceria estudada

A carroceria estudada corresponde ao modelo 3D de um automóvel desportivo e pode ser visualizado na Figura 43 e na Figura 44. A carroceria, que será produzida em fibra de vidro, tem como principais características a presença de um fundo plano, entradas de ar laterais, habitáculo permanentemente aberto, duas “bossas” na parte de trás e, de uma forma geral, um desenho inspirado na competição automóvel.

As dimensões do veículo estudado neste trabalho encontram-se presentes na Tabela 7.

Tabela 7 - Dimensões do veículo em estudo.

Tipo de dimensão	Valor
Comprimento [mm]	4457
Largura [mm]	1974
Altura [mm]	1254
Área frontal [m²]	1.822
Diferença de altura (entre a distância ao solo à frente e atrás) [mm]	10

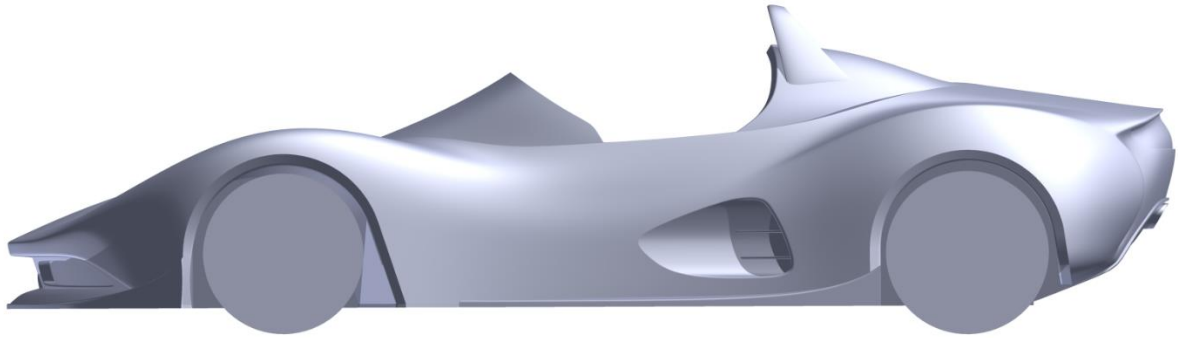


Figura 43 - Vista lateral da carroceria.

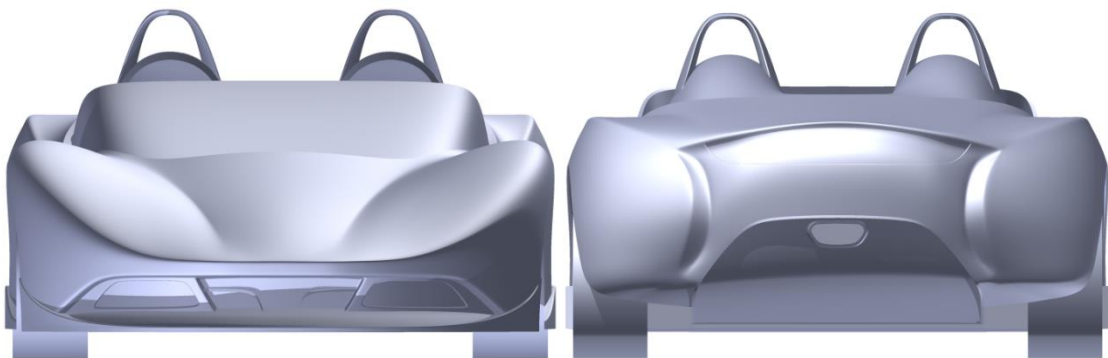


Figura 44 - Vistas da frente e retaguarda da carroceria.

4.2 Simulação ao modelo de Ahmed

Durante a fase de aprendizagem dos programas utilizados, realizou-se uma simulação a um corpo com forma próxima de um automóvel com coeficiente de arrasto conhecido (modelo de *Ahmed*). Este corpo encontra-se ilustrado na Figura 45.

Foi usado, nesta simulação, um modelo de *Ahmed* com um ângulo φ de 25° apresentando um valor de $C_d = 0.283$. [2]

Esta simulação foi processada com uma malha de elementos gerada com os parâmetros referidos no capítulo anterior, ou seja, domínio computacional com as dimensões recomendadas, caixas de refinamento local do tamanho de elemento e camada prismática ao longo da superfície (Figura 46). Os parâmetros da simulação definidos no ANSYS *Fluent* são idênticos aos usados nas restantes simulações com o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ realizável, com velocidade do escoamento de 40 m/s (144 km/h) e podem ser consultados no Anexo B.

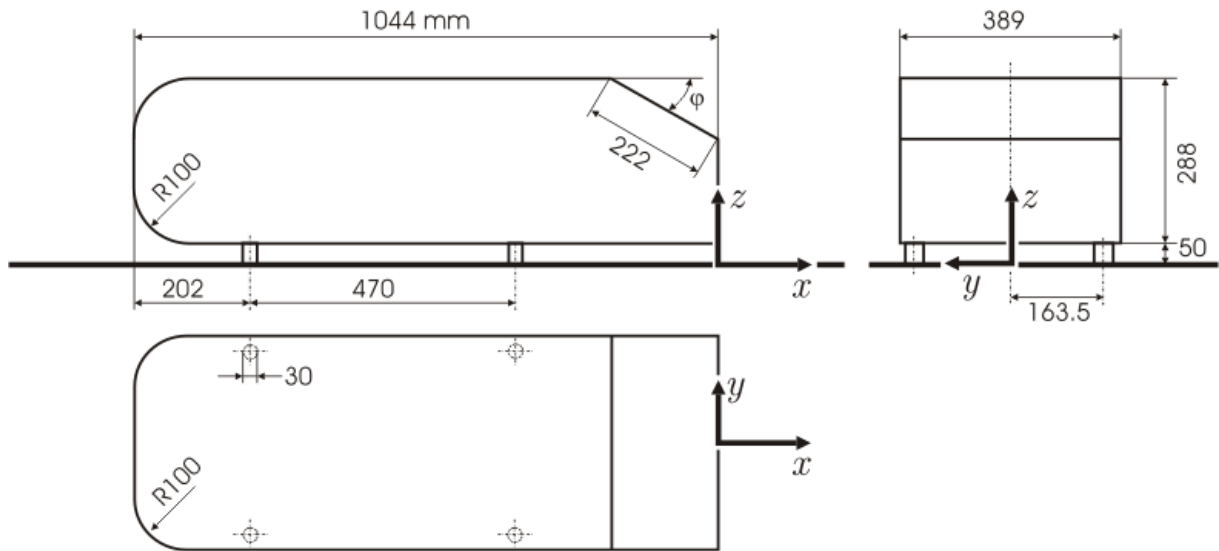


Figura 45 - Modelo de Ahmed (dimensões em milímetros). [16]

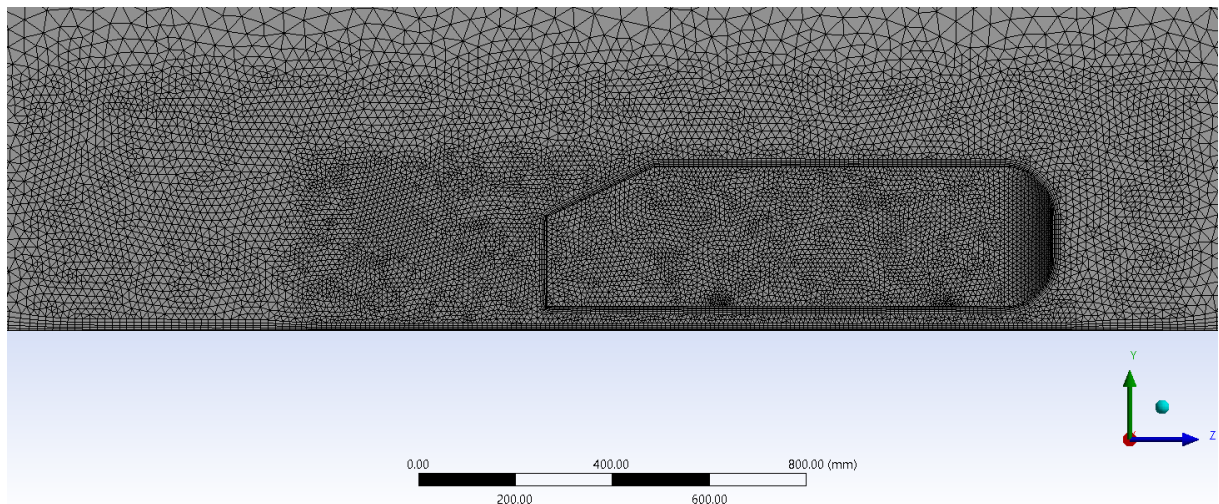


Figura 46 - Malha de elementos gerada para a simulação ao modelo de Ahmed.

Através desta simulação obteve-se um valor de $C_d = 0.283$, idêntico ao valor da bibliografia, significando que a malha gerada e os parâmetros utilizados possibilitaram uma enorme precisão. A Figura 47 ilustra a distribuição de vetores de velocidade no plano de simetria. Através desta figura observa-se a formação de dois vórtices na esteira e a separação de escoamento que ocorre na parte de trás (no início dos vórtices da esteira). Mais à frente será possível observar que a carroceria em estudo também forma dois vórtices idênticos aos presentes nesta figura. Estes vórtices, geralmente, formam-se nos automóveis de estrada, sendo característicos da forma básica de um veículo. [2]

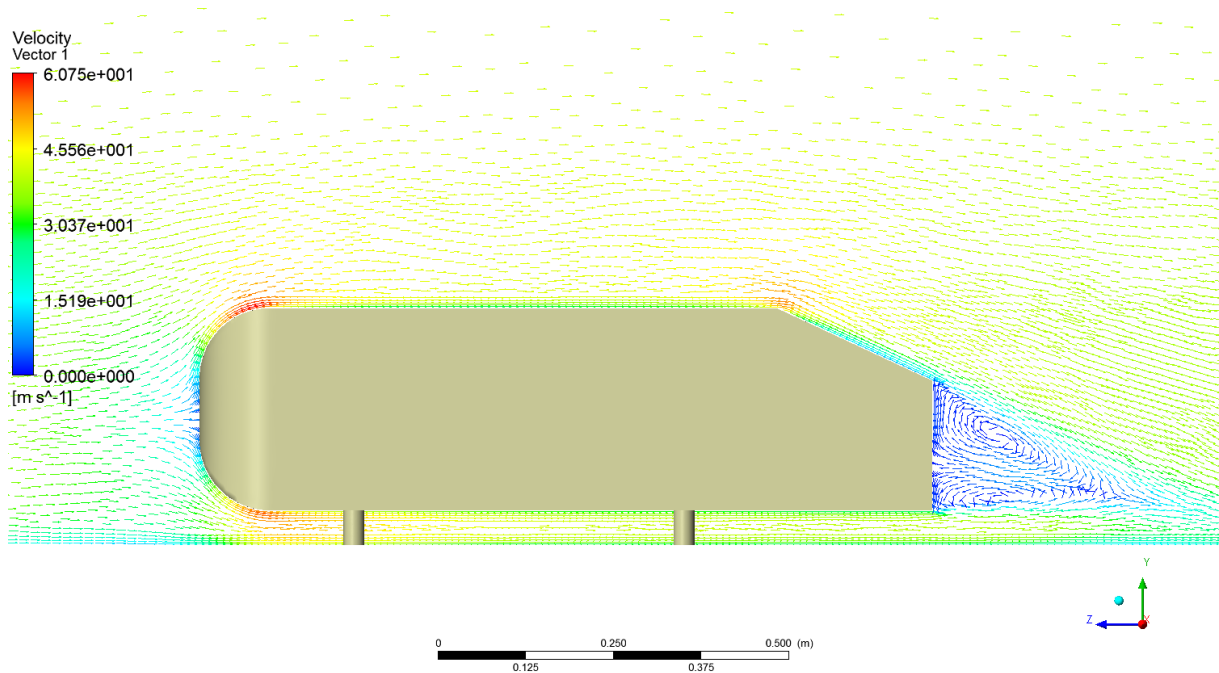


Figura 47 - Distribuição de vetores de velocidade na linha de simetria do modelo de *Ahmed* a 144 km/h (40 m/s).

4.3 Simulações em situação normal

Nesta secção apresentam-se os resultados obtidos pelas simulações efetuadas em situação de movimento frontal, paralelamente ao escoamento livre, com o automóvel na posição normal (altura ao solo de 100 mm à frente e 110 mm atrás). Estas simulações foram realizadas para quatro valores da velocidade V_∞ (100, 150, 200 e 250 km/h) usando o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ realizável.

A realização destas simulações processou-se com uma malha de elementos contendo cerca de 8.6 milhões de elementos (malha “8.6M”). Também se realizaram simulações com diferentes valores do número de elementos com uma velocidade de 150 km/h, para o estudo da variação dos resultados com o número de elementos. Devido à limitação da capacidade de processamento, as simulações com as malhas a partir da 8.6M foram muito demoradas (cerca de 8h para a 8.6M até 20h para a 10.5M). Por fim, usou-se a malha 8.6M para uma simulação em que se adotou um modelo de turbulência diferente (RSM).

O número de *Reynolds* correspondente às velocidades de escoamento usadas encontra-se entre 8.56×10^6 e 2.14×10^7 para 100 e 250 km/h, respetivamente. Estes valores foram calculados a partir da equação (2.2) usando os valores de densidade e viscosidade dinâmica mencionados na secção 2.1.1 (com $L = 4.5$ m). Verifica-se que estes valores encontram-se perto de 10^7 (gama referida na secção 2.1.7).

4.3.1 Propriedades das malhas de elementos

Na Tabela 8 encontram-se as principais características das malhas de elementos usadas nas simulações em situação normal. A Figura 48 ilustra uma dessas malhas de elementos.

Analisando a qualidade das malhas (ver secção 3.2.4), pode-se verificar que certos parâmetros, como a distorção máxima e a qualidade ortogonal mínima, não contribuem para uma qualidade elevada. A razão deste facto é a complexidade do modelo 3D, apresentando pormenores como

faces curvas com raios muito pequenos, extremidades com ângulos muito pequenos e faces de tamanho reduzido. No entanto, os valores mínimos da qualidade ortogonal não descem do valor mínimo de referência 0.01. Relativamente à distorção máxima, embora ultrapasse o valor máximo recomendado de 0.95, não é muito significativa devido ao número de elementos que ultrapassam este valor ser muito reduzido (entre 10 e 20 elementos) em comparação com o número total de elementos.

O tamanho máximo de 1000 mm dos elementos do domínio é igual para todas as malhas, resultando de só se aplicar à região envolvente das caixas, não apresentando influência significativa nos resultados obtidos. [3]

Tabela 8 - Propriedades das malhas de elementos usadas nas simulações de situação normal.

Característica	1.8M	2.4M	4.3M	5.5M	8.6M	10.5M
Tamanho de elemento [mm] caixa 1	90	73	57	50	41	38
Tamanho de elemento [mm] caixa 2	60	53	37	30	22	20
Tamanho de elemento [mm] caixa 3	22	20	15	15	15	15
Tamanho de elemento [mm] faces da carroceria	66	50	35	28	22	18
Tamanho máximo de elemento em todo o domínio [mm]	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Nº de nós	485498	596129	1006389	1214180	1773483	2139434
Nº de elementos	1848318	2380776	4317156	5454686	8556949	10464568
Razão de aspeto máxima	171.49	210.48	116.49	396.77	194.58	197.45
Qualidade ortogonal mínima	0.0528	0.0528	0.0525	0.0525	0.0526	0.0661
Distorção máxima de elemento	0.983	0.975	0.969	0.992	0.976	0.988

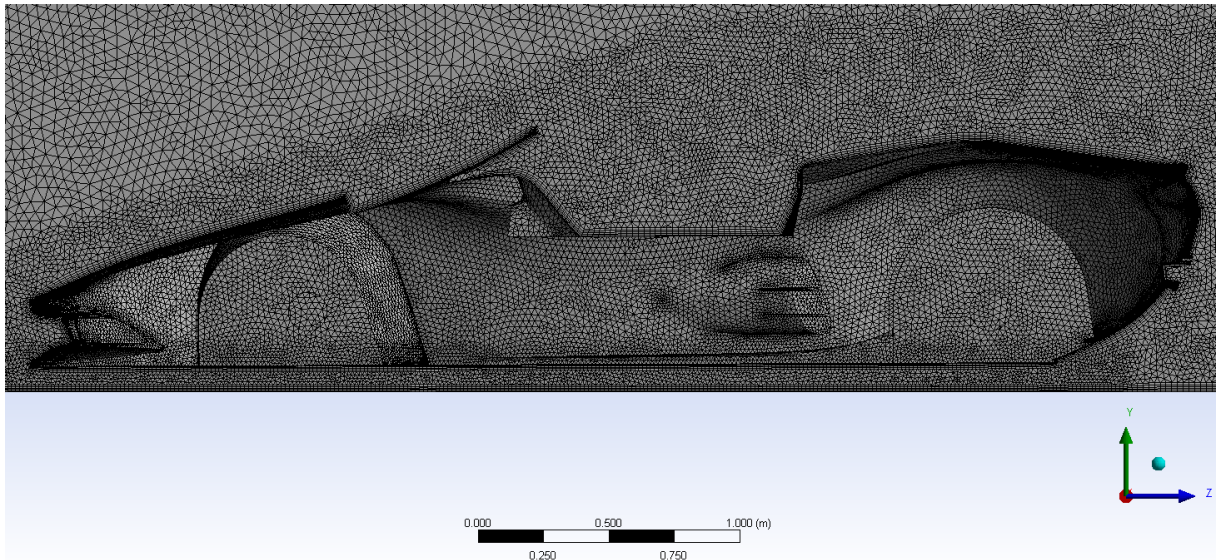


Figura 48 - Malha de elementos 8.6M.

4.3.2 Coeficientes e forças aerodinâmicas

Os resultados obtidos pelas simulações encontram-se na Tabela 9 e Tabela 10. Os valores das forças de arrasto D , de sustentação L , lateral Y e do momento M , foram retirados do ANSYS *Fluent* e podem ser confirmados pelas equações (2.10), (2.11) e (2.12). O coeficiente C_m e o momento M representam o momento aplicado no centro geométrico da carroceria, segundo o eixo x , tendo como finalidade estudar o *pitch* (não sabendo o centro de massa escolheu-se o centro geométrico, que será o ponto mais próximo).

Tabela 9 - Resultados obtidos nas simulações em situação normal (modelo de turbulência $k-\epsilon$ realizável).

Parâmetro	8.6M				1.8M	2.4M	4.3M	5.5M	10.5M
Velocidade [m/s]	27.778	41.667	55.556	69.444	41.667	41.667	41.667	41.667	41.667
Velocidade [km/h]	100	150	200	250	150	150	150	150	150
C_d	0.397	0.395	0.401	0.391	0.409	0.408	0.403	0.403	0.398
C_l	0.114	0.114	0.110	0.111	0.0949	0.0963	0.105	0.101	0.116
C_y	0.441	0.441	0.450	0.442	0.443	0.442	0.445	0.443	0.450
C_m	-0.896	-0.894	-0.865	-0.861	-0.882	-0.876	-0.879	-0.894	-0.889
D [N]	342	766	1380	2103	793	790	780	781	772
L [N]	98	221	378	599	184	187	203	195	224
Y [N]	380	858	1548	2379	858	856	861	859	871
M [Nm]	-772	-1731	-2978	-4632	-1709	-1697	-1702	-1731	-1722

Tabela 10 - Resultados obtidos na simulação em situação normal (modelo de turbulência RSM).

Parâmetro	RSM – 8.6M
Velocidade [m/s]	41.667
Velocidade [km/h]	150
C_d	0.393
C_l	0.0544
C_y	0.441
C_m	-0.988
D [N]	761
L [N]	105
Y [N]	854
M [Nm]	-1914

4.3.3 Gráfico do coeficiente de pressão

O Gráfico 1 ilustra o gráfico do coeficiente de pressão na linha de simetria da carroceria. O gráfico presente foi obtido pela simulação a 150 km/h usando a malha 8.6M. Apenas se apresenta este gráfico porque é idêntico para todas as velocidades, devido ao coeficiente C_p ser adimensional.

No gráfico, a curva mais simples corresponde à superfície inferior da carroceria (fundo plano) e a curva mais complexa à superfície superior. Toda a parte inferior possui C_p negativo, sendo a pressão inferior à pressão do escoamento livre (pressão atmosférica). Na superfície superior o C_p é positivo no *spoiler* frontal, no para-brisas, no capô e na extremidade da parte central onde começa a parte de trás do carro, a seguir ao habitáculo.

A zona 1 no Gráfico 1 resulta da forma da frente da carroceria, que possui saliências em baixo e em cima das entradas de ar e, logo a seguir a essas extremidades, a pressão desce drasticamente. Nas entradas de ar o C_p é próximo de 1, ou seja a pressão é alta (pequena linha no início da curva), sendo benéfico para o caudal de ar para refrigeração dos componentes mecânicos. Os valores de C_p muito baixos no início correspondem à queda de pressão que se segue às extremidades da frente da carroceria.

A zona 2, marcada no gráfico, representa as partes superior e inferior do para-brisas e o tablier, daí a sua forma. Desde essa zona até ao próximo pico de C_p encontra-se o habitáculo. A subida de pressão no para-brisas resulta da sua concavidade.

A zona 3 representa a cavidade existente entre o capô e o para-brisas, onde há um decréscimo da pressão e pequena turbulência.

Nota-se que as duas curvas encontram-se próximas, em várias zonas, explicando o valor de C_l relativamente baixo. A presença de C_p positivo apenas em cima à frente explica o elevado momento no centro geométrico obtido (C_m e M). A recirculação do fluxo de ar no habitáculo provoca uma drástica descida do coeficiente de pressão.

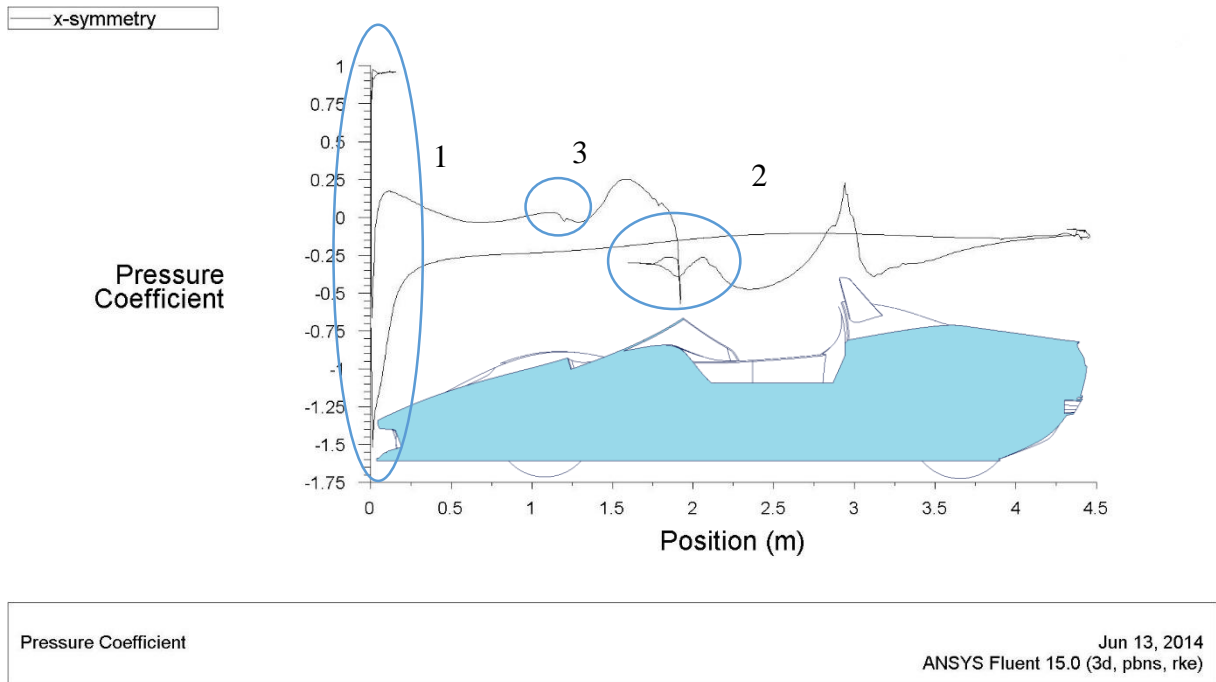


Gráfico 1 - Gráfico do coeficiente de pressão C_p na linha de simetria da carroceria a 150 km/h.

4.3.4 Distribuição da pressão

Nas seguintes figuras (Figura 49, Figura 50 e Figura 51) está ilustrada a distribuição de pressão na superfície da carroceria. Através da análise das figuras distinguem-se as zonas onde a pressão relativa é positiva (da cor verde à cor vermelha) e negativa (da cor azul à cor verde). A cor verde representa pressão relativa aproximadamente igual a zero. Confirma-se o que foi referido na análise ao gráfico de C_p que a pressão máxima surge na frente da carroceria (zona vermelha).

Verifica-se que a pressão é positiva nas entradas de ar e que há uma rápida descida da pressão a seguir a uma extremidade da carroceria, como por exemplo na parte inferior da frente (Figura 51). Pode-se verificar também o facto do momento negativo no centro geométrico (que tende a levantar a parte de trás do carro) através destas imagens, onde a pressão tende a ser superior à frente provocando um desequilíbrio. O efeito indesejável das rodas (principalmente as da frente) é confirmado pela Figura 51, através das zonas a laranja que estas apresentam.

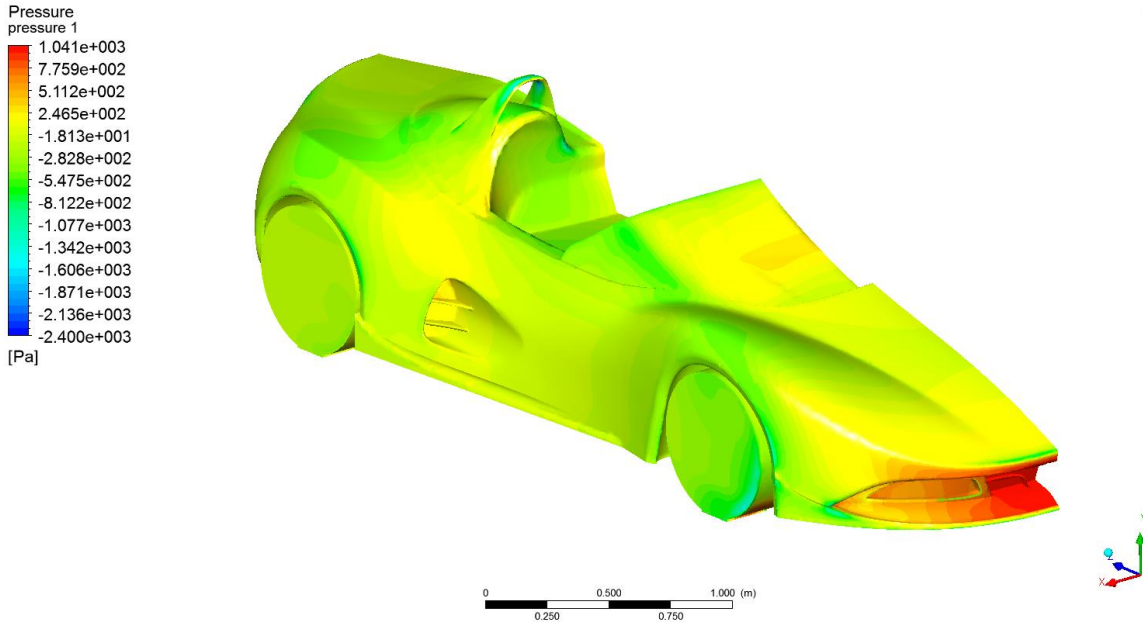


Figura 49 - Distribuição da pressão na carroceria a 150 km/h (frente).

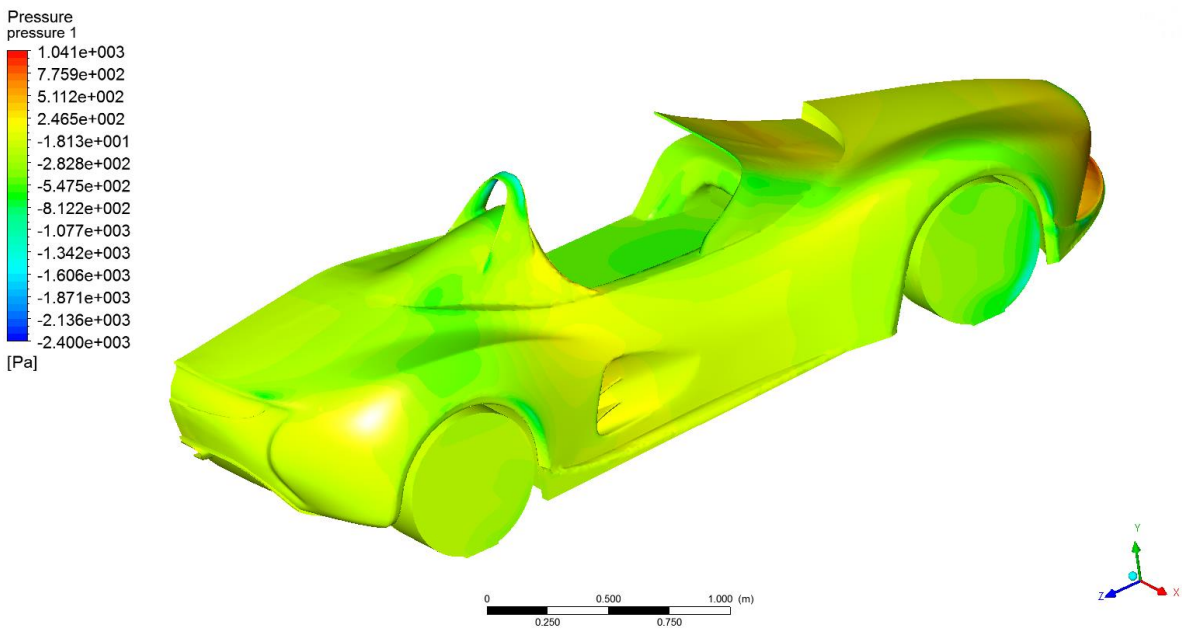


Figura 50 – Distribuição da pressão na da carroceria a 150 km/h (retaguarda).

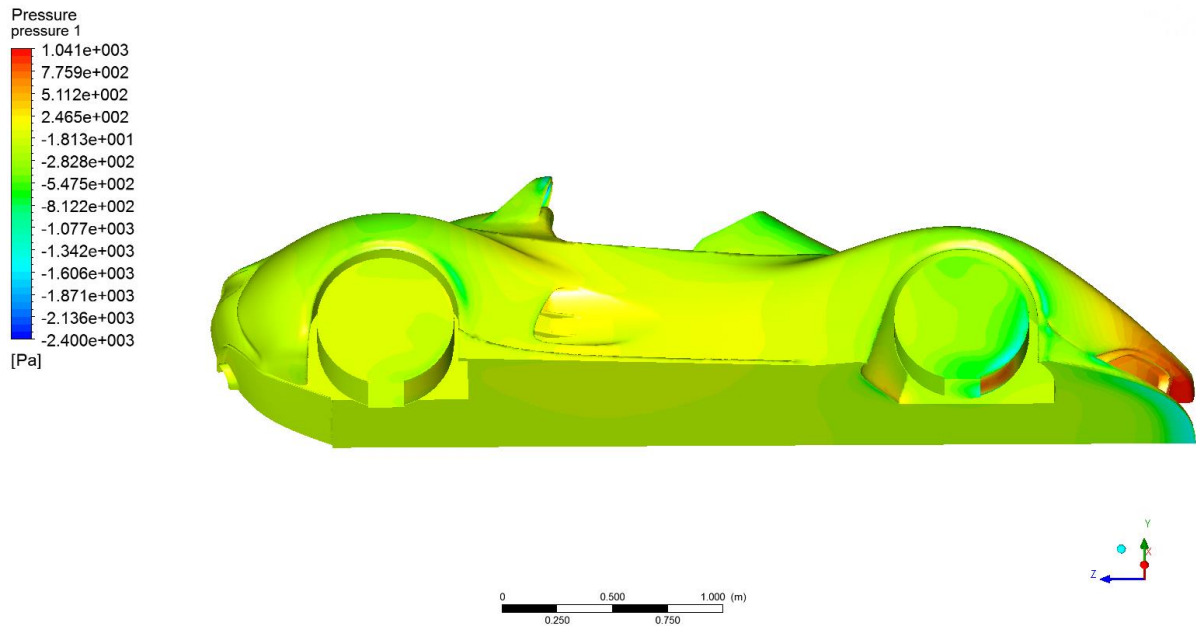


Figura 51 - Distribuição da pressão na carroceria a 150 km/h (fundo plano).

4.3.5 Distribuição de vetores de velocidade e linhas de corrente

A Figura 52 ilustra a distribuição de vetores de velocidade no plano de simetria da carroceria. A velocidade dos vetores corresponde à sua cor (ver legenda da figura). Verifica-se a existência de dois vórtices na esteira gerada assim como o vórtice correspondente à recirculação do fluxo de ar no interior do habitáculo. A recirculação pode ser também visualizada na Figura 53, onde se verifica que este fluxo é alimentado por ar proveniente dos lados do para-brisas. Nesta figura, observa-se que as linhas de corrente se encontram ligadas em grande parte da carroceria.

Verifica-se, através da Figura 52, que há separação do escoamento a seguir ao para-brisas e na parte de trás (onde há formação de esteira). Confirmando-se assim o que é afirmado na bibliografia (secção 2.1.4) – quando há um desvio acentuado na forma, o escoamento não consegue acompanhar e separa-se.

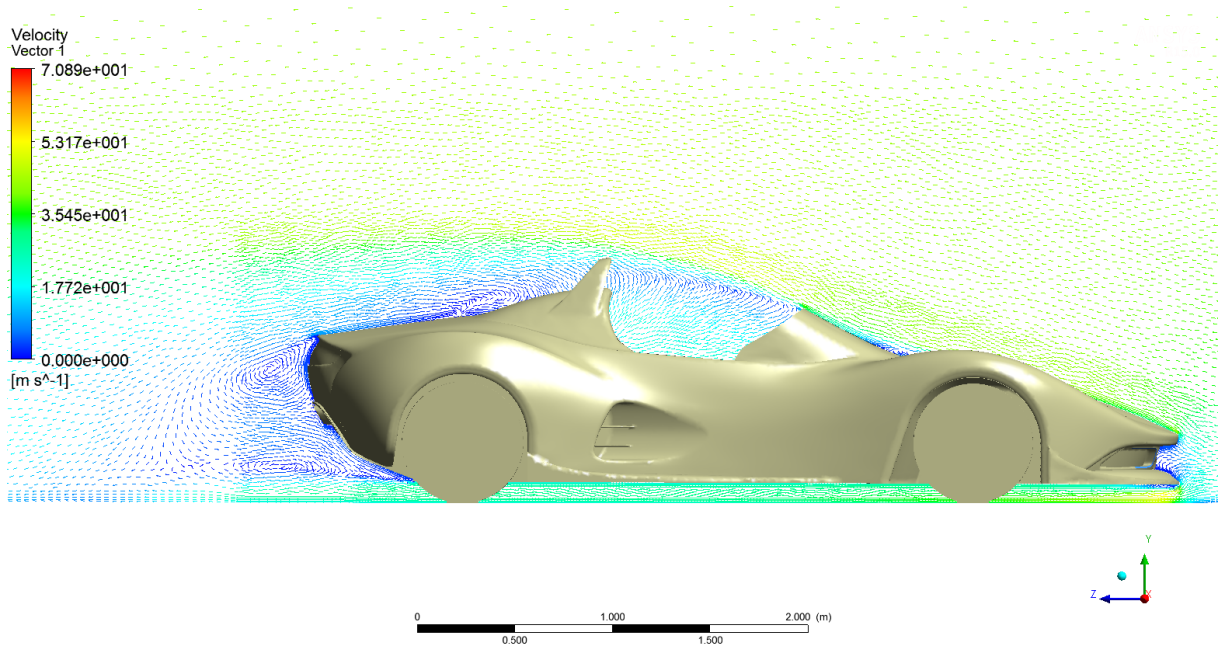


Figura 52 - Distribuição de vetores de velocidade no plano de simetria a 150 km/h.

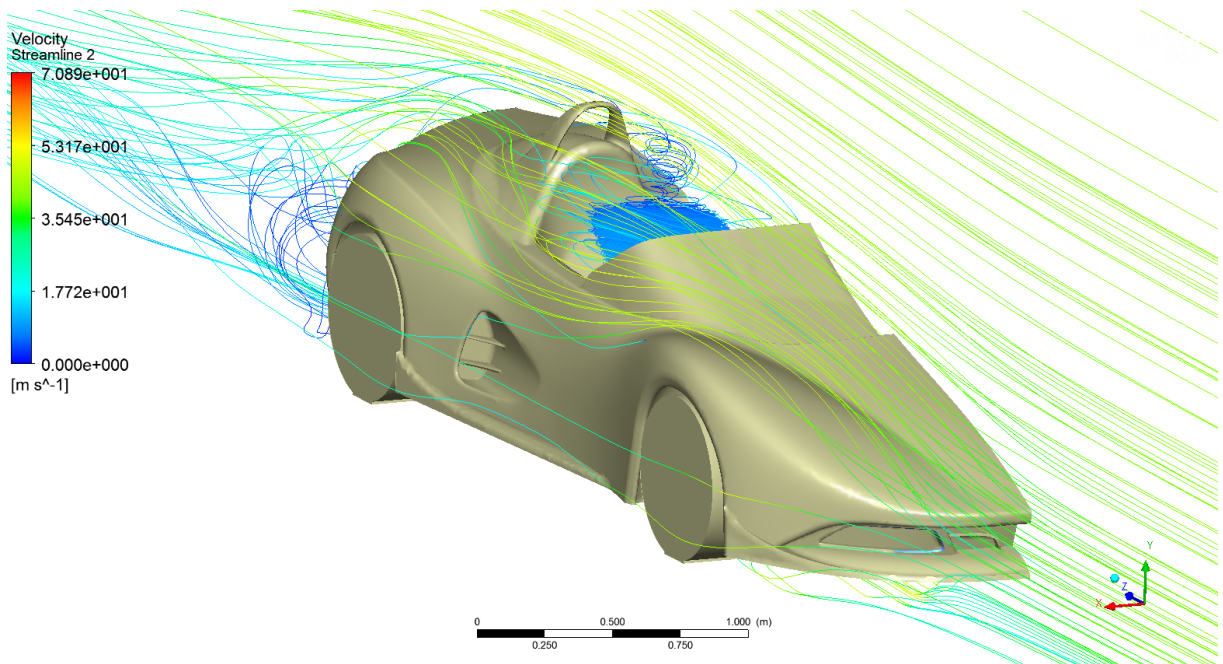


Figura 53 - Linhas de corrente em torno da carroceria a 150 km/h.

4.3.6 Distribuição das forças de sustentação e de arrasto

Na Figura 54 e Figura 55 podem ser identificadas as zonas da carroceria que mais contribuem para a sustentação positiva (zonas laranja e amarelo) e as zonas que contribuem para força descendente (zonas azuis). A força na direção y é próxima de zero nas zonas verdes.

Verifica-se que o habitáculo e a parte de trás são os principais responsáveis pela sustentação positiva e que a parte da frente é a principal responsável pela sustentação negativa.

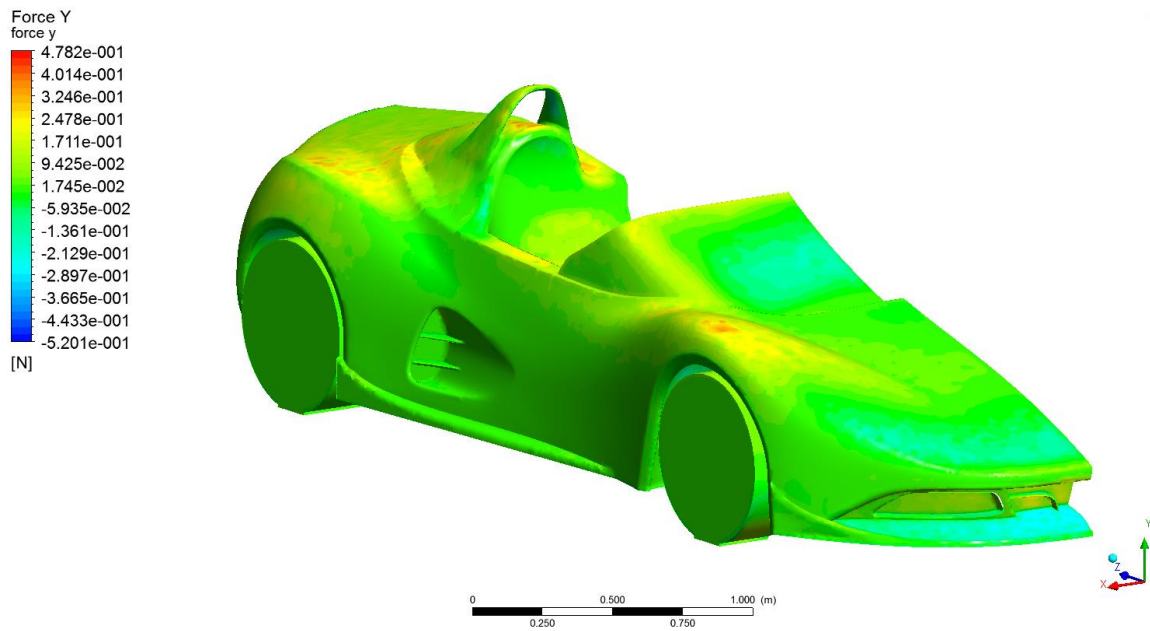


Figura 54 - Distribuição da força na direção y (força de sustentação) na carroceria a 150km/h (frente).

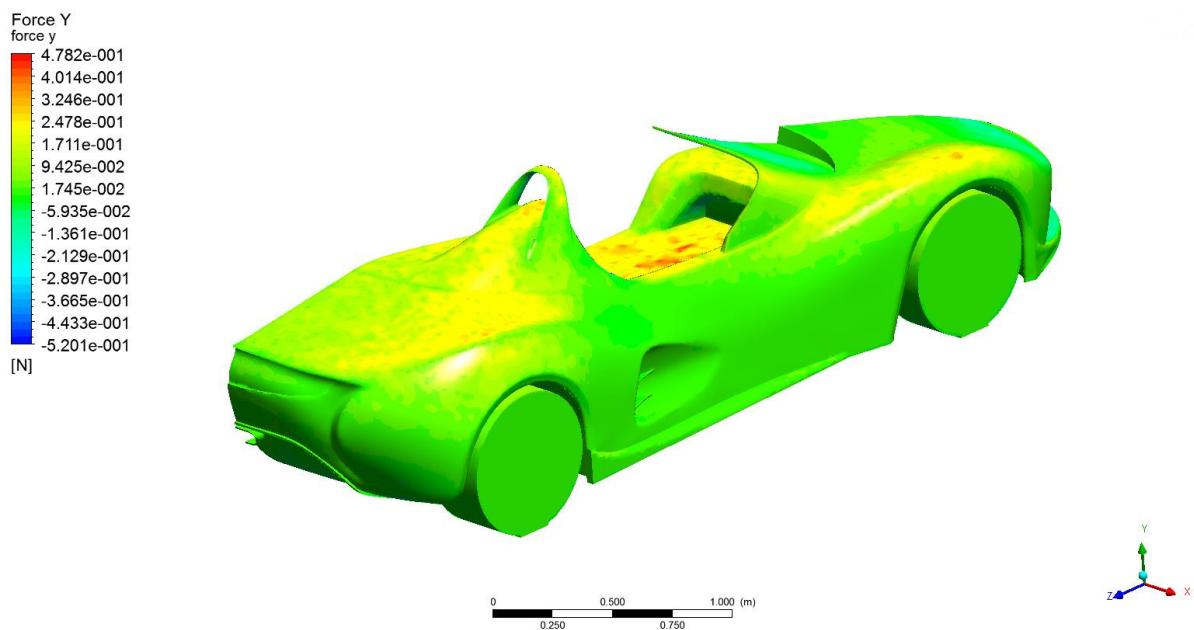


Figura 55 - Distribuição da força na direção y (força de sustentação) na carroceria a 150 km/h (retaguarda).

Na Figura 56 e Figura 57 podem ser identificadas as zonas da carroceria que mais contribuem para o arrasto (zonas laranja, amarelo e verde). Destacam-se, de entre essas zonas, a frente da carroceria, o habitáculo, a parte de trás e as cavas das rodas. Também existem zonas (a azul) onde a força na direção z é negativa, opondo-se à força de arrasto (força na direção z positiva) e diminuindo o arrasto total.

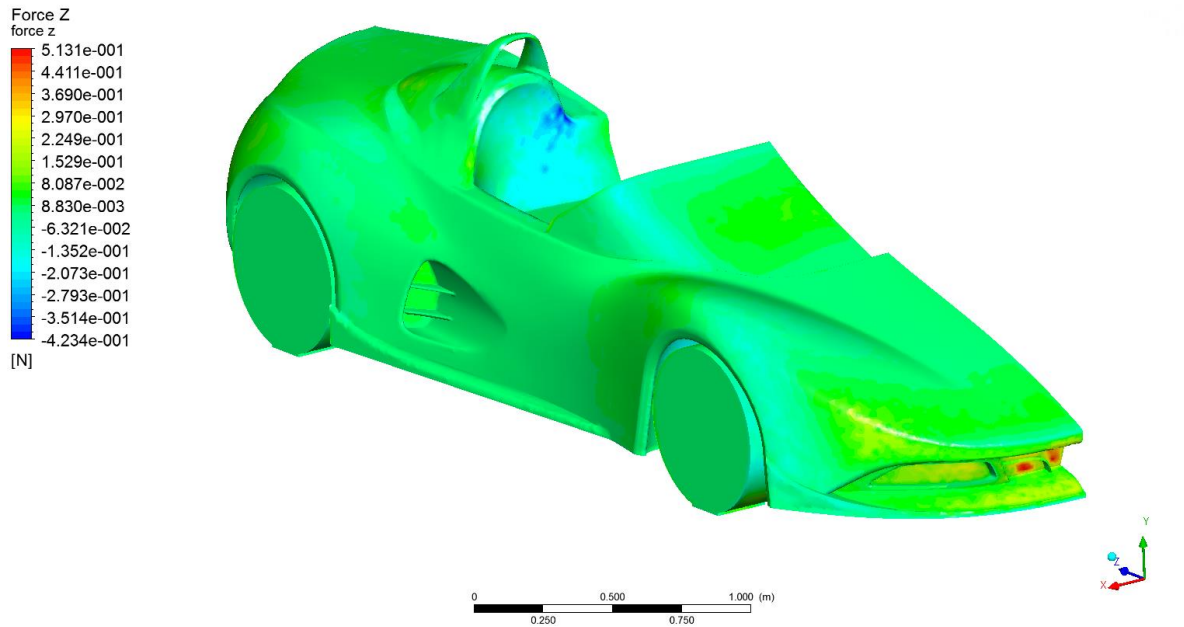


Figura 56 - Distribuição da força na direção z (força de arrasto) na carroceria 150 km/h (frente).

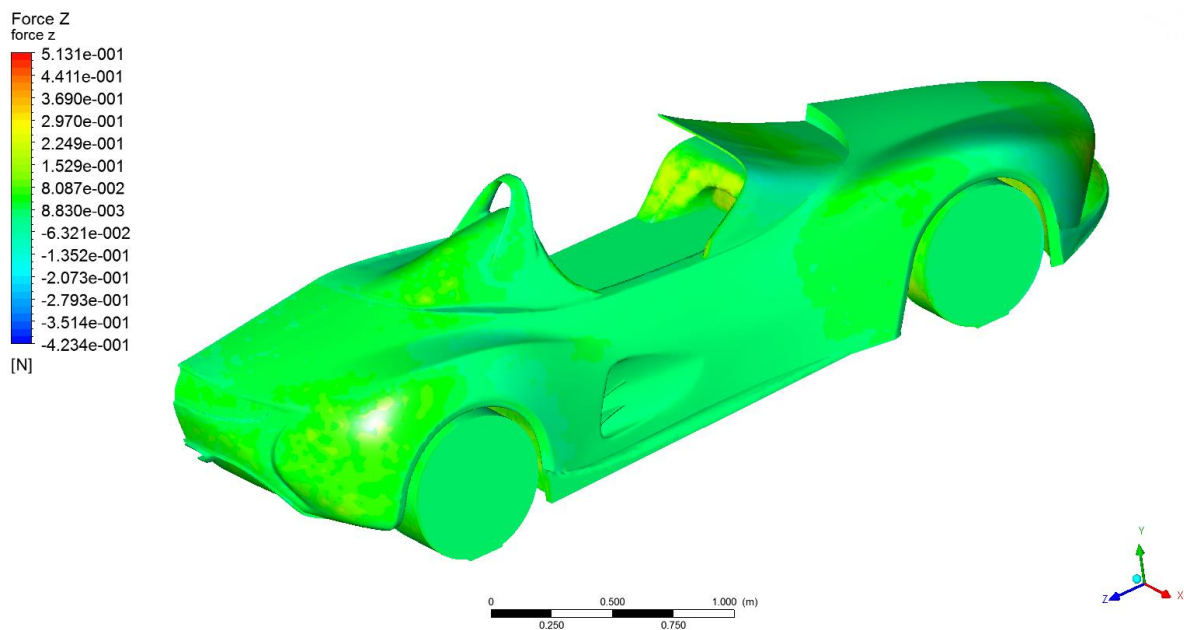


Figura 57 - Distribuição da força na direção z (força de arrasto) na carroceria a 150 km/h (retaguarda).

4.3.7 Distribuição de y^+

Na Figura 58 e Figura 59 encontra-se representada a distribuição de y^+ . Verifica-se que existem várias zonas que apresentam valores baixos de y^+ (zonas a azul escuro). Apesar de valores baixos de y^+ não serem ideais, são consequência do uso das funções de parede NWF. [14]

Os valores de y^+ aumentam com a velocidade (ver Anexo A).

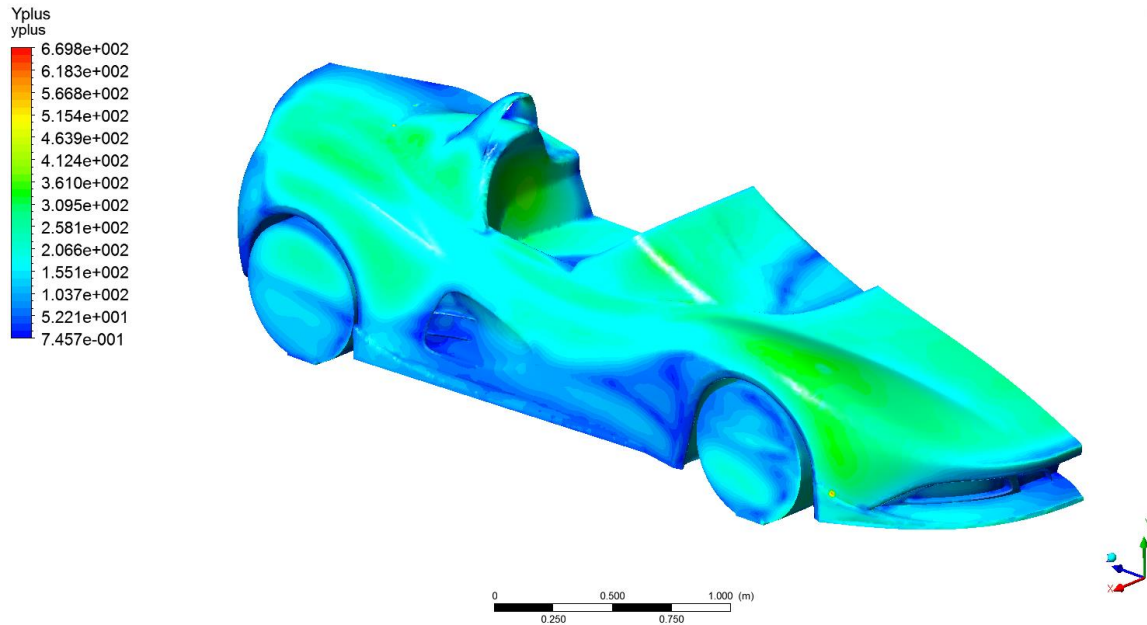


Figura 58 - Distribuição de y^+ na carroceria a 150 km/h (frente).

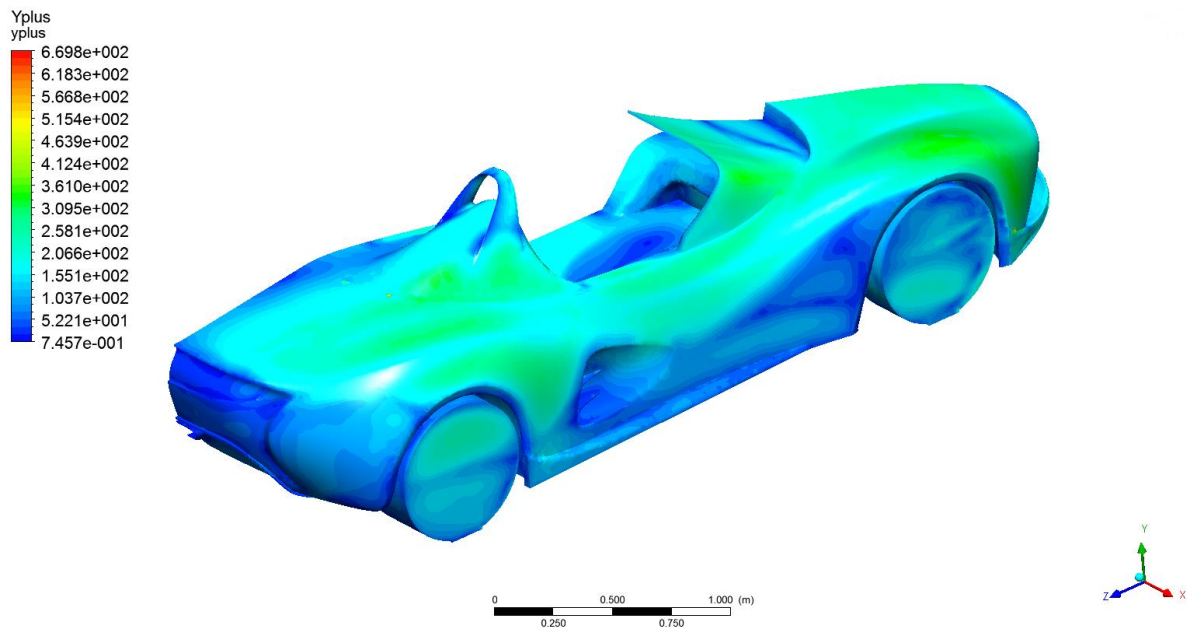


Figura 59 – Distribuição de y^+ na carroceria a 150 km/h (retaguarda).

4.4 Simulações com diferentes distâncias da carroceria ao solo

As simulações aqui apresentadas são idênticas às presentes em 4.3, sendo a única diferença a distância ao solo da carroceria. A diferença de altura frente/trás manteve-se em 10 mm e foram realizadas duas simulações, a primeira com distâncias de 80 mm à frente e 90 mm atrás (80-90), e outra com 120 mm à frente e 130 mm atrás (120-130).

O objetivo destas simulações é estudar o efeito da variação da distância ao solo nas características aerodinâmicas da carroceria.

4.4.1 Propriedades das malhas de elementos

Na Tabela 11 encontram-se as principais características das malhas de elementos usadas nas simulações com diferentes distâncias da carroceria ao solo. A qualidade destas malhas justifica-se da mesma forma que foi justificada a qualidade das malhas de 4.3.1. Chamar-se-á “80-90” à malha da carroceria com menor distância ao solo e “120-130” à malha da carroceria com maior distância ao solo.

Tabela 11 - Propriedades das malhas de elementos usadas nas simulações com diferentes distâncias ao solo.

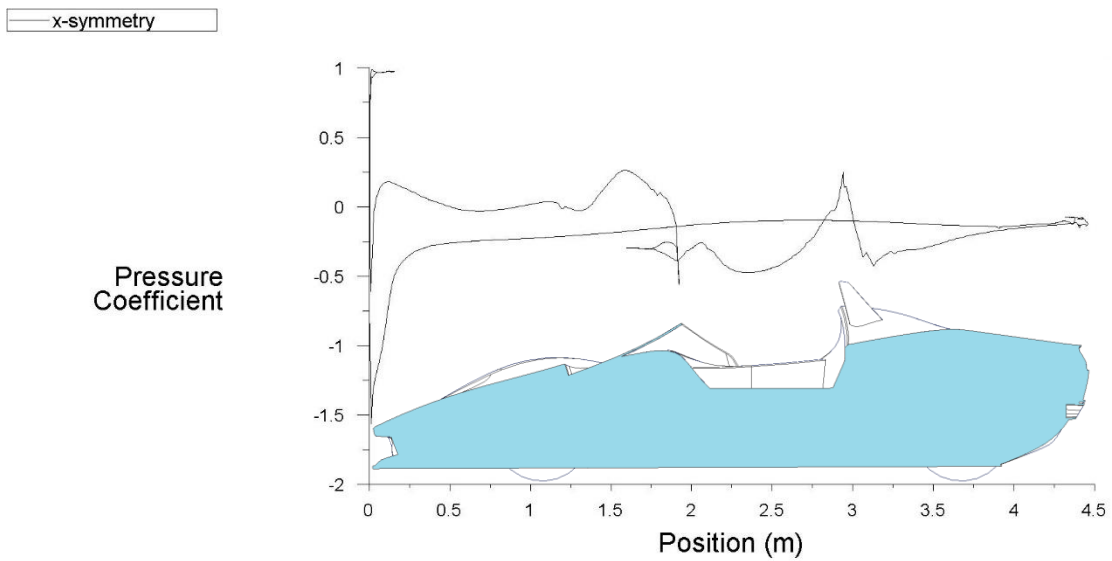
Característica	80-90	120-130
Tamanho de elemento [mm] – caixa 1	41	41
Tamanho de elemento [mm] – caixa 2	22	22
Tamanho de elemento [mm] – caixa 3	15	16
Tamanho de elemento [mm] – faces da carroceria	22	22
Tamanho máximo de elemento em todo o domínio [mm]	1000	1000
Nº de nós	1747920	1724024
Nº de elementos	8392290	8381032
Razão de aspeto máxima	139.17	138.62
Qualidade ortogonal mínima	0.0531	0.0534
Distorção máxima de elemento	0.968	0.970

4.4.2 Resultados obtidos

Os resultados obtidos pelas simulações com diferentes distâncias ao solo encontram-se na Tabela 12. Estão presentes, no Gráfico 2 e Gráfico 3, os gráficos de C_p na linha de simetria obtidos pelas simulações com distância ao solo de 80-90 e 120-130. A análise destes gráficos demonstra que são praticamente iguais ao gráfico das simulações em situação normal, exceto pequena variação de C_p no fundo plano. Isto significa que a distribuição da pressão é idêntica, independentemente da distância ao solo, diferenciando-se apenas nos valores absolutos. Estes gráficos seriam diferentes apenas se a diferença de altura entre o eixo da frente e o de trás fosse alterada.

Tabela 12 - Resultados obtidos nas simulações com diferentes alturas ao solo.

Parâmetro	80-90	120-130
Velocidade [m/s]	41.667	41.667
Velocidade [km/h]	150	150
C_d	0.369	0.420
C_l	0.0727	0.148
C_y	0.446	0.452
C_m	-0.873	-0.904
D [N]	711	818
L [N]	140	289
Y [N]	859	882
M [Nm]	-1681	-1762



Pressure Coefficient	Jun 13, 2014 ANSYS Fluent 15.0 (3d, pbns, rke)
----------------------	---

Gráfico 2 - Gráfico do coeficiente de pressão C_p na linha de simetria da carroceria com menor distância ao solo a 150 km/h (80-90).

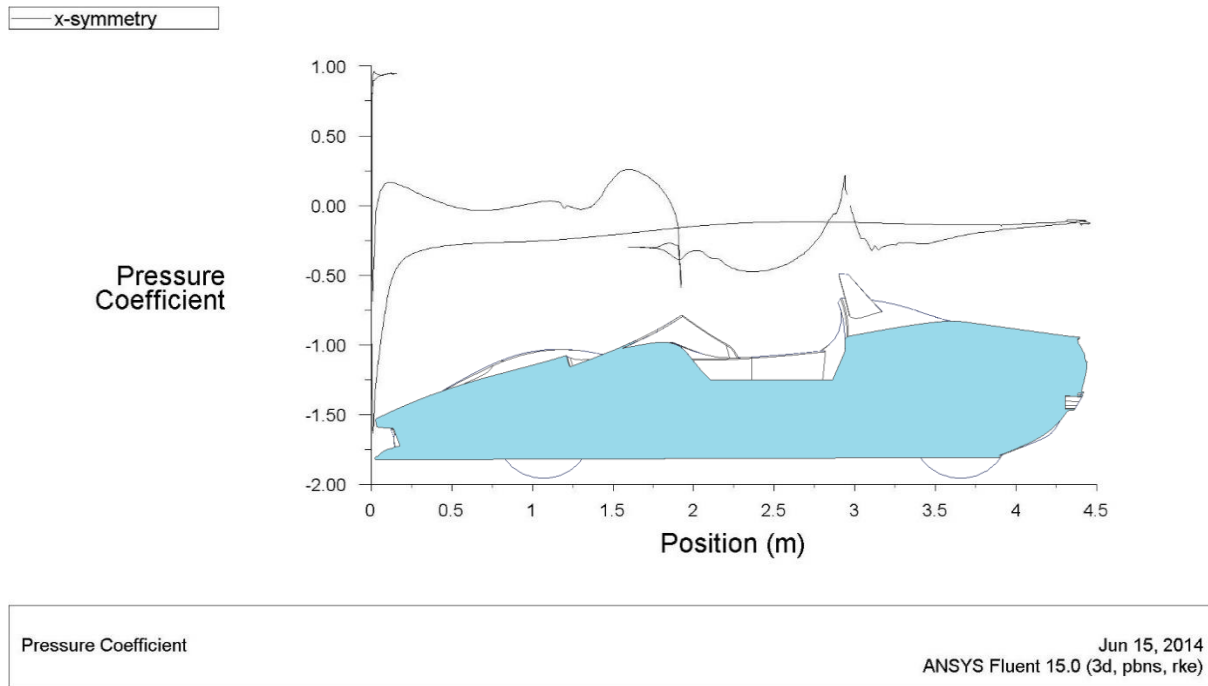


Gráfico 3 - Gráfico do coeficiente de pressão C_p na linha de simetria da carroceria com maior distância ao solo a 150 km/h (120-130).

4.5 Simulação com condutas de refrigeração

Nas simulações apresentadas anteriormente, o modelo 3D da carroceria não possui condutas de refrigeração. Para perceber qual o efeito das condutas de refrigeração nas características aerodinâmicas da carroceria, foi realizada uma simulação em que se acrescentou, no interior da frente, um esboço de uma possível conduta de refrigeração com um radiador. Foram também prolongadas as cavidades das entradas de ar laterais. Encontram-se na Figura 60 alguns pormenores das alterações referidas, onde se destacam o compartimento onde está colocado o radiador (em corte e destacado na figura onde o retângulo oblíquo corresponde ao radiador) e a conduta de saída. Na figura, o volume em cinzento corresponde ao volume de passagem de ar.

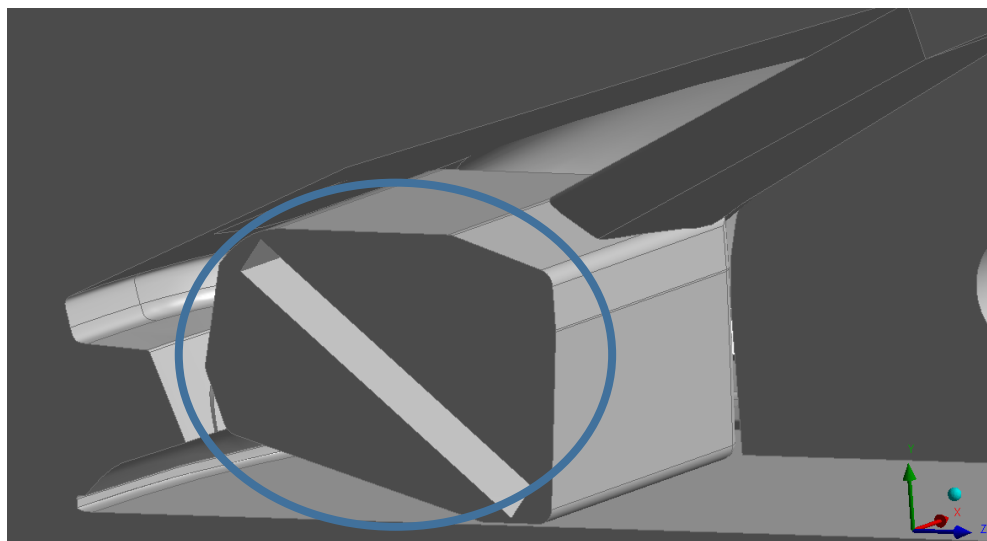


Figura 60 - Radiador e conduta de refrigeração introduzidos no interior da carroceria.

4.5.1 Propriedades da malha de elementos

Na Tabela 13 encontram-se as principais características da malha de elementos usada na simulação com condutas de refrigeração. A qualidade desta malha (“Malha 1”) justifica-se da mesma forma que foi justificada a qualidade das malhas de 4.3.1.

Tabela 13 - Propriedades da malha de elementos usada na simulação com condutas de refrigeração.

Característica	Malha 1
Tamanho de elemento [mm] – caixa 1	41
Tamanho de elemento [mm] – caixa 2	22
Tamanho de elemento [mm] – caixa 3	15
Tamanho de elemento [mm] – faces da carroceria	22
Tamanho máximo de elemento em todo o domínio [mm]	1000
Nº de nós	1841545
Nº de elementos	8768177
Razão de aspeto máxima	145.67
Qualidade ortogonal mínima	0.0530
Distorção máxima de elemento	0.974

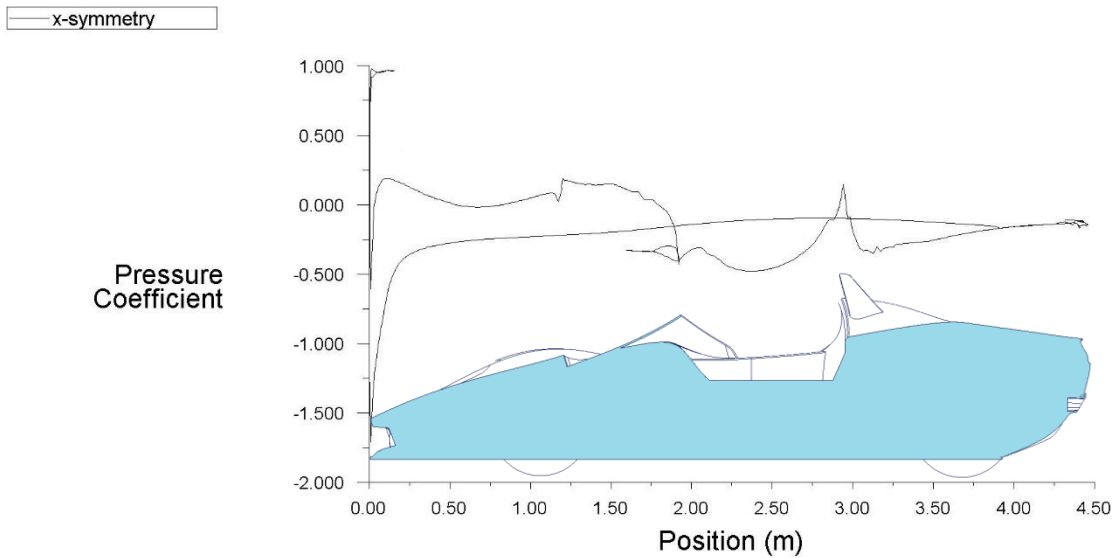
4.5.2 Resultados obtidos

Na Tabela 14 encontram-se os resultados obtidos após a simulação à carroceria com condutas de refrigeração.

O Gráfico 4 ilustra o gráfico de C_p na linha de simetria da carroceria com condutas de refrigeração. A pressão no para-brisas diminui, apesar da sua concavidade, devido à saída de ar da conduta de refrigeração (Figura 60).

Tabela 14 - Resultados obtidos na simulação com condutas de refrigeração.

Parâmetro	Malha 1
Velocidade [m/s]	41.667
Velocidade [km/h]	150
C_a	0.412
C_l	0.119
C_y	0.471
C_m	-0.917
D [N]	798
L [N]	231
Y [N]	913
M [Nm]	-1777



Pressure Coefficient	Jun 13, 2014 ANSYS Fluent 15.0 (3d, pbns, rke)
----------------------	---

Gráfico 4 - Gráfico do coeficiente de pressão C_p na linha de simetria da carroceria com condutas de refrigeração a 150 km/h.

4.6 Simulação com distância ao solo da carroceria superior à frente

O objetivo desta simulação é examinar o efeito do levantamento da frente da carroceria (por exemplo, provocado pela passagem por uma lombagem). Pretende-se averiguar se as forças aerodinâmicas provocadas pelo escoamento a 200 km/h proporcionam a continuação ou não do levantamento. Para tal, foi usado um modelo 3D em que a frente se encontra a cerca de 250 mm do solo (com a parte de trás à distância de 110 mm), correspondendo a uma lombagem de 150 mm. A Figura 61 ilustra o modelo utilizado (contendo a mesma carroceria usada nas outras simulações).

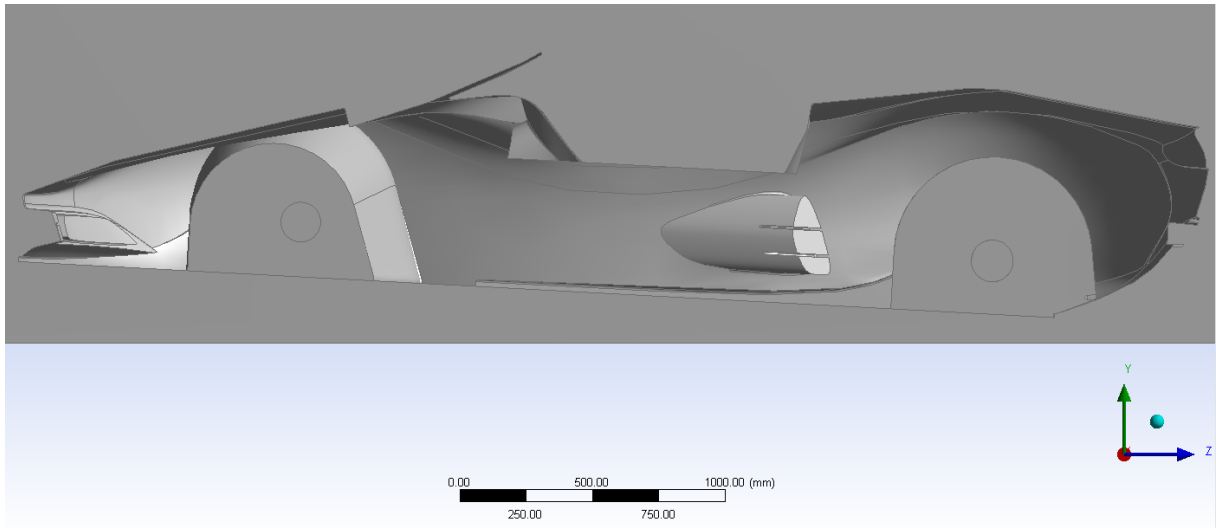


Figura 61 – Colocação da carroceria usada para a simulação com distância ao solo da carroceria superior à frente.

4.6.1 Propriedades da malha de elementos

Na Tabela 15 encontram-se as principais características da malha de elementos usada na simulação com distância ao solo da carroceria superior à frente. A qualidade da malha (“Malha 2”) justifica-se da mesma forma que a qualidade das malhas de 4.3.1.

Tabela 15 - Propriedades da malha de elementos usada na simulação com altura ao solo superior à frente.

Característica	Malha 2
Tamanho de elemento [mm] – caixa 1	41
Tamanho de elemento [mm] – caixa 2	23
Tamanho de elemento [mm] – caixa 3	18
Tamanho de elemento [mm] – faces da carroceria	22
Tamanho máximo de elemento em todo o domínio [mm]	1000
Nº de nós	1713549
Nº de elementos	8474679
Razão de aspeto máxima	81.003
Qualidade ortogonal mínima	0.0522
Distorção máxima de elemento	0.963

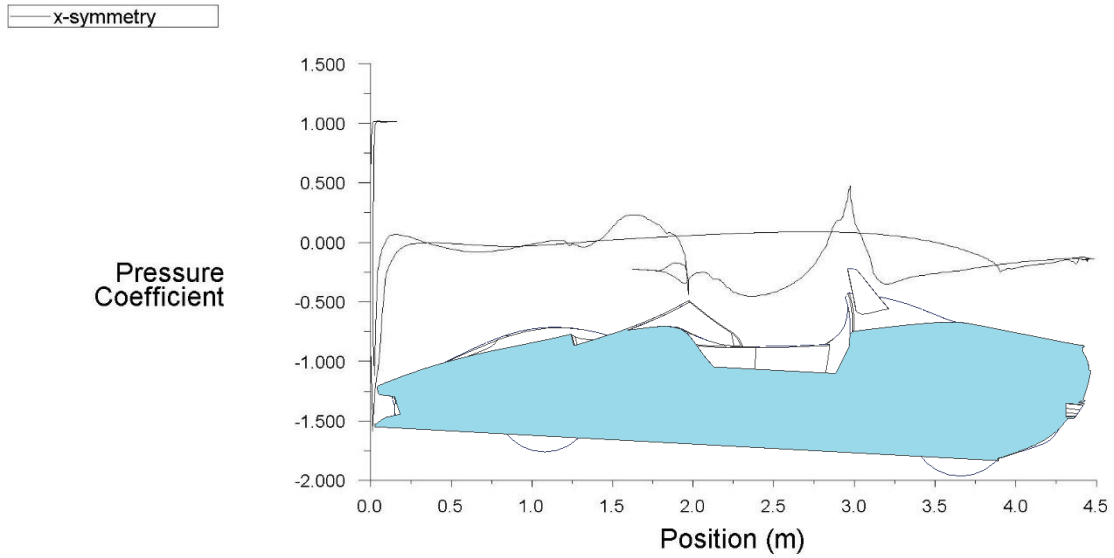
4.6.2 Resultados obtidos

Na Tabela 16 encontram-se os resultados obtidos após a simulação à carroceria com distância ao solo superior à frente.

O Gráfico 5 ilustra o gráfico de C_p na linha de simetria da carroceria com distância ao solo superior à frente. Verifica-se, analisando este gráfico, que a pressão em baixo e em cima, na frente da carroceria são idênticas e que a pressão atrás diminui consideravelmente.

Tabela 16 - Resultados obtidos na simulação com altura ao solo superior à frente.

Parâmetro	Malha 2
Velocidade [m/s]	55.556
Velocidade [km/h]	200
C_a	0.493
C_l	0.633
C_y	0.445
C_m	-0.406
D [N]	1810
L [N]	2325
Y [N]	1634
M [Nm]	-1492



Pressure Coefficient

Jun 13, 2014
ANSYS Fluent 15.0 (3d, pbns, rke)

Gráfico 5 - Gráfico do coeficiente de pressão C_p na linha de simetria da carroceria com distância ao solo superior à frente a 200 km/h.

5 Discussão de Resultados

Depois de apresentados os principais resultados obtidos, segue-se a discussão desses resultados através da comparação entre as várias situações estudadas para posterior obtenção de conclusões sobre as características aerodinâmicas da carroceria em estudo. Discutir-se-á a variação de vários fatores (coeficientes aerodinâmicos, distribuição da pressão, distribuição de vetores de velocidade e linhas de corrente) com o número de elementos das malhas, com os parâmetros das simulações e com a posição da carroceria.

5.1 Coeficientes aerodinâmicos

Os coeficientes aerodinâmicos são muito importantes para a avaliação das características aerodinâmicas da carroceria. O Gráfico 6 contém os valores dos coeficientes de arrasto e sustentação em função da velocidade. Através deste gráfico verifica-se que os valores de C_d e C_l praticamente não variam com a velocidade, de acordo com o que seria de esperar (e com o referido na revisão bibliográfica para a gama de velocidades usada). Sendo assim, o valor dos coeficientes de arrasto e sustentação obtidos para a carroceria são cerca de 0.4 e 0.11, respetivamente.

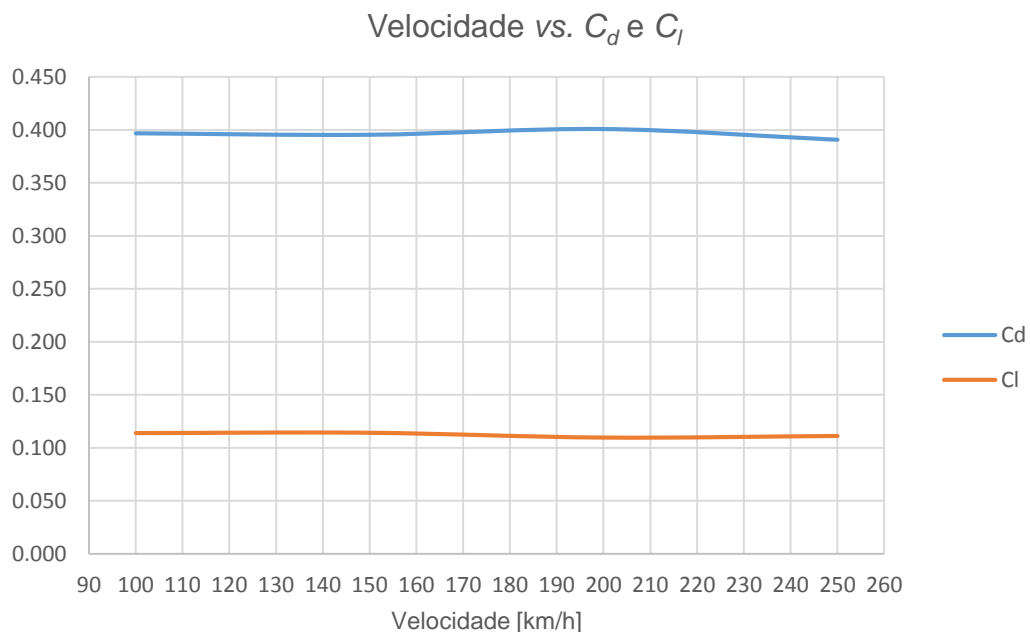


Gráfico 6 - Variação dos coeficientes de arrasto C_d e sustentação C_l com a velocidade (resultado das simulações efetuadas com a malha 8.6M).

No Gráfico 7 está representada a variação das forças de arrasto D e sustentação L com a velocidade do escoamento V_∞ . Esta variação apresenta-se com forma parabólica, como seria de esperar, devido à variação destas forças com o quadrado da velocidade (valores retirados do ANSYS *Fluent*). Estes resultados derivam das simulações em que se obtiveram os valores dos coeficientes aerodinâmicos presentes no Gráfico 6.

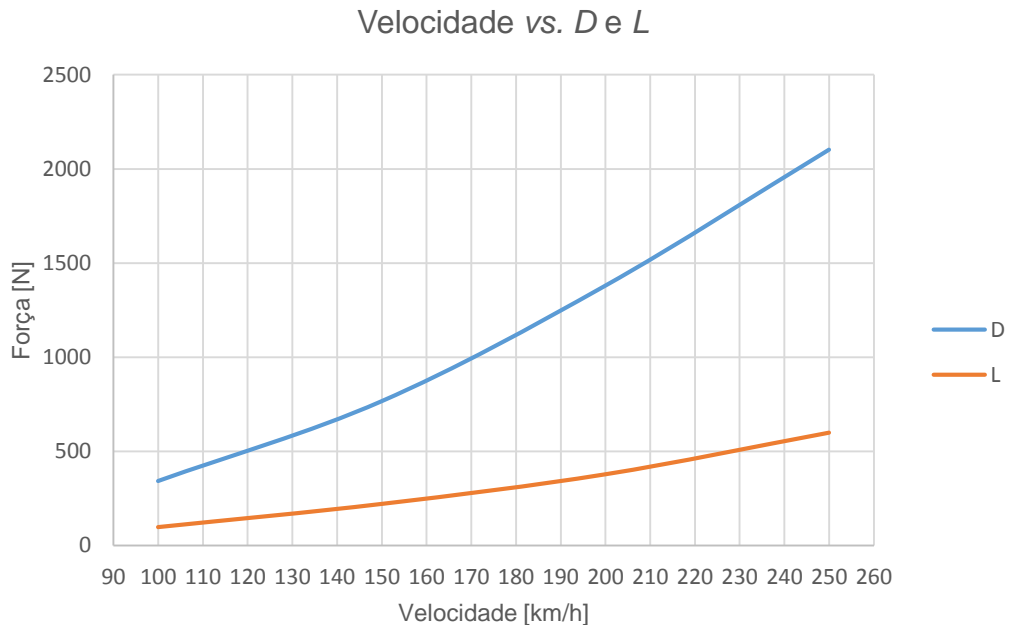


Gráfico 7 - Variação das forças de arrasto D e sustentação L com a velocidade do escoamento V_∞ .

Analisada a variação dos coeficientes aerodinâmicos com a velocidade, segue-se a análise da variação destes coeficientes com o número de elementos da malha. O Gráfico 8 contém a variação dos coeficientes de arrasto C_d e sustentação C_l com o número de elementos da malha.

Observando as curvas do gráfico, verifica-se que o coeficiente de arrasto tende a diminuir com o aumento do número de elementos da malha e, por sua vez, o coeficiente de sustentação aumenta. Verificou-se um pequeno aumento do coeficiente de arrasto da malha 8.6M para a 10.5M (ver Tabela 9) que pode ser explicado pela inconsistência dos tamanhos de elemento atribuídos às caixas de controlo.

Pode-se admitir que os resultados obtidos nas simulações com malhas mais refinadas, ou seja, com mais elementos, são mais precisos. Isto pode ser justificado com o facto de as superfícies da carroceria apresentarem superior definição quando divididas em elementos mais pequenos. Também a superior definição do volume, no qual se encontram as linhas de corrente que definem o escoamento, contribui para a precisão dos resultados. [3]

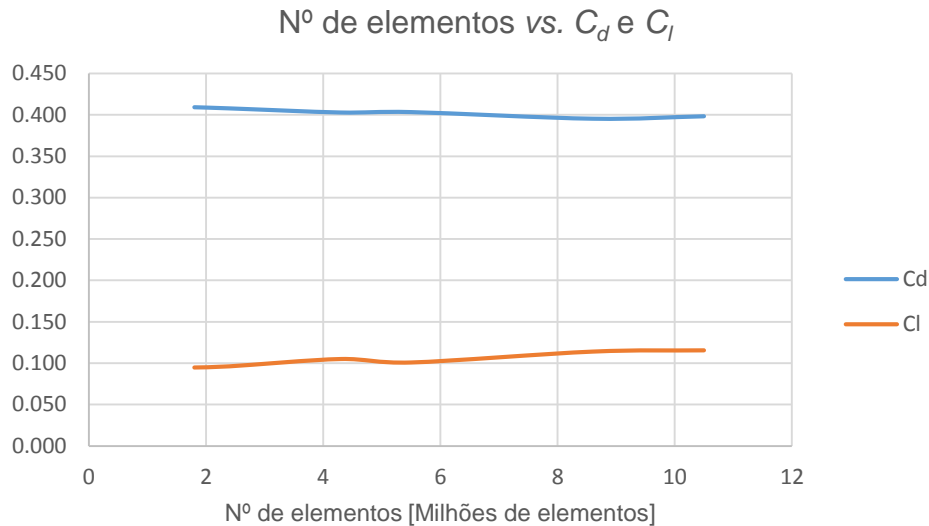


Gráfico 8 - Variação dos coeficientes de arrasto C_d e sustentação C_l com o número de elementos da malha.

Comparando agora a variação dos coeficientes aerodinâmicos (C_d e C_l) com as diferentes situações estudadas (Gráfico 9), é possível perceber os efeitos da variação da distância ao solo e das condutas de refrigeração.

Analisando o gráfico, verifica-se que os coeficientes aerodinâmicos aumentam com a distância ao solo e com a introdução de condutas internas. Diminuindo a distância ao solo, estes coeficientes diminuem também.

Na situação em que a distância ao solo é superior à frente, existe um aumento drástico do coeficiente de sustentação (cerca de 455%), sendo o aumento do coeficiente de arrasto mais contido (25%). Os fatores responsáveis pelo aumento dos coeficientes aerodinâmicos são o aumento da área frontal e a posição desfavorável da carroceria. A inclinação da carroceira proporciona a incidência direta do fluxo de ar no fundo plano, elevando assim o coeficiente de sustentação.

No caso da carroceria com menor distância ao solo, a diminuição do coeficiente de arrasto é proveniente da diminuição da área frontal (o arrasto diminui cerca de 7%). A diminuição do coeficiente de sustentação (cerca de 36%), além de ser consequência da diminuição da área frontal, é também consequência da superior velocidade do escoamento que passa por baixo da carroceria, diminuindo a pressão e consequente diminuição da sustentação positiva (efeito da proximidade ao solo). Na carroceria com distância ao solo superior, a justificação para o aumento dos coeficientes aerodinâmicos (aumento de 6% no arrasto e 30% na sustentação) é contrária à referida para a carroceria de menor distância ao solo. Assim, o aumento da área frontal contribui para o aumento dos coeficientes e a menor velocidade do escoamento que passa por baixo da carroceria resulta em maior pressão e, consequentemente, maior sustentação positiva.

Na carroceria com condutas de refrigeração, apesar de a área frontal se manter, os coeficientes aerodinâmicos também aumentam (aumento de 4% no arrasto e 5% na sustentação) devido ao aumento da área de carroceria que perturba o escoamento (resistência provocada pelas condutas) e à perda de quantidade de movimento no interior das condutas, aumentando assim as forças de viscosidade e de pressão.

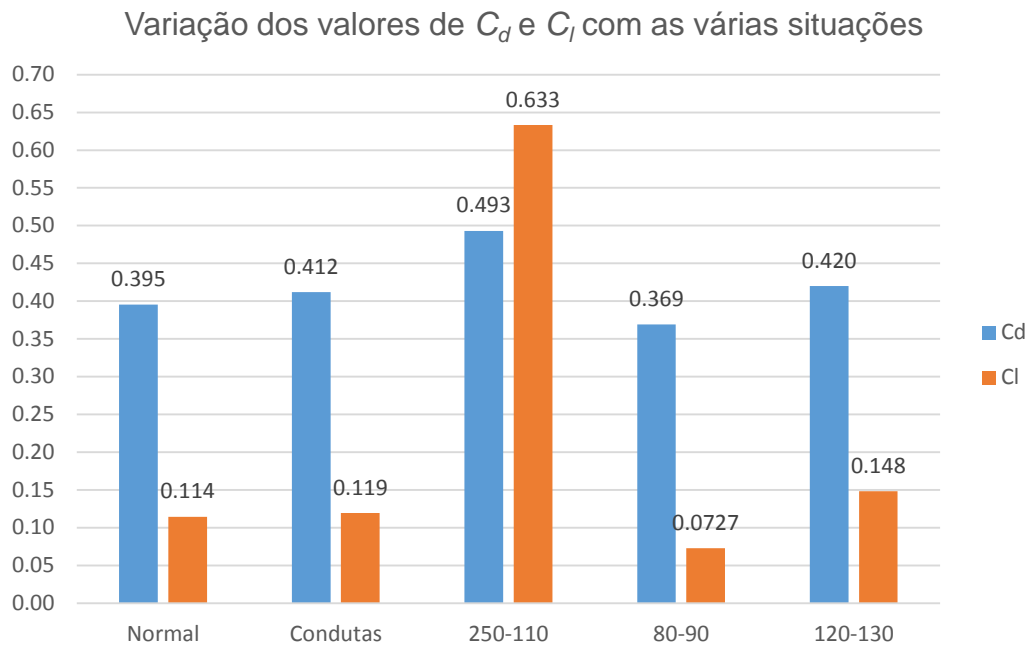


Gráfico 9 - Variação dos coeficientes de arrasto C_d e sustentação C_l com as diferentes situações estudadas.

Analisando agora os resultados obtidos através da simulação realizada com o modelo de turbulência RSM em situação normal e com a malha 8.6M, verifica-se que o coeficiente de arrasto manteve-se em 0.4 e que o coeficiente de sustentação é cerca de 52% mais baixo (os restantes coeficientes também se mantiveram praticamente iguais). Como o ANSYS *Fluent* encontrou dificuldades em convergir a solução, este resultado não será discutido neste trabalho, sendo proposto como trabalho futuro um estudo mais aprofundado do uso deste modelo de turbulência.

5.2 Gráficos do coeficiente de pressão

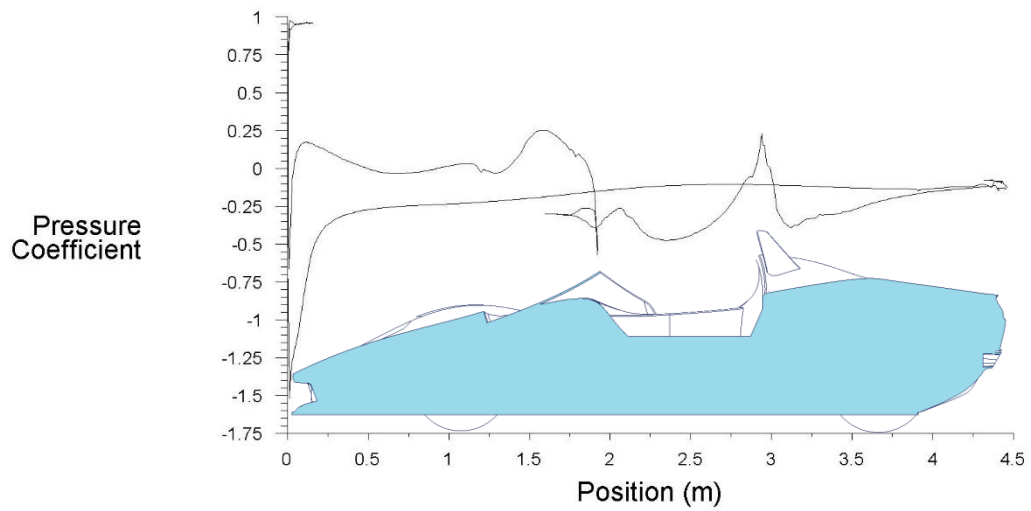
A comparação dos gráficos de C_p nas linhas de simetria das carrocerias das situações estudadas é eficaz para a compreensão dos resultados obtidos.

O Gráfico 10 ilustra os gráficos de C_p na situação normal e com distância ao solo superior à frente. Observando estes gráficos, verifica-se que o coeficiente de pressão baixa na parte de cima da carroceria e sobe na parte de baixo, da situação normal para a de distância ao solo superior à frente. As principais diferenças entre os dois gráficos estão marcadas pelas zonas 1 e 2. Através da zona 1, verifica-se que, devido à incidência mais suave do escoamento em cima e mais direta em baixo o C_p desce e aumenta, respetivamente. Na zona 2, verifica-se a aceleração do fluxo de ar à saída do fundo plano que resulta na descida do C_p .

Assim, a distribuição de pressão no fundo plano e no capô apresentam diferenças mais significativas. As restantes zonas mantêm-se idênticas à situação normal.

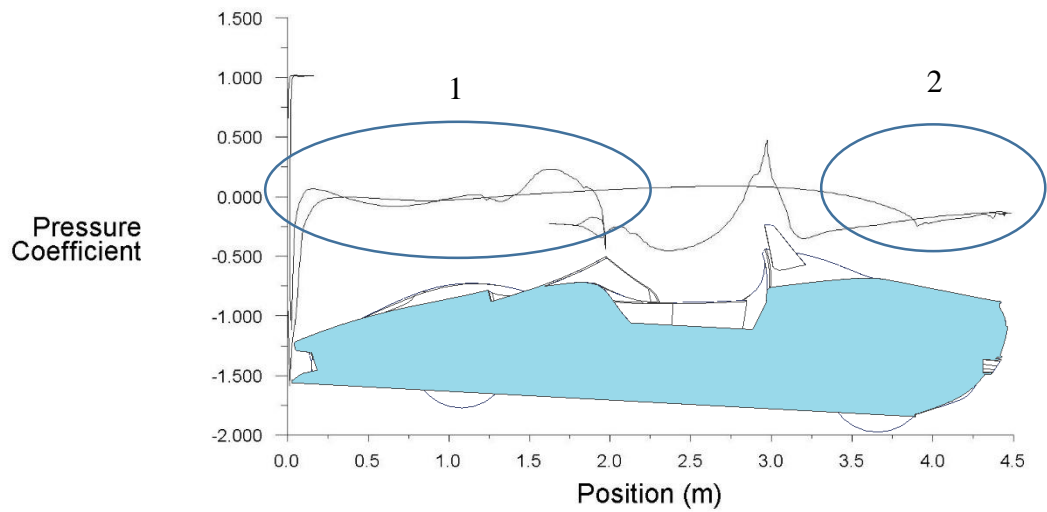
No Gráfico 11 encontra-se o gráfico de C_p da carroceria com condutas de refrigeração. Verifica-se que a única diferença (zona marcada) reside no C_p do para-brisas. Nesta situação, devido ao fluxo de ar proveniente da saída da conduta de refrigeração, a pressão no para-brisas não sobe, anulando-se o efeito da sua concavidade.

x-symmetry



Pressure Coefficient Jun 13, 2014
ANSYS Fluent 15.0 (3d, pbns, rke)

x-symmetry



Pressure Coefficient Jun 13, 2014
ANSYS Fluent 15.0 (3d, pbns, rke)

Gráfico 10 - Gráficos do coeficiente de pressão na linha de simetria da carroceria em situação normal (em cima) e carroceria com distância ao solo superior à frente (em baixo).

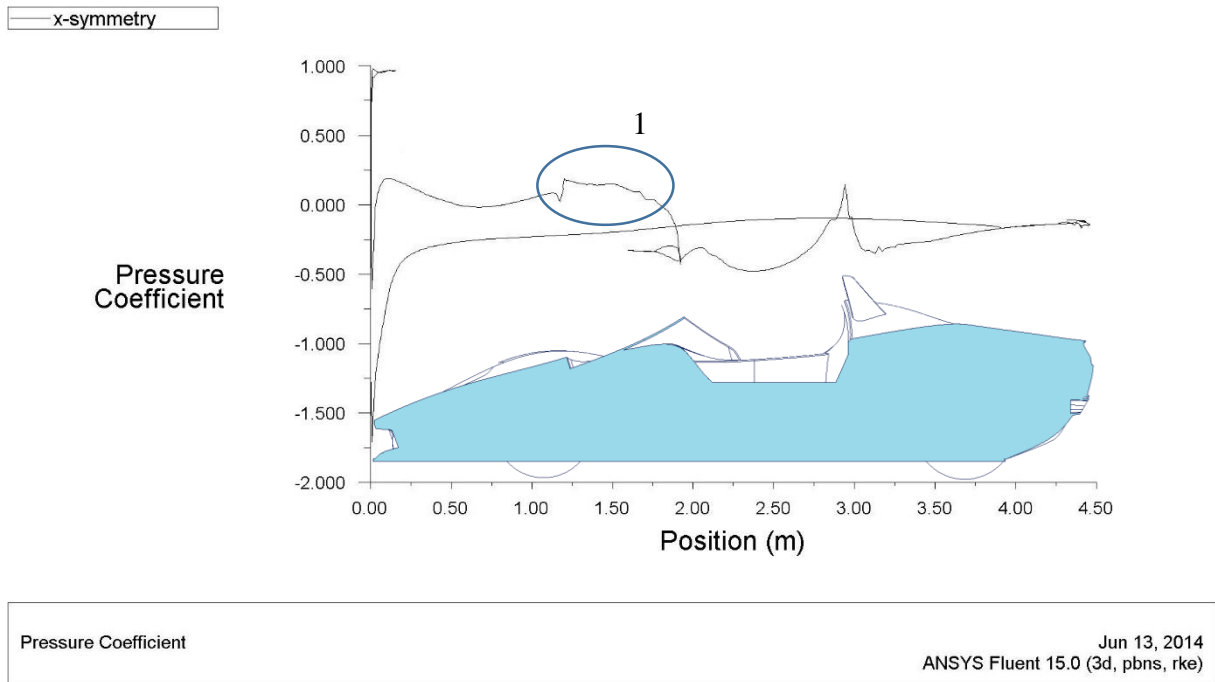


Gráfico 11 - Gráfico de C_p na linha de simetria da carroceria com condutas de refrigeração.

5.3 Distribuição da pressão

A distribuição da pressão na superfície da carroceria vai ser analisada nesta secção, dada a sua importância para o estudo da aerodinâmica do automóvel em questão.

A Figura 62 ilustra a distribuição da pressão na carroceria resultante das simulações em situação normal, às velocidades de 150 km/h e 250 km/h. Verifica-se que a distribuição da pressão é idêntica para ambas as velocidades (assim como para as restantes), estando a única diferença nos valores absolutos da pressão.

Além da distribuição da pressão ser idêntica, também outros fatores se mantêm da mesma forma. Esses fatores são a esteira formada e os dois vórtices, a recirculação do fluxo de ar no interior do habitáculo, a distribuição de vetores de velocidade e a distribuição de y^+ na parede (apenas se alteram os valores absolutos).

Da Figura 63 retira-se que, aumentando a distância ao solo à frente em 150 mm, a distribuição da pressão altera-se e o valor absoluto desta diminui na parte superior da carroceria.

Estão presentes no Anexo A imagens complementares que ajudam na compreensão dos factos referidos.

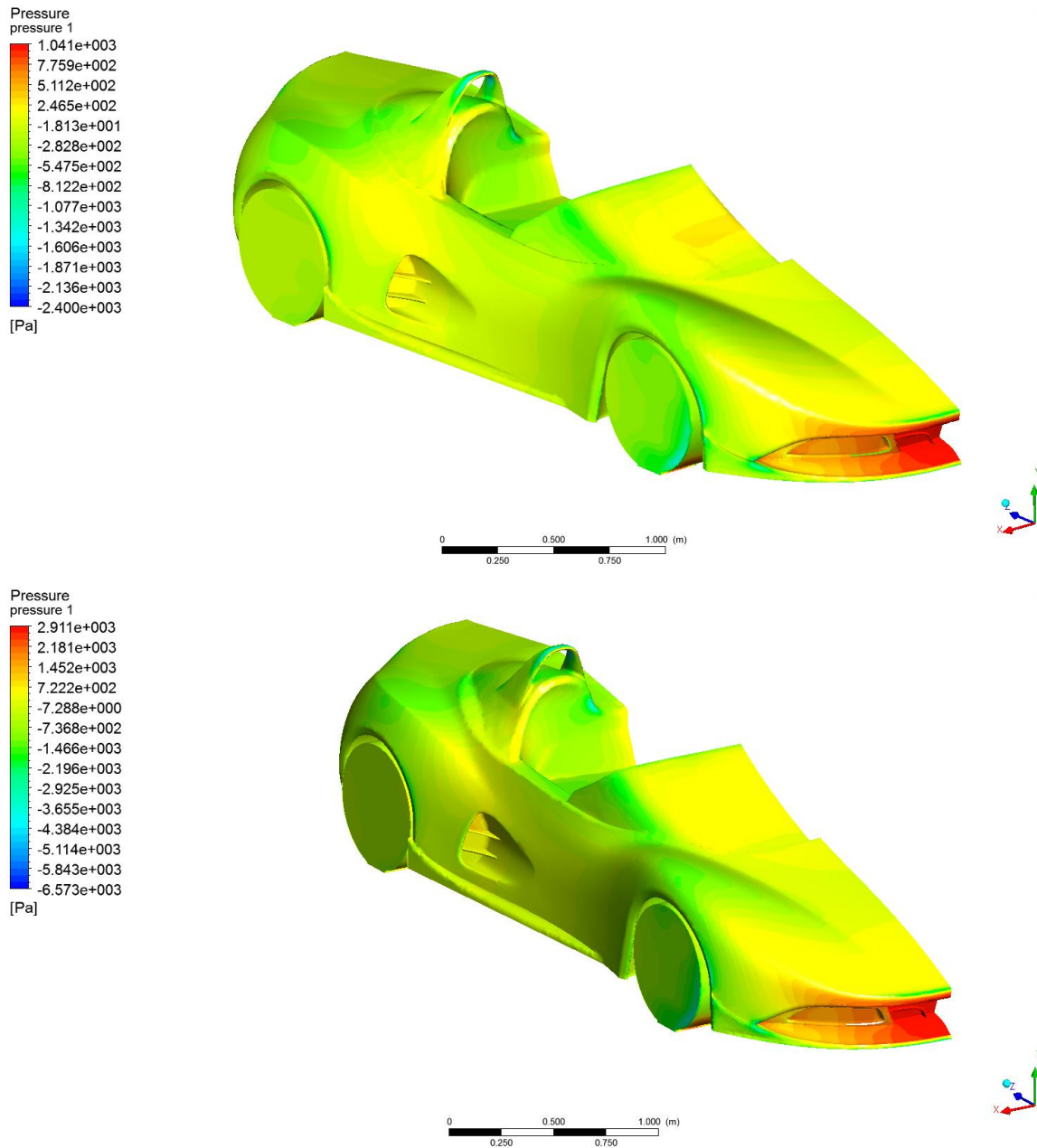


Figura 62 - Distribuição da pressão na carroceria a 150 km/h (em cima) e 250 km/h (em baixo).

Na presença de condutas de refrigeração, verifica-se que distribuição de pressão no para-brisas é alterada (o efeito da concavidade do para brisas é atenuado), assim como a distribuição de pressão na frente da carroceria (devido à entrada de ar).

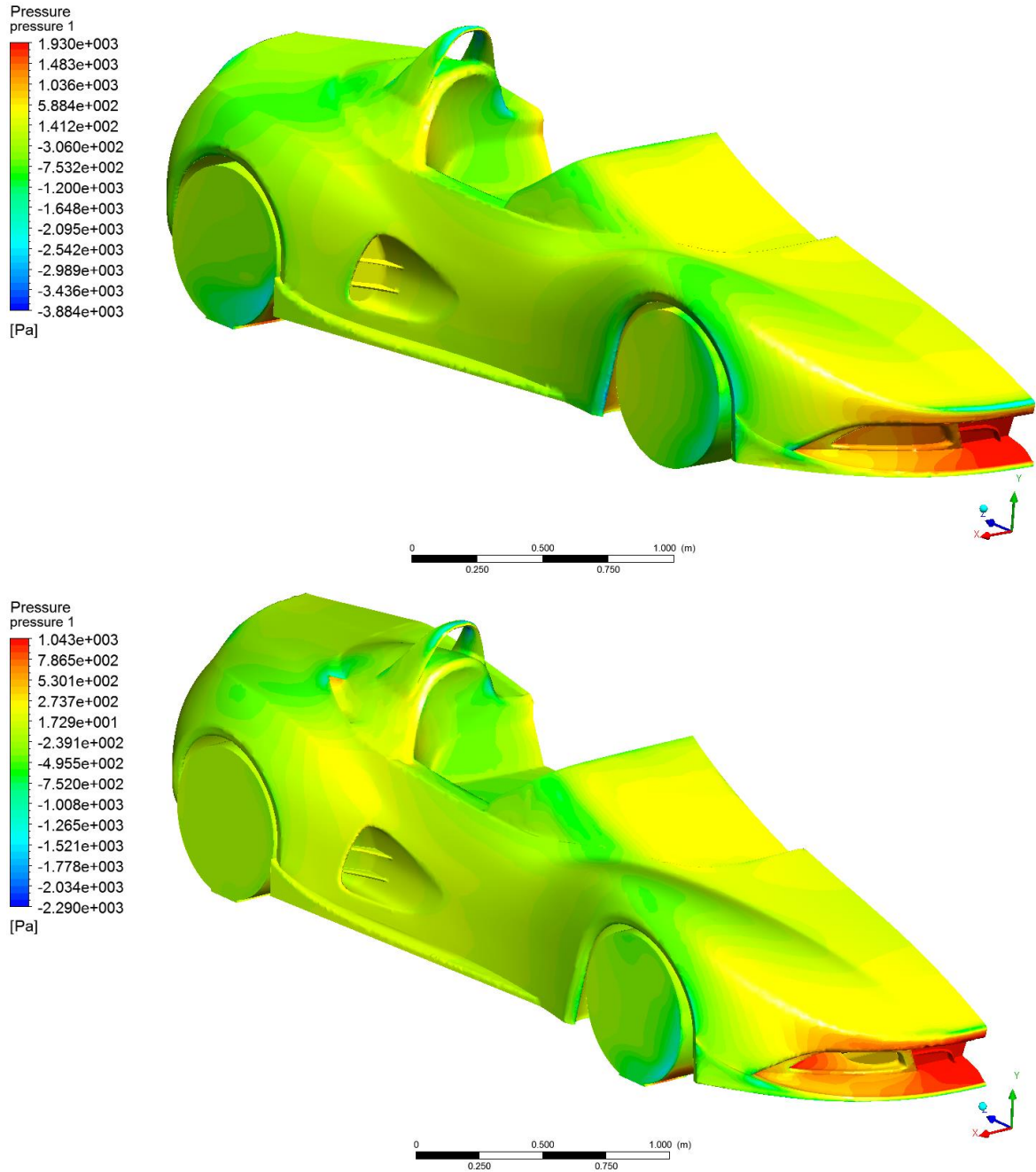


Figura 63 - Distribuição da pressão na carroceria com distância ao solo superior à frente a 200 km/h (em cima) e carroceria com condutas de refrigeração a 150 km/h (em baixo).

5.4 Distribuição de vetores de velocidade

Comparando a Figura 64 com a Figura 65 verifica-se que o aumento da distância ao solo à frente altera, principalmente, a esteira (onde os dois vórtices desta se tornam mais pequenos). Isto resulta da diminuição do ângulo de inclinação do para-brisas em relação à horizontal e do efeito do afinilamento na base onde o ar desacelera ao longo desta, aumentando rapidamente a sua velocidade depois de sair. Na carroceria em posição normal isto não acontece (a velocidade descrece até à esteira). Este decrescimento da velocidade resulta do efeito da viscosidade no fundo plano e na estrada.

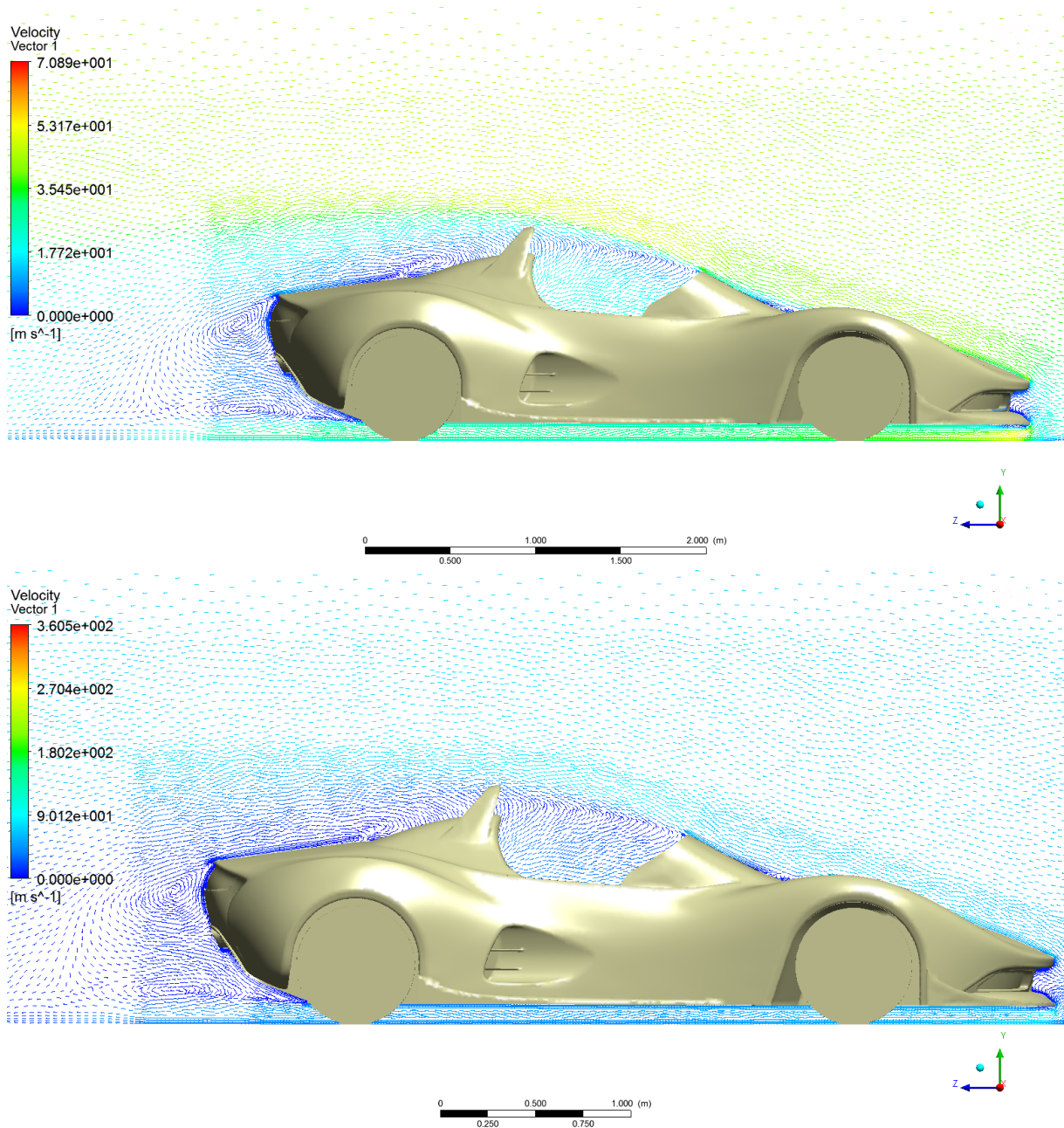


Figura 64 - Distribuição de vetores de velocidade no plano de simetria da carroceria em situação normal a 150 km/h (em cima) e 250 km/h (em baixo).

No caso da carroceria com condutas de refrigeração, a distribuição de vetores no plano de simetria é semelhante à da situação normal, com exceção da ausência do pequeno vórtice no início do para-brisas (Figura 66).

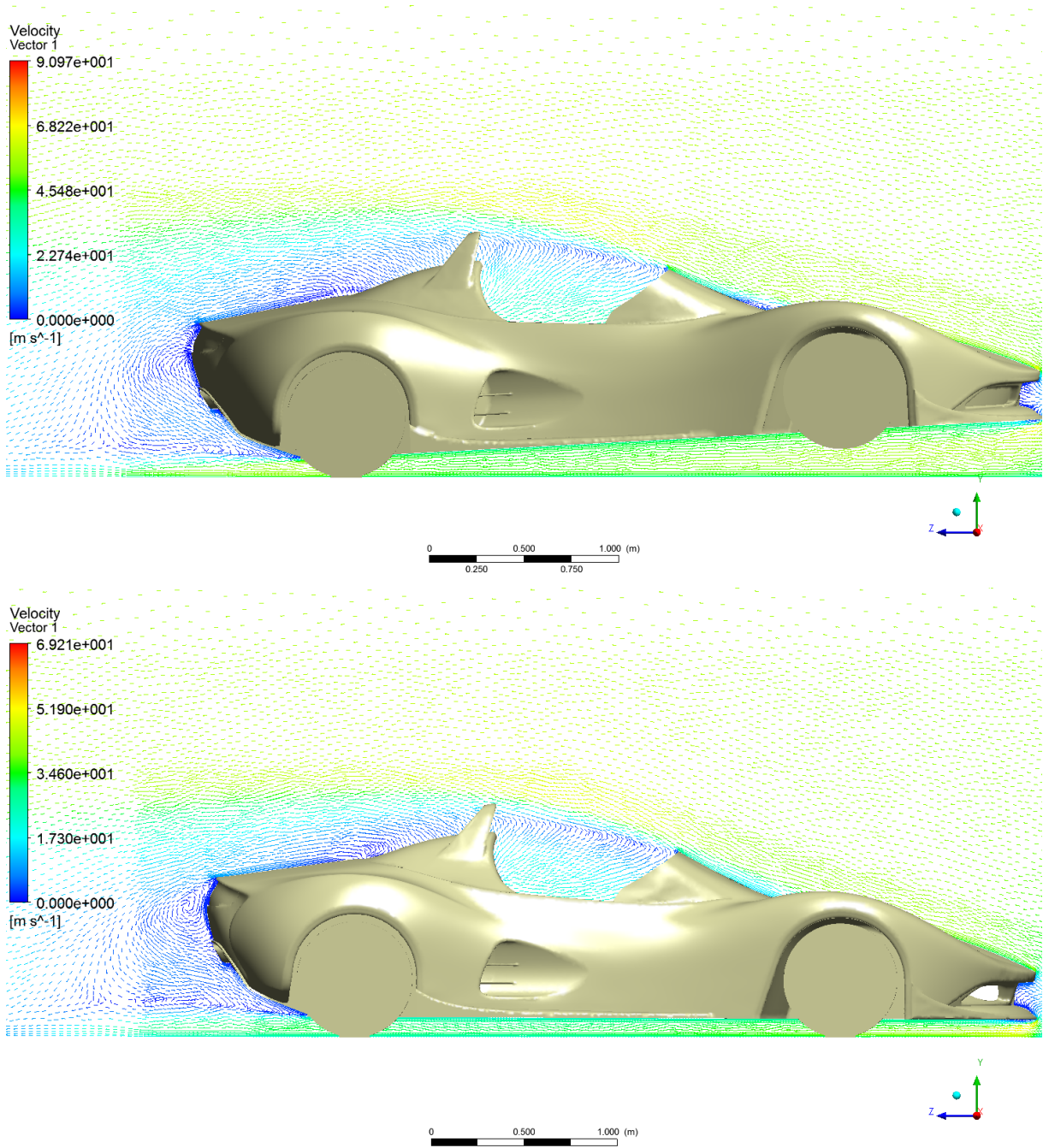


Figura 65 - Distribuição de vetores de velocidade no plano de simetria na carroceria com distância ao solo superior à frente a 200 km/h (em cima) e carroceria com condutas de refrigeração a 150 km/h (em baixo).

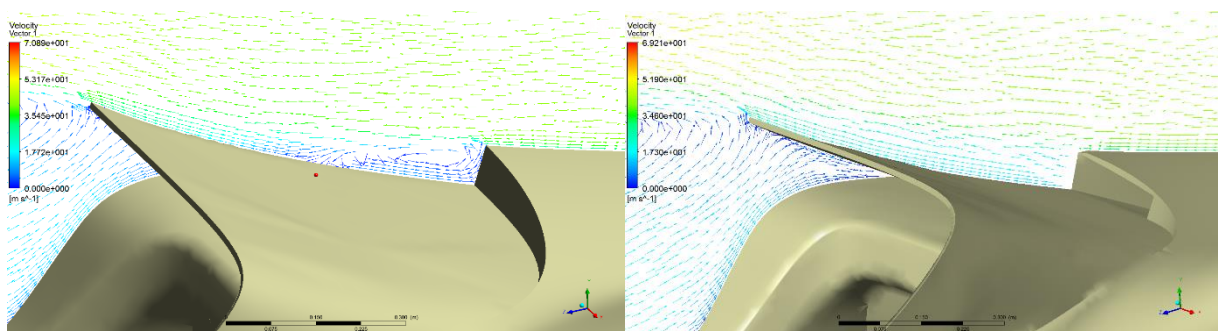


Figura 66 – Distribuição de vetores de velocidade no plano de simetria (zona do para-brisas) da carroceria em situação normal (à esquerda) e com condutas de refrigeração (à direita).

5.5 Linhas de corrente

As linhas de corrente fornecem informações importantes sobre o escoamento de ar em torno de uma carroceria. De entre essas informações destacam-se as separações de escoamento e os vórtices gerados.

Na Figura 67 estão ilustradas as linhas de corrente correspondes à situação normal e à situação com distância ao solo superior à frente.

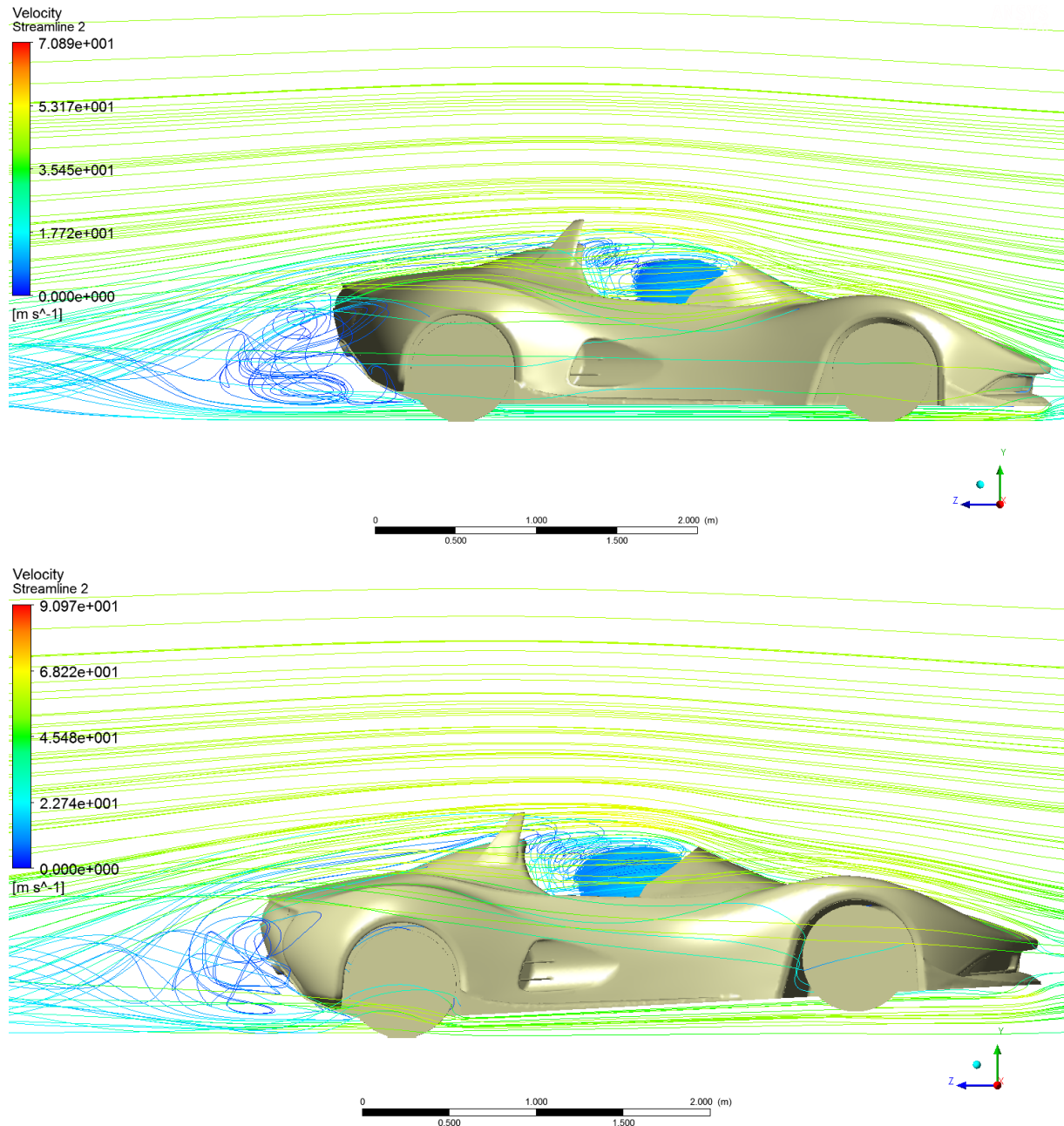


Figura 67 - Linhas de corrente em torno da carroceria em situação normal a 150 km/h (em cima) e com distância ao solo superior à frente a 200 km/h (em baixo).

Através desta figura podem ser identificados os vórtices presentes na esteira e no habitáculo (recirculação do fluxo de ar comum em automóveis com habitáculo aberto). Também se visualizam as separações de escoamento (na extremidade superior do para-brisas, na parte de trás da carroceria e nas cavas das rodas). Outro fator visível é o escoamento ligado à carroceria nas restantes zonas.

Comparando as duas carrocerias, a diferença mais significativa reside na esteira (já anteriormente referido). Os dois vórtices da esteira são menos perceptíveis e mais pequenos na situação de maior distância ao solo à frente. Isto acontece devido à menor inclinação da parte inferior da traseira (a seguir ao fundo plano), diminuindo o efeito de separação de escoamento.

A Figura 68 ilustra as linhas de corrente em torno da carroceria com condutas de refrigeração. Esta distribuição é idêntica à da situação normal, sendo possível identificar que a única diferença reside nas linhas de corrente na frente, no para-brisas e na entrada de ar lateral.

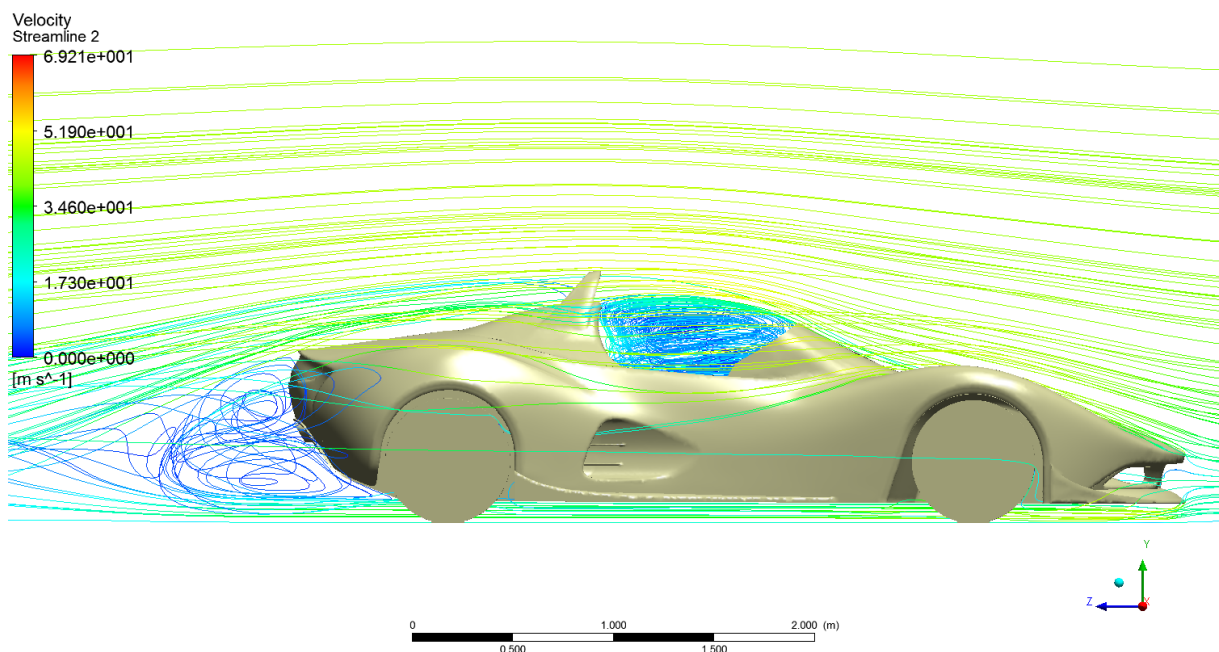


Figura 68 - Linhas de corrente em torno da carroceria com condutas de refrigeração a 150 km/h.

5.6 Considerações finais

O valor de C_d em situação normal, admitindo uma precisão aceitável dos resultados obtidos (é difícil saber quão precisos são os resultados sem nenhuma referência que sirva de base) e que definirá o coeficiente de arrasto deste veículo, apresenta um valor relativamente elevado ($C_d = 0.4$) não sendo considerado, nos dias que correm, muito bom (ver Tabela 2). Este resultado tem várias explicações possíveis. A primeira consiste na possibilidade dos resultados das simulações CFD não apresentarem a devida precisão (com mais capacidade computacional, e consequente malha com superior número de elementos, talvez fosse possível obter um valor mais baixo, [3]) e pode-se admitir que o coeficiente de arrasto obtido através de uma análise

real em túnel de vento possa ser inferior. Depois, a forma desportiva com tendência a diminuir a sustentação pode contribuir para o valor relativamente elevado do arrasto (ver secção 2.2.3). O coeficiente de sustentação obtido é relativamente baixo e pode também ser explicado pela forma desportiva da carroceria. Através do que foi discutido e da observação das várias figuras apresentadas, pode-se considerar que o *spoiler* de consideráveis dimensões presente na frente da carroceria, as várias entradas de ar e o habitáculo aberto são os principais responsáveis para o valor do coeficiente de arrasto obtido.

O facto de as rodas e a estrada se apresentarem estacionárias também contribui para um superior coeficiente de arrasto. [2, 17]

Devido às características desportivas do automóvel em questão, as entradas de ar e o *spoiler* da frente são importantes (apesar de aumentarem o arrasto do veículo), sendo as várias entradas de ar para arrefecimento acrescido dos componentes mecânicos e alimentação de ar para o motor (que neste caso se encontra na parte de trás do veículo) e o *spoiler* para geração de força descendente que melhora a performance em curva e estabilidade do veículo. Este *spoiler* contribui para o relativamente baixo coeficiente de sustentação obtido ($C_l = 0.11$), assim como o fundo plano e o para-brisas côncavo. Contudo, há um desequilíbrio aerodinâmico acentuado na carroceria que pode ser perceptível pela análise das figuras e pelo valor do momento aerodinâmico aplicado no centro geométrico de cerca de -0.894 (é elevado e tende a levantar a traseira do veículo podendo causar instabilidade a velocidades elevadas). Este desequilíbrio poderia ser reduzido através da aplicação de um apêndice aerodinâmico como por exemplo um perfil alar (asa), na parte de trás, que produza uma força descendente na ordem dos 300 N a 150 km/h (metade do valor obtido no Anexo C), diminuindo assim o efeito do *spoiler* frontal e melhorando a estabilidade a elevadas velocidades. Teriam de ser efetuadas simulações com várias asas para determinar qual a que produz a força descendente e momento M_P (*pitch*) pretendidos. Refira-se que o valor calculado para a força da asa é apenas uma estimativa, representando o valor necessário para reduzir o momento M_P para metade. Este valor variará com a velocidade do automóvel, tendo sido calculado apenas para 150 km/h.

A concavidade do para-brisas é benéfica para o conforto dos passageiros porque reduz o fluxo de ar que o entra no habitáculo (ver figuras de distribuição de vetores e de linhas de corrente). Mas este efeito pode aumentar a sustentação na parte de trás devido à separação de escoamento resultante ser mais intensa. O para-brisa desvia as linhas de corrente para cima, fazendo com que estas se tornem mais afastadas da parte de trás da carroceria, aumentando a sustentação. Verifica-se que a recirculação do fluxo de ar (proveniente dos lados do para-brisas) pode ser desconfortável para os passageiros. Como tal, a adição de vidros laterais e de um defletor de vento na zona entre as “bossas”, atrás do habitáculo, resolveriam este inconveniente (ver secção 2.2.6). Além destas propostas, um arredondamento transversal da zona de ataque do para-brisas poderá diminuir a recirculação do ar no interior do habitáculo. Esta solução não pode ser confirmada, sendo necessário o seu estudo através da realização de novas simulações.

A pequena extremidade no fim do fundo plano (rodeada a vermelho na Figura 69) provoca uma pequena separação de escoamento contribuindo para o aumento da sustentação (principalmente na carroceria com distância ao solo superior à frente). Para melhorar as características aerodinâmicas da carroceria (baixando o arrasto e a sustentação), modificar esta zona para que o fundo plano e a superfície que se segue formem uma só, seria uma alteração benéfica para o arrasto total.

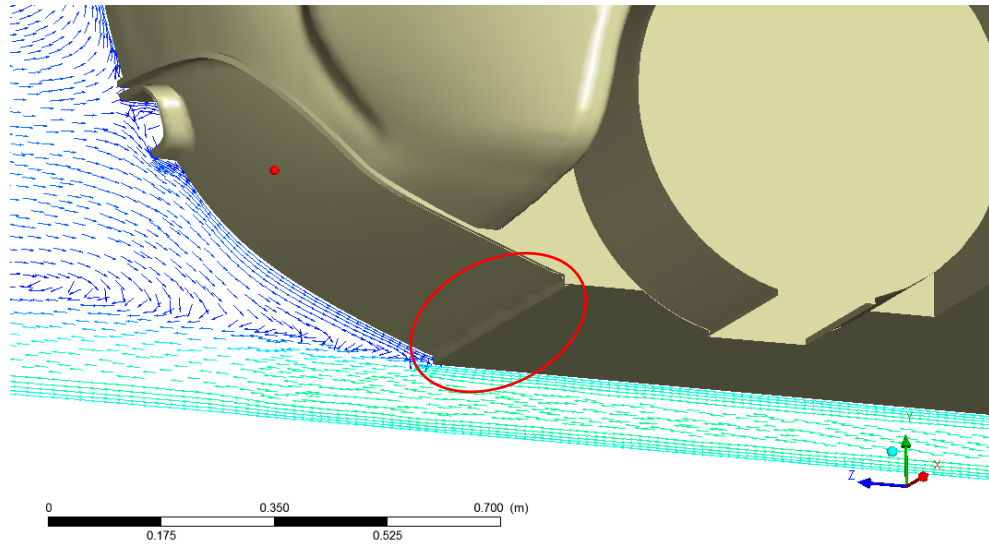


Figura 69 - Parte inferior traseira da carroceria.

Para uma futura produção do automóvel, sendo esta carroceria fabricada em fibra de vidro, é de salientar que as zonas a ter em atenção (onde é necessária uma superior resistência do material) correspondem às que apresentam cores laranja, vermelho, verde intermédio e azul na Figura 70. Nestas zonas, as forças aerodinâmicas são mais intensas (fletindo o material da carroceria para fora ou para dentro, se a pressão relativa é positiva ou negativa, respetivamente), destacando-se a frente da carroceria (principalmente o *spoiler*) e o para-brisas.

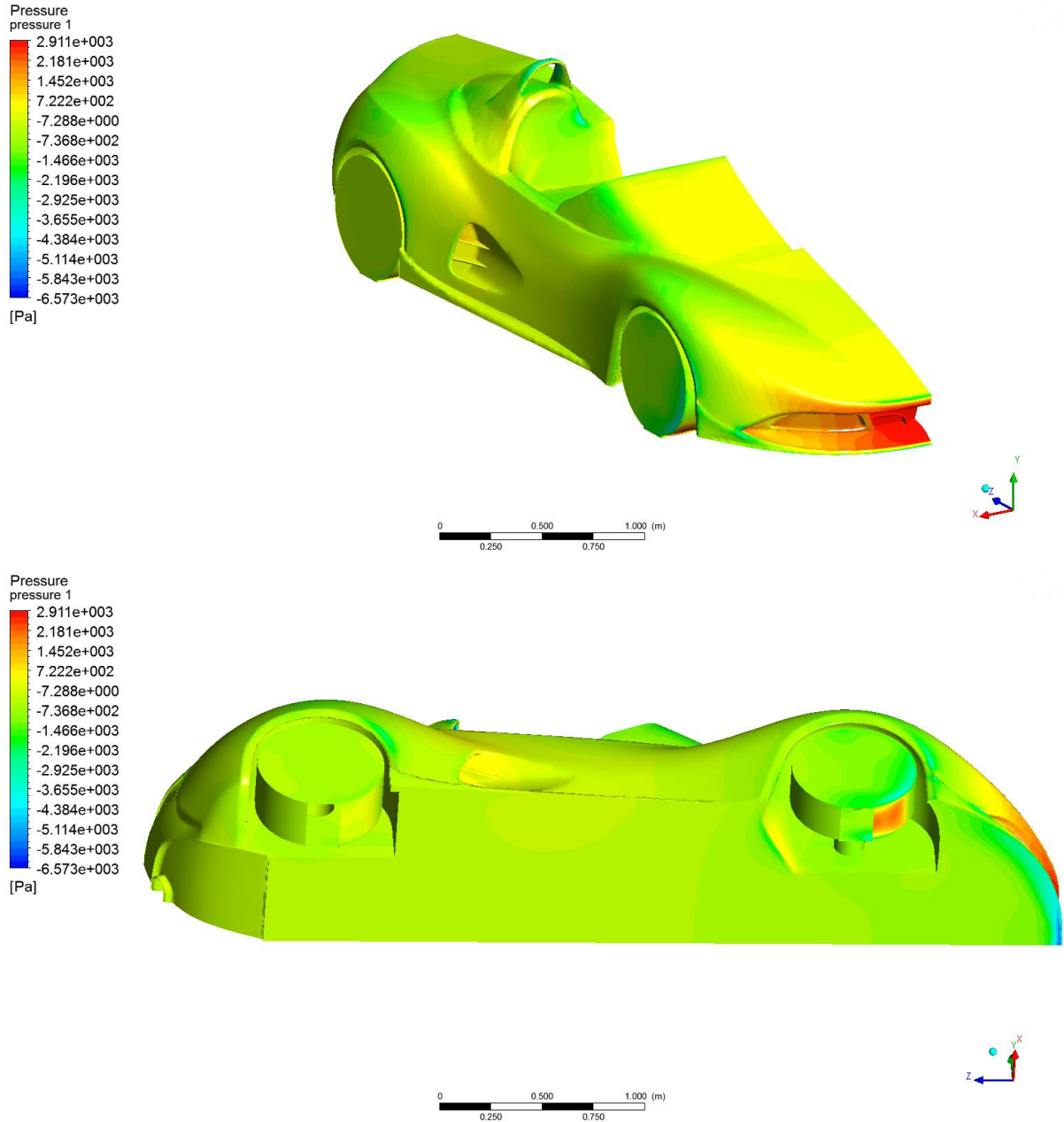


Figura 70 – Distribuição da pressão na carroceria em situação normal a 250 km/h (as zonas a azul são de especial reforço para cargas aerodinâmicas).

6 Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões

Este projeto teve como principal objetivo o estudo da aerodinâmica de uma carroceria de um automóvel desportivo para determinação das suas características aerodinâmicas, assim como possíveis alterações à sua forma.

O processo de desenvolvimento deste trabalho consistiu em várias fases, essenciais para a sua conclusão. Começando pela pesquisa bibliográfica, passando pela aprendizagem dos programas necessários à realização das simulações CFD, realização das próprias simulações (pré-cálculo, cálculo e pós-cálculo) e finalizando na análise de resultados.

Pode-se concluir, primeiramente, que se confirmou a independência das características aerodinâmicas (coeficientes aerodinâmicos como C_p , etc.) da carroceria da velocidade na gama do número de *Reynolds* em que se situam as velocidades analisadas (100 a 250 km/h).

A carroceria estudada apresenta um coeficiente de arrasto de cerca de 0.4 e um coeficiente de sustentação de cerca de 0.11 (em condições normais de simulação em túnel de vento).

O coeficiente de arrasto diminui com o aumento do número de elementos da malha enquanto o coeficiente de sustentação aumenta (esta variação não é muito significativa). Estes coeficientes diminuem com a diminuição da distância ao solo da carroceria e aumentam quando a distância ao solo também aumenta. Nos casos estudados, uma diminuição de 20 mm na distância ao solo resulta em menos 7% de arrasto e menos 36% de sustentação, e um aumento de 20 mm na distância ao solo resulta em mais 6% de arrasto e mais 30% de sustentação.

Aumentando a distância ao solo na parte da frente da carroceria resulta num aumento do coeficiente de arrasto e um aumento significativo do coeficiente de sustentação. No caso estudado, a distância aumentada é de 150 mm (resultando num aumento de 25% do arrasto e 455% da sustentação), verificando-se que não é suficiente para provocar um levantamento resultante das forças aerodinâmicas, provocando um acidente no caso de isso acontecer ao veículo real – independentemente da massa do veículo, pois as forças aerodinâmicas continuam a produzir um momento de *pitch* (no centro geométrico) que atua favoravelmente ao peso ($C_m = -0.406$).

A introdução de condutas de refrigeração, assim como um radiador na frente, aumenta ligeiramente os valores dos coeficientes aerodinâmicos (C_d e C_l aumentam 4% e 5%, respetivamente), consequência das forças viscosas e de pressão extra que estes componentes originam.

Foi possível, através dos resultados obtidos, verificar quais as zonas da carroceria que necessitam de maior resistência do material em que vai ser construída - destacando-se a frente da carroceria e o para-brisas.

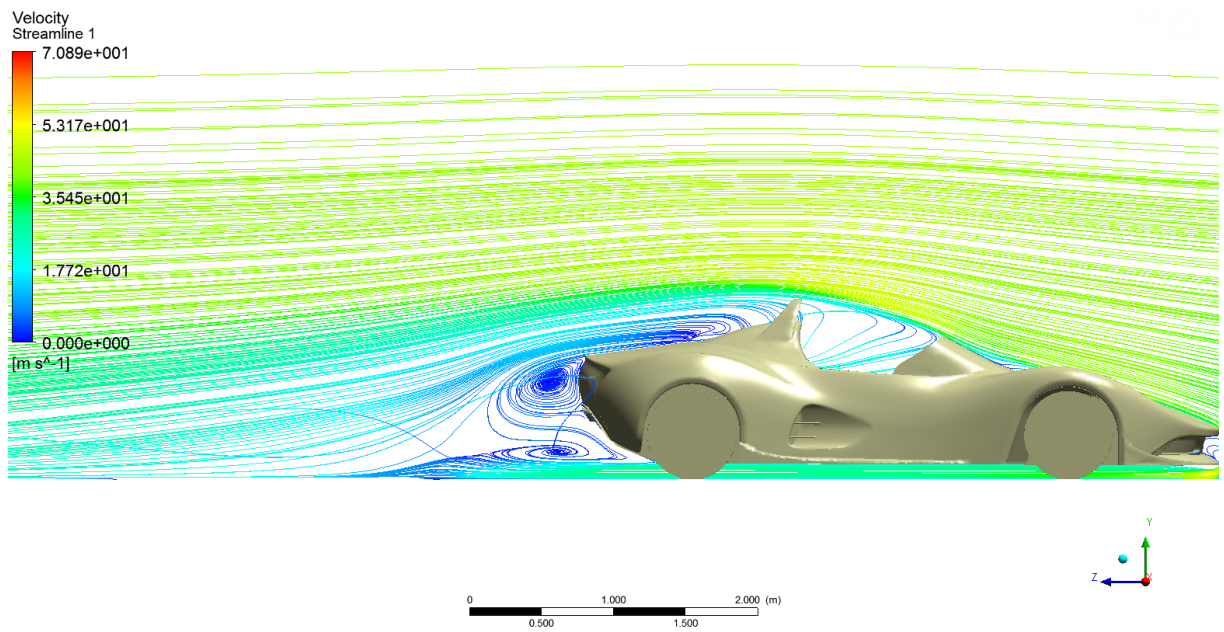
6.2 Trabalhos futuros

Existem muitos aspetos aerodinâmicos que podem ser estudados futuramente. Seria interessante efetuar análises de incidência de ventos laterais, análises com as alterações propostas aplicadas ao modelo 3D, análises em que a carroceria possui um apêndice aerodinâmico (perfil alar) na parte de trás, um estudo mais aprofundado das condutas de refrigeração e, por fim, um estudo com um modelo à escala ou em tamanho real, em túnel de vento.

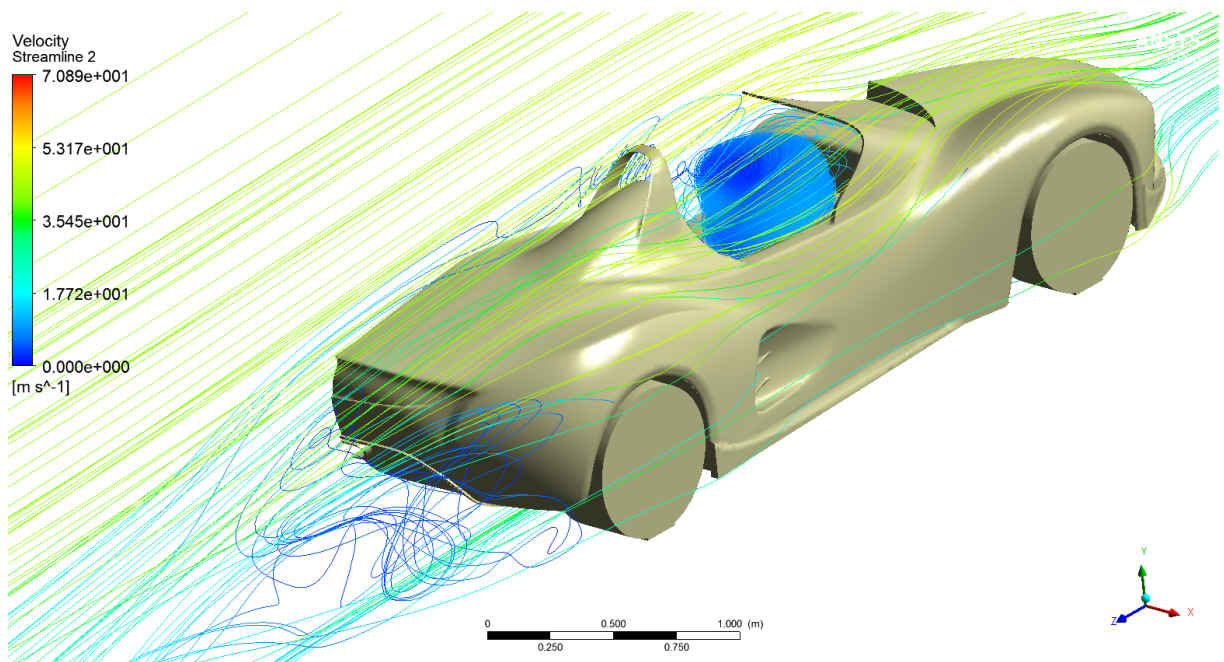
Referências Bibliográficas

1. Anderson, J.J.D., *Fundamentals of aerodynamics*. Vol. 4th ed. 2007, Boston: McGraw-Hill Higher Education. XXIV, 1008 p.-XXIV, 1008 p.
2. Ahmed, S.R., *Aerodynamics of road vehicles from fluid mechanics to vehicle engineering*. Vol. 4th ed. 1998, [S.l.]: SAE. XIX, 918 p.-XIX, 918 p.
3. Lanfrit, M. *Best practice guidelines for handling automotive external aerodynamics with FLUENT*. 2005. **Version 1.2**, 14.
4. Shaw, C.T., *Using computational fluid dynamics*. 1992, New York: Prentice Hall. 251 p.-251 p.
5. Katz, J., *Race car aerodynamics*. Vol. 2nd ed. 2006, Massachusetts: Bentley Publishers. 307 p.-307 p.
6. Munson, B.R., *Fundamentals of fluid mechanics*. Vol. 6th ed. 2010, Hoboken: John Wiley and Sons. XXI, 723, [24] p.-XXI, 723, [24] p.
7. White, F.M., *Fluid mechanics*. Vol. 6th ed. 2008, McGraw-Hill/Higher Education: Boston [etc.]. XIII, 864 p.-XIII, 864 p.
8. Art, F.T.a.; Available from: <https://formula1techandart.wordpress.com/2011/01/>.
9. Gizmag. Available from: <http://www.gizmag.com/formula-1-trends-2014/30624/>.
10. Wendell, M.; Available from: <http://www.kwyjibo.com/ispeed/limerock98/lr98160.jpg>.
11. Catalog, A.; Available from: http://www.automobile-catalog.com/make/caterham/super_7_caterham/super_7_caterham_csr/2012.html.
12. Porsche. Available from: <http://press.porsche.com/vehicles/2015/Tech-Specs-2015-Porsche-918-Spyder.pdf>.
13. Wikipedia. Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/Automobile_drag_coefficient.
14. ANSYS, *ANSYS Fluent Theory Guide*. 2013, ANSYS, Inc: Canonsburg.
15. ANSYS, *ANSYS Fluent User's Guide*. 2013, ANSYS, Inc: Canonsburg.
16. McCallen, R., F. Browand, and J. Ross, *The Aerodynamics of Heavy Vehicles: Trucks, Buses, and Trains*. 2004: Springer.
17. Axon, L., *The aerodynamic characteristics of automobile wheels - CFD prediction and wind tunnel experiment*, in *College of Aeronautics*. 1999, Cranfield University.
18. Beer, F.P. and J.E.R. Johnston, *Vector mechanics for engineers dynamics*. Vol. 2nd ed. 1990, Singapore: McGraw-Hill Book. XVIII, 1045 p.-XVIII, 1045 p.

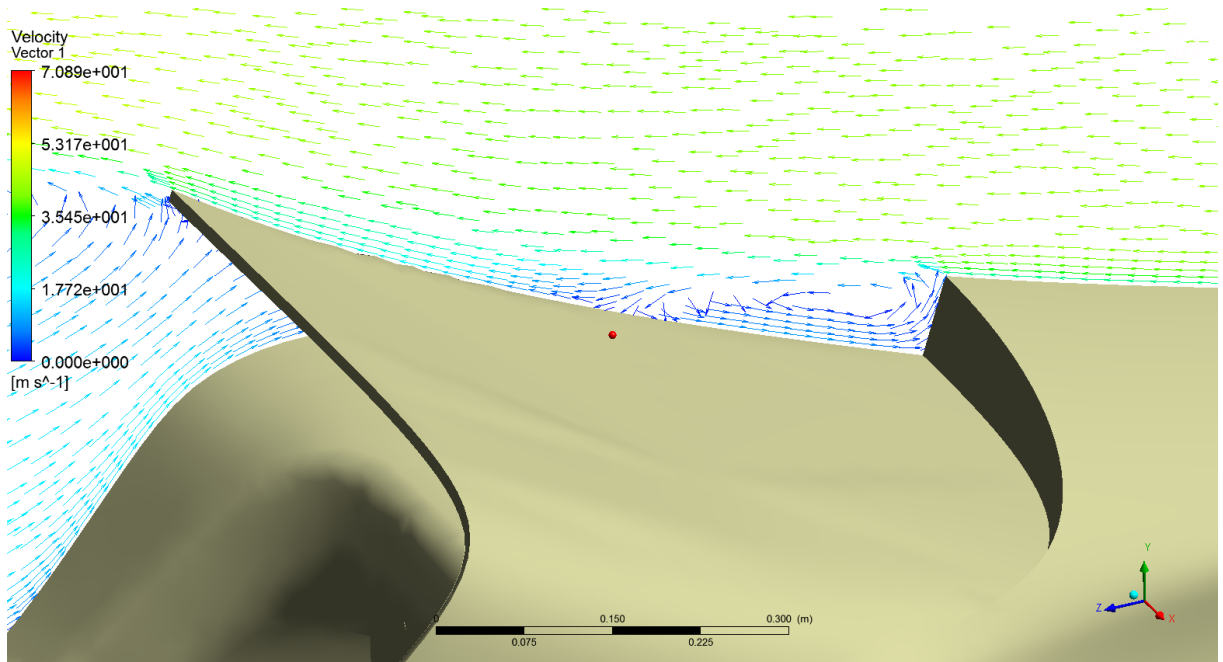
ANEXO A: Figuras complementares dos resultados



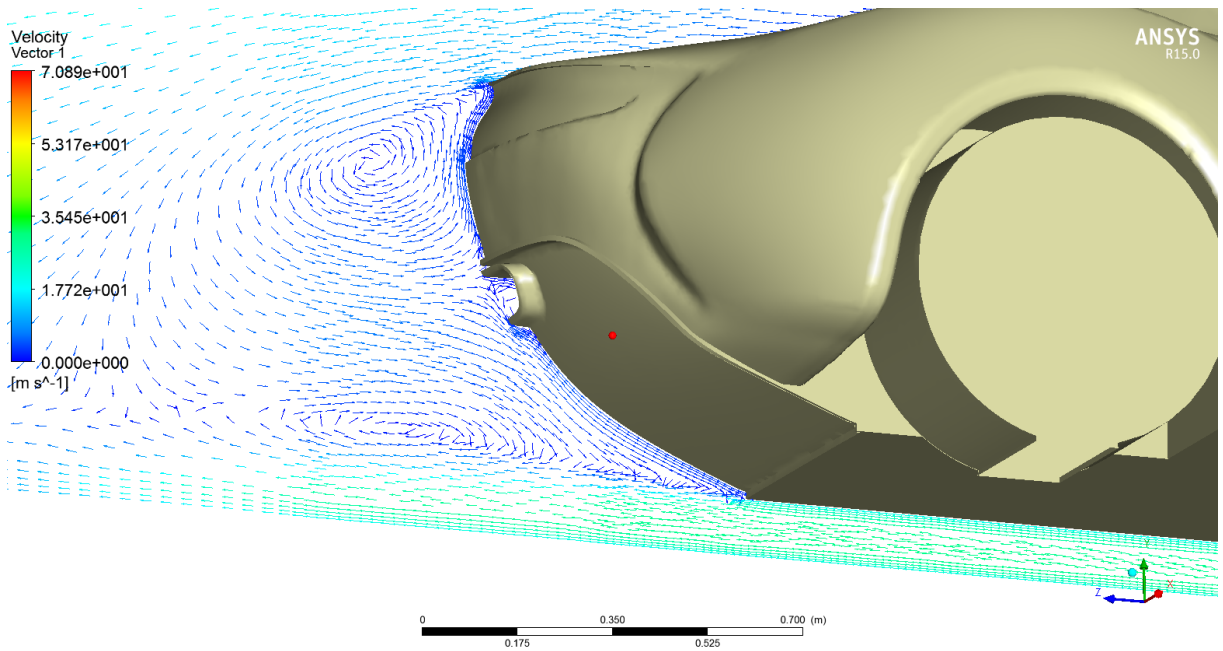
Linhas de corrente na carroceria em situação normal a 150 km/h (1).



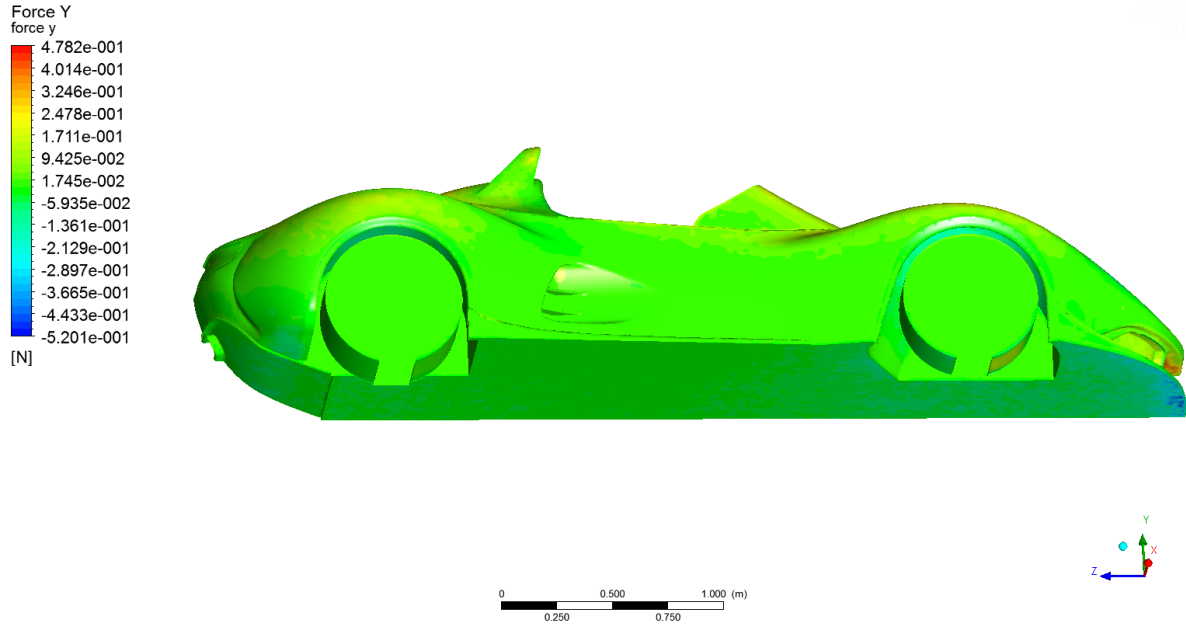
Linhas de corrente na carroceria em situação normal a 150 km/h (2).



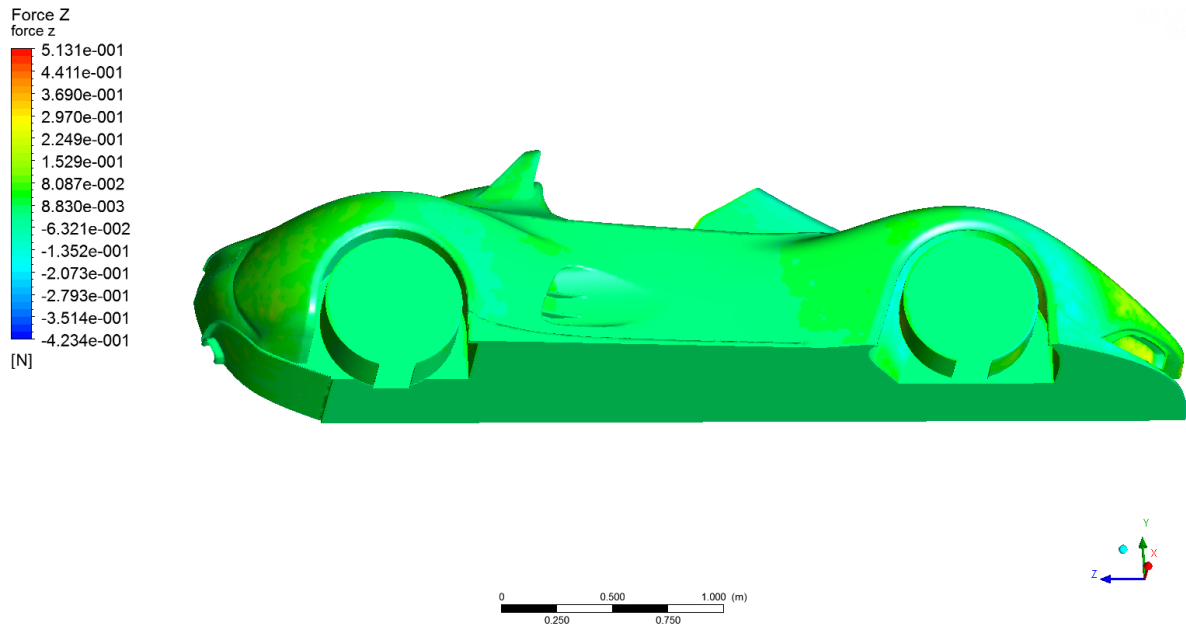
Distribuição de vetores de velocidade no plano de simetria na carroceria em situação normal a 150 km/h (1).



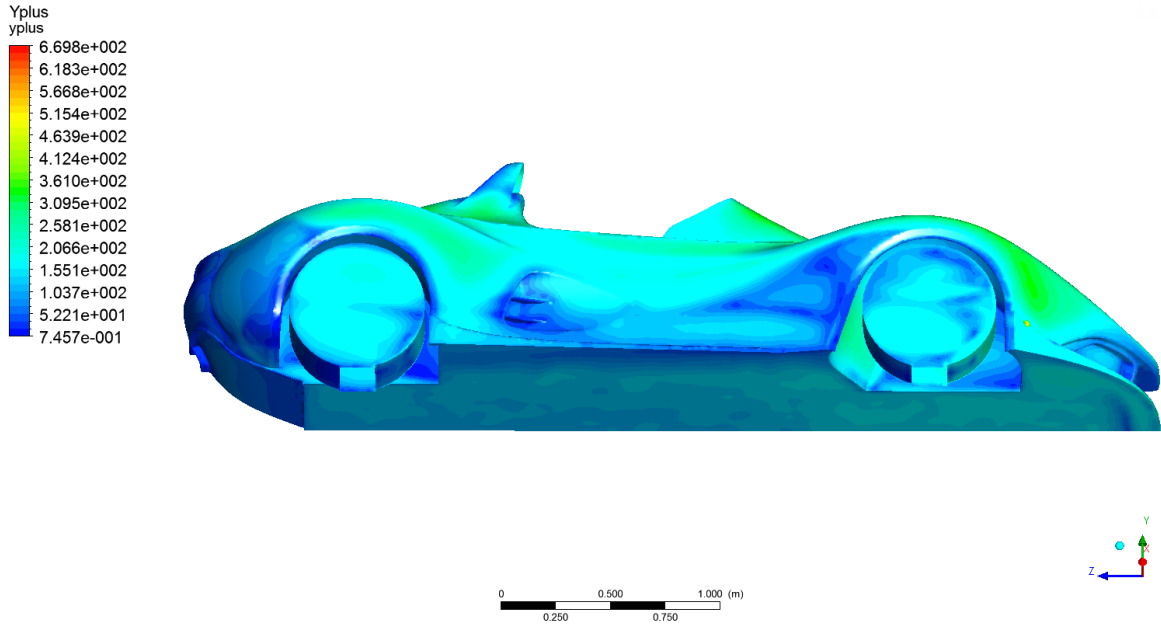
Distribuição de vetores de velocidade no plano de simetria na carroceria em situação normal a 150 km/h (2).



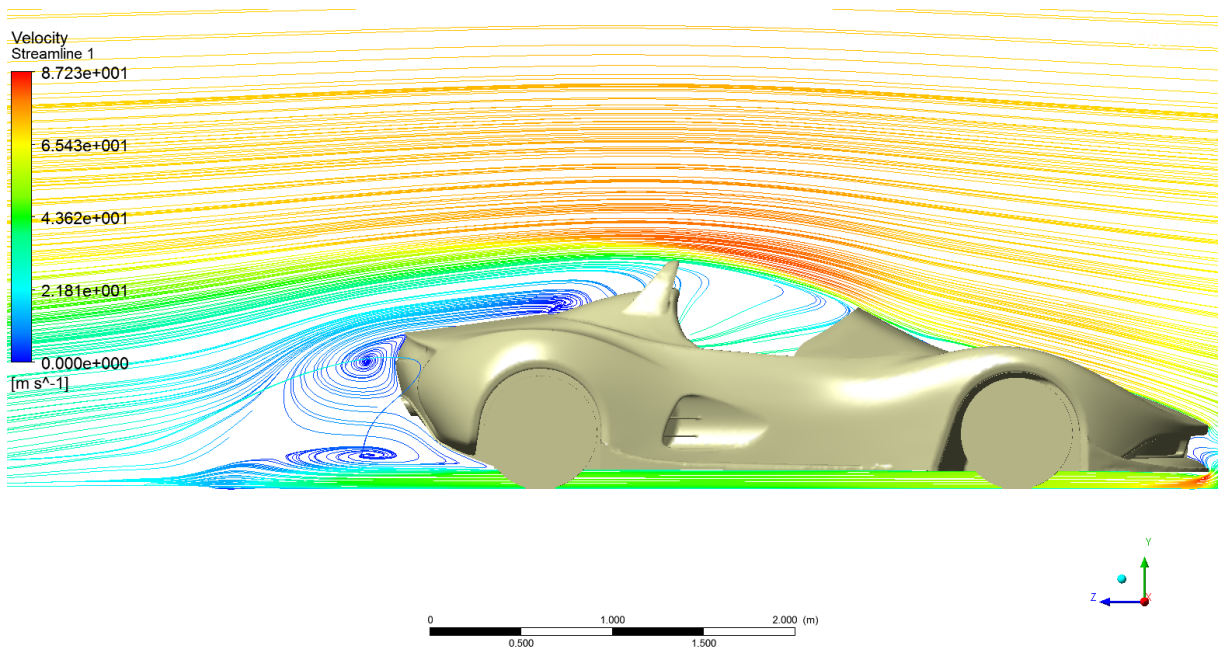
Distribuição da força na direção y (força de sustentação) na carroceria a 150km/h.



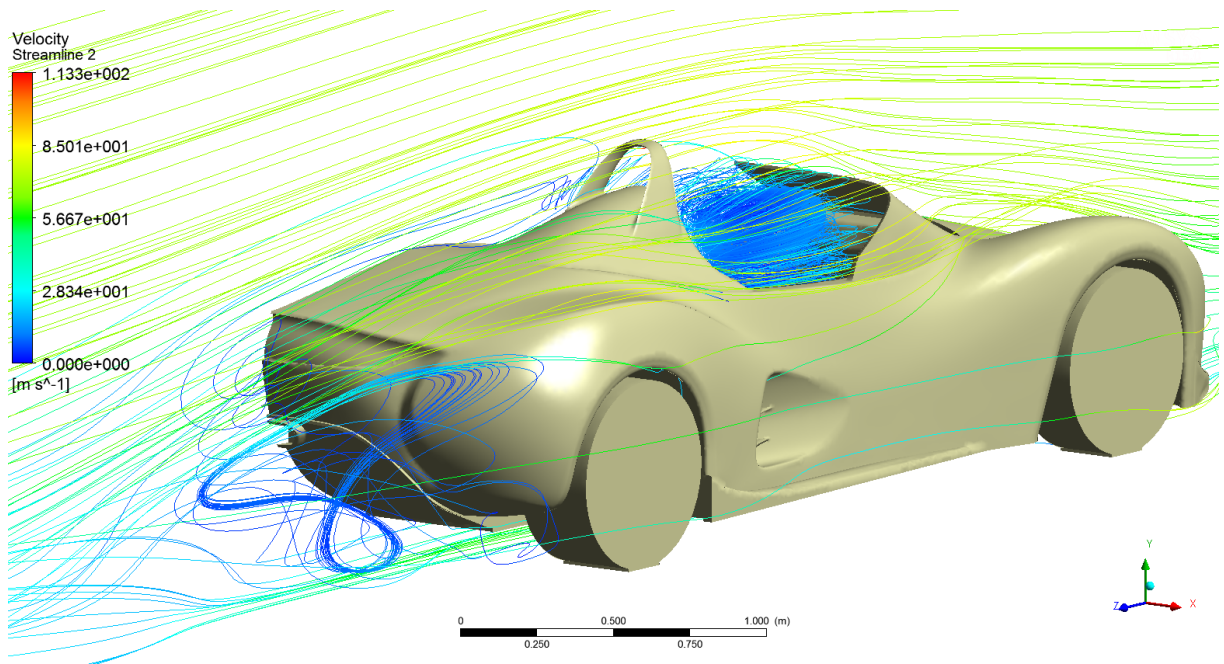
Distribuição da força na direção z (força de arrasto) na carroceria a 150km/h.



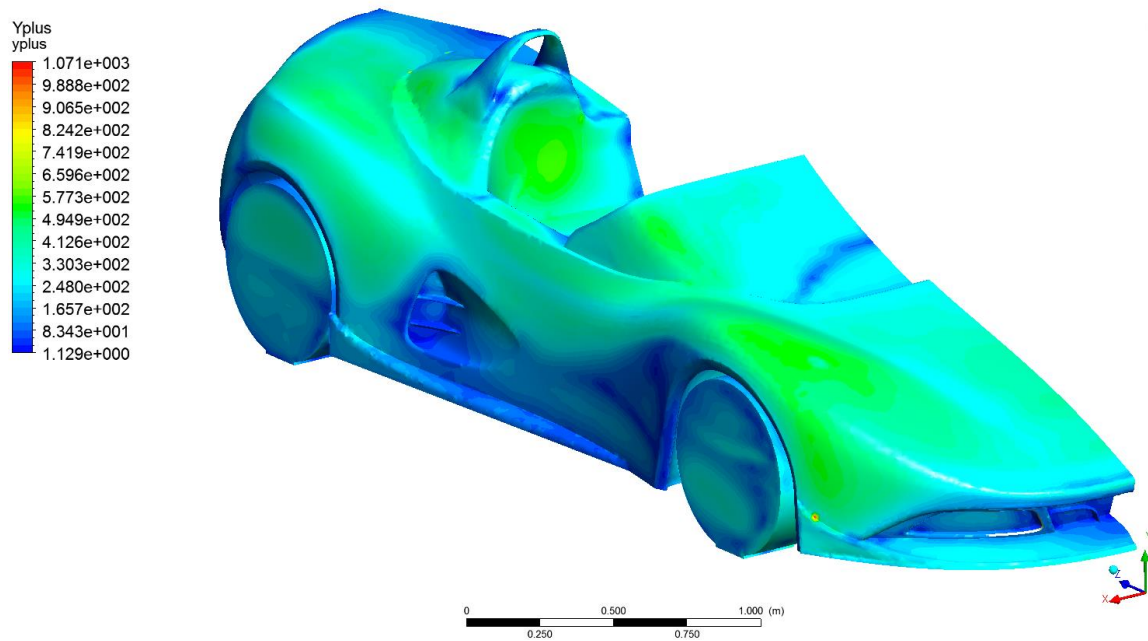
Distribuição de y^+ na carroceria a 150 km/h.



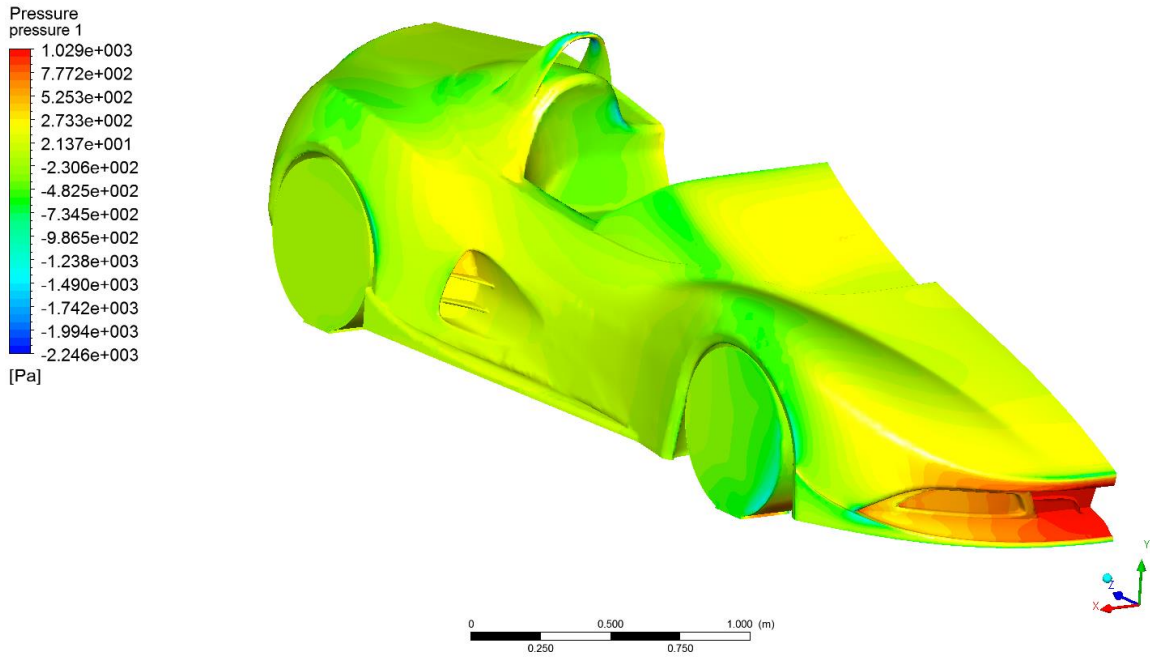
Linhas de corrente na carroceria em situação normal a 250 km/h (1).



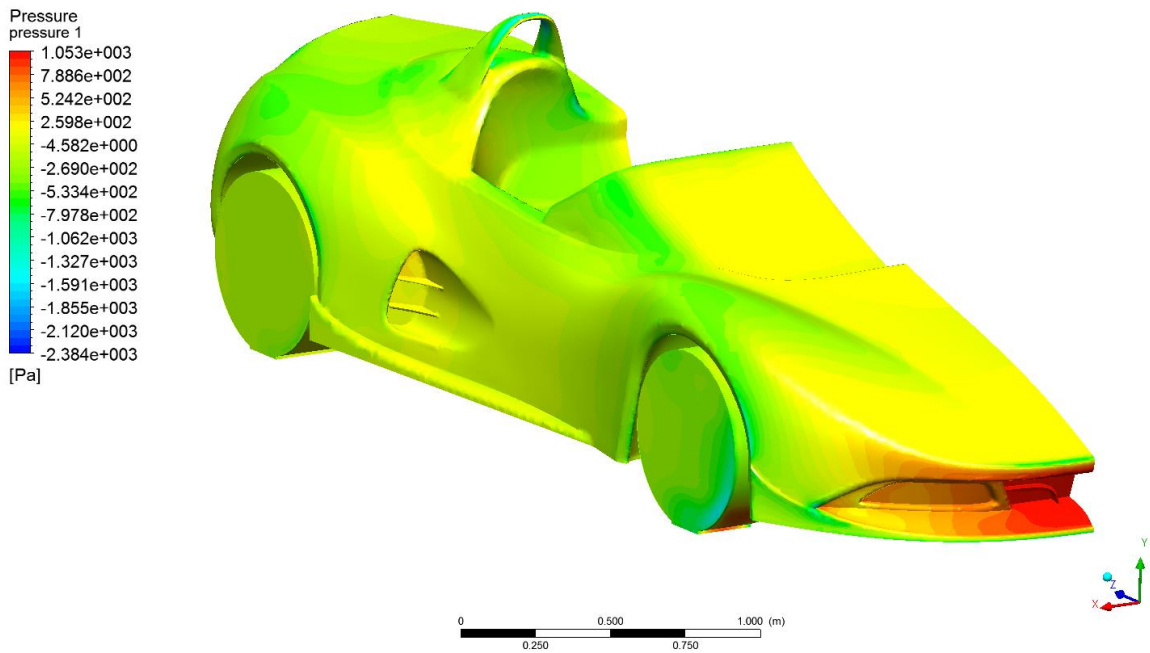
Linhas de corrente na carroceria em situação normal a 250 km/h (2).



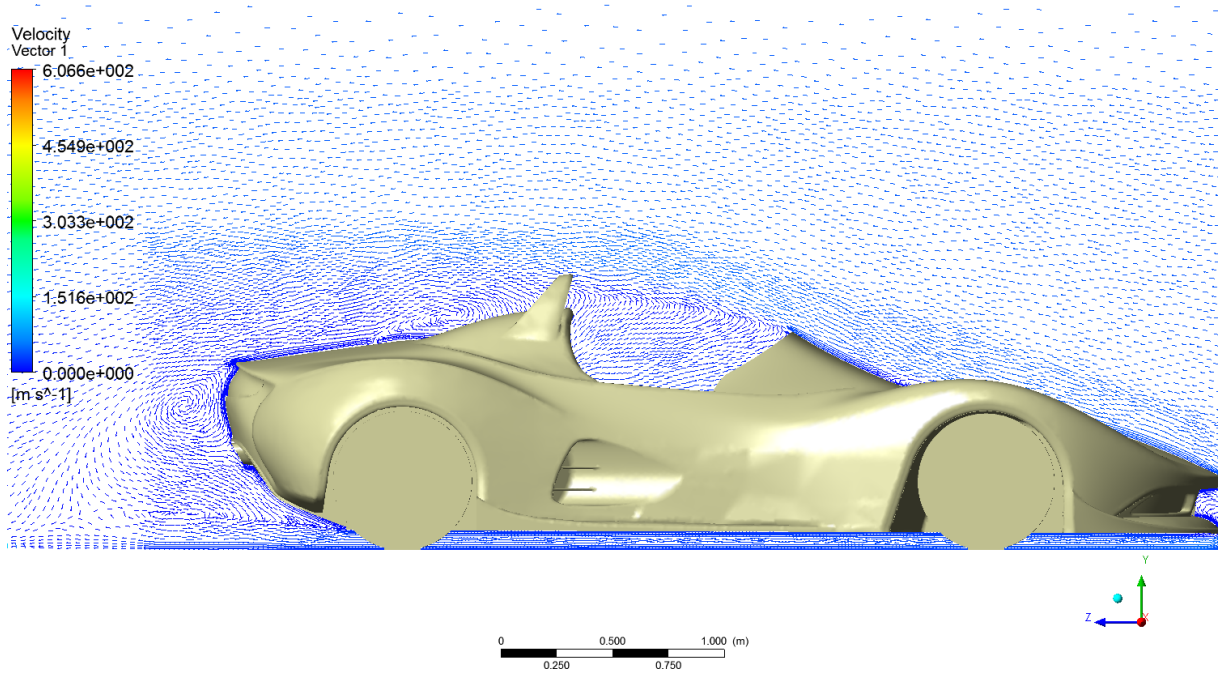
Distribuição de y^+ na carroceria a 250 km/h.



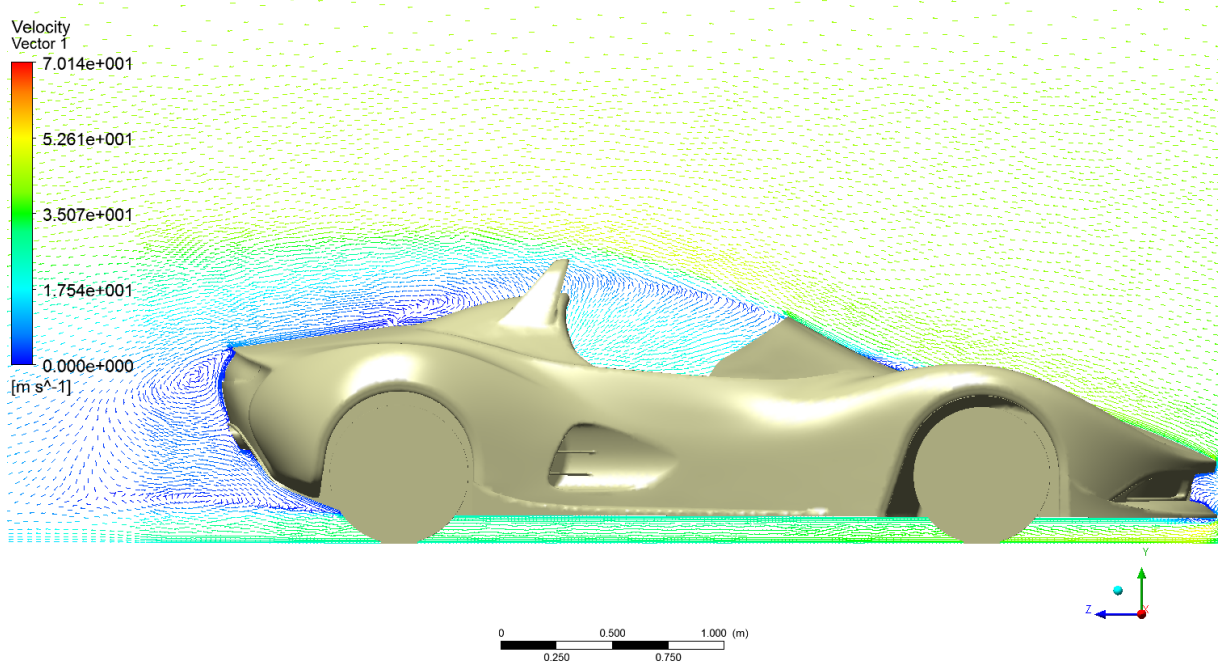
Distribuição da pressão na carroceria com menor distância ao solo (80-90) a 150 km/h.



Distribuição da pressão na carroceria com maior distância ao solo (120-130) a 150 km/h.

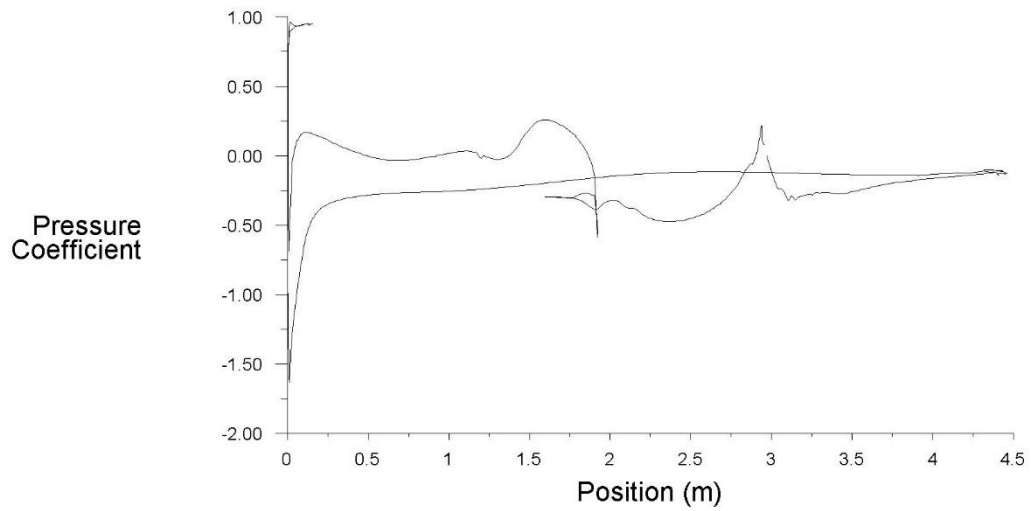


Distribuição de vetores de velocidade no plano de simetria na carroceria com menor distância ao solo (80-90) a 150 km/h.



Distribuição de vetores de velocidade no plano de simetria na carroceria com maior distância ao solo (120-130) a 150 km/h.

x-symmetry

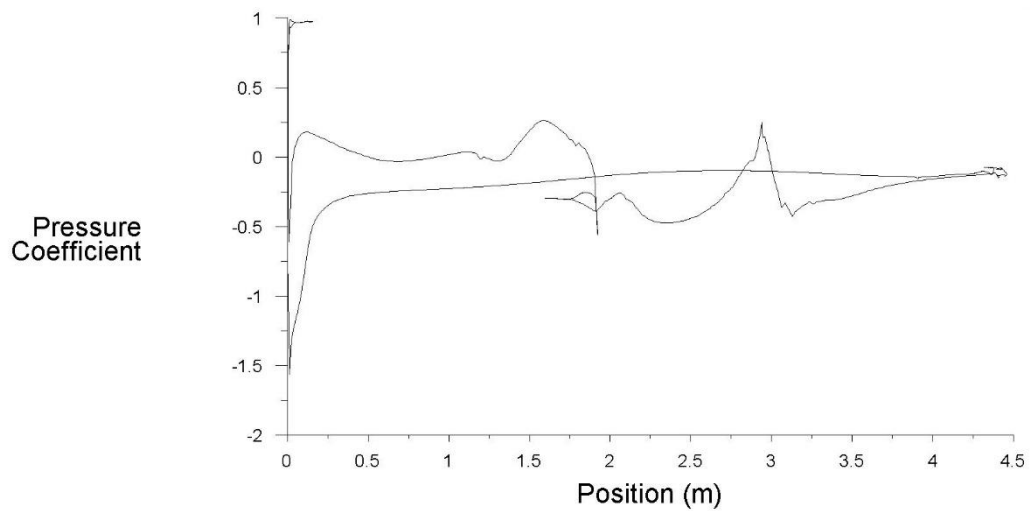


Pressure Coefficient

Jun 15, 2014
ANSYS Fluent 15.0 (3d, pbns, rke)

Gráfico do coeficiente de pressão C_p na linha de simetria da carroceria com menor distância ao solo (80-90) a 150 km/h.

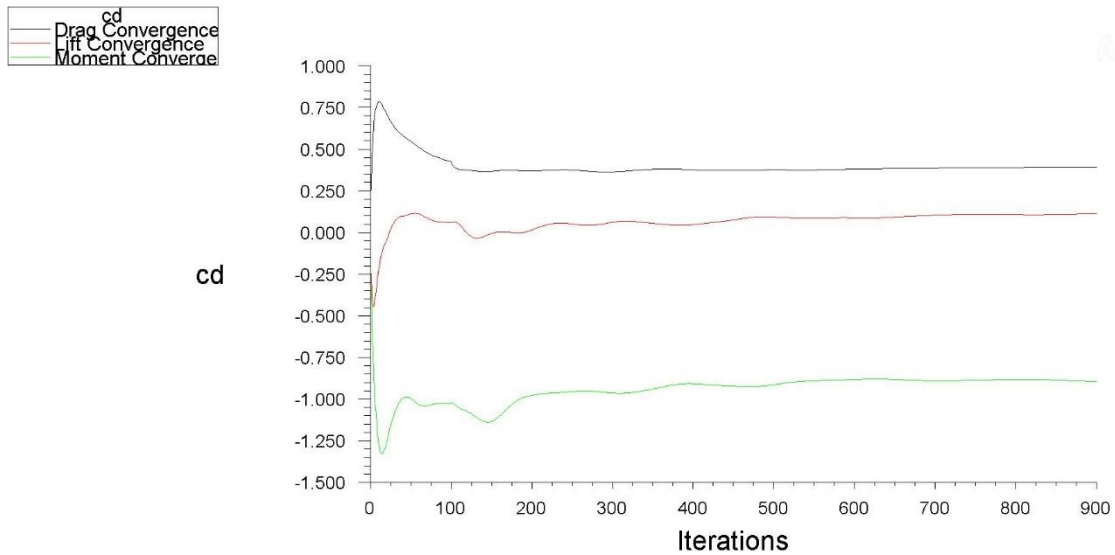
x-symmetry



Pressure Coefficient

Jun 13, 2014
ANSYS Fluent 15.0 (3d, pbns, rke)

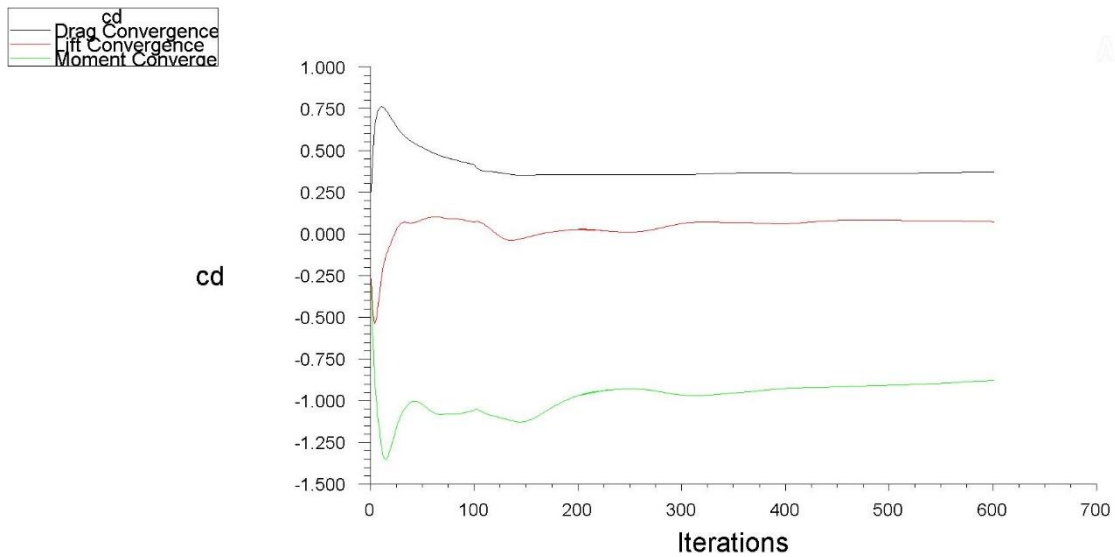
Gráfico do coeficiente de pressão C_p na linha de simetria da carroceria com maior distância ao solo (120-130) a 150 km/h.



Drag Convergence

Jun 13, 2014
ANSYS Fluent 15.0 (3d, pbns, rke)

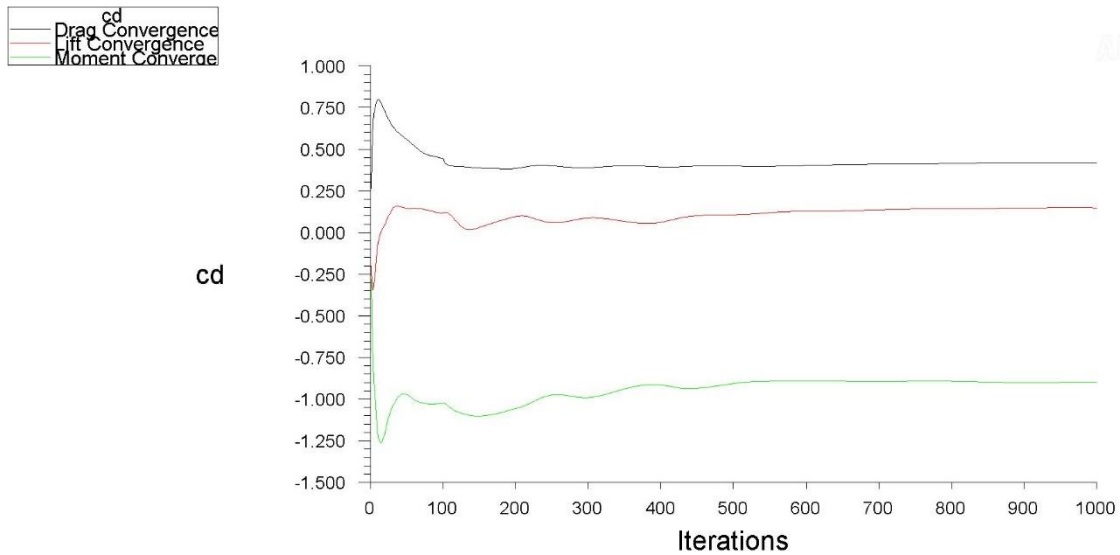
Gráfico contendo a variação dos valores dos coeficientes aerodinâmicos ao longo das iterações (situação normal a 150 km/h com a malha 8.6M).



Drag Convergence

Jun 15, 2014
ANSYS Fluent 15.0 (3d, pbns, rke)

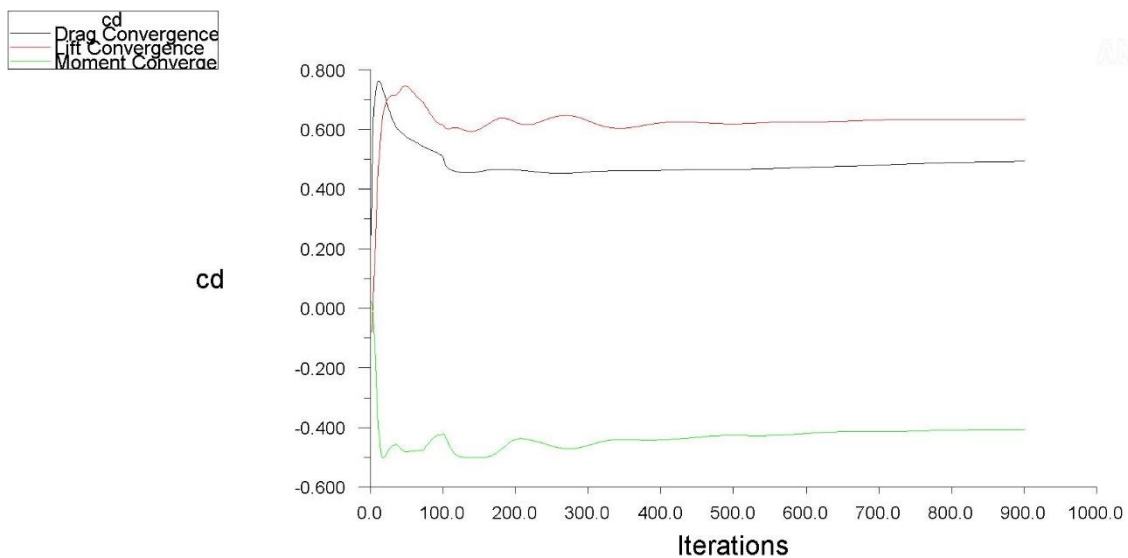
Gráfico contendo a variação dos valores dos coeficientes aerodinâmicos ao longo das iterações (situação de menor distância ao solo a 150 km/h, 80-90).



Drag Convergence

Jun 13, 2014
ANSYS Fluent 15.0 (3d, pbns, rke)

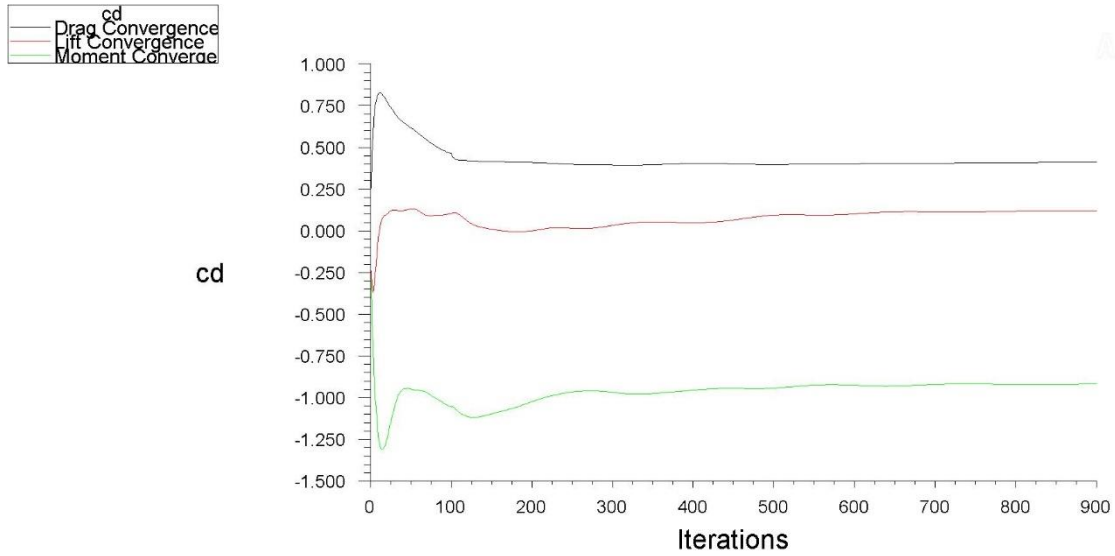
Gráfico contendo a variação dos valores dos coeficientes aerodinâmicos ao longo das iterações (situação de maior distância ao solo a 150 km/h, 120-130).



Drag Convergence

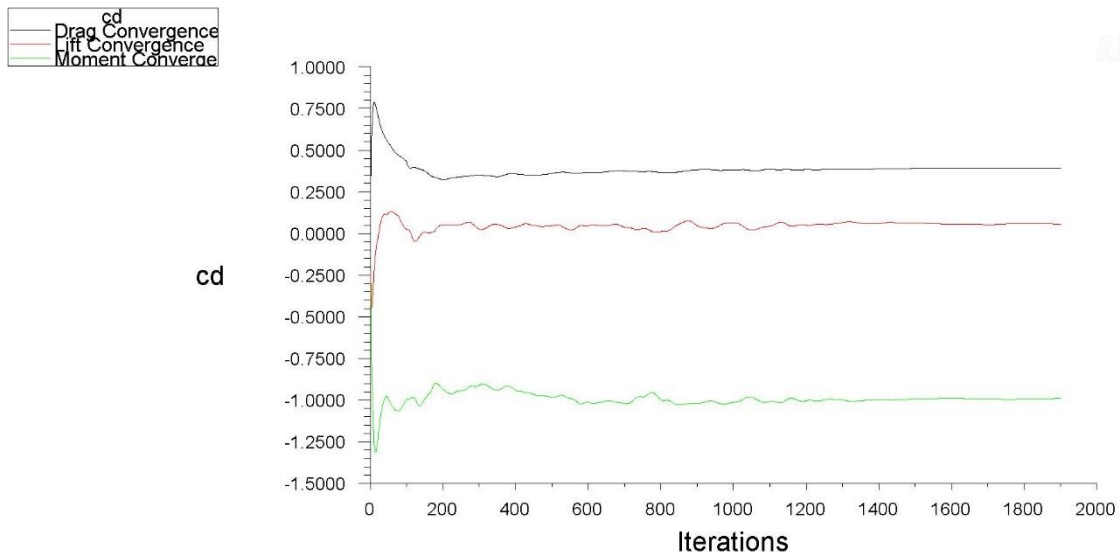
Jun 13, 2014
ANSYS Fluent 15.0 (3d, pbns, rke)

Gráfico contendo a variação dos valores dos coeficientes aerodinâmicos ao longo das iterações (situação de distância ao solo superior à frente a 200 km/h).



Drag Convergence Jun 13, 2014
ANSYS Fluent 15.0 (3d, pbns, rke)

Gráfico contendo a variação dos valores dos coeficientes aerodinâmicos ao longo das iterações (situação com condutas de refrigeração a 150 km/h).



Drag Convergence Jul 29, 2014
ANSYS Fluent 15.0 (3d, pbns, RSM)

Gráfico contendo a variação dos valores dos coeficientes aerodinâmicos ao longo das iterações (situação normal com modelo de turbulência RSM a 150 km/h).

ANEXO B: Parâmetros das simulações

Parâmetros definidos para o processamento das simulações (primeiras 100 iterações).

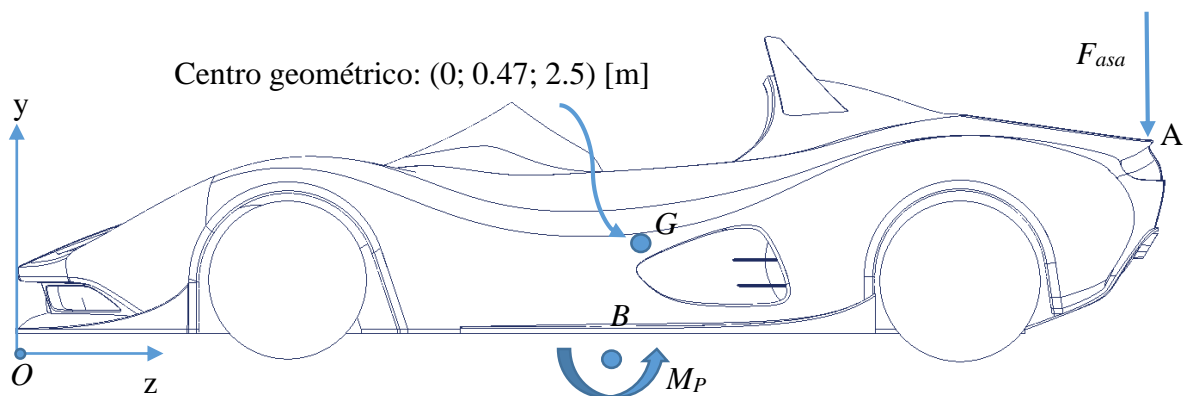
Parâmetro		Modelo de cálculo	
		<i>k-ε</i> realizável	RSM
Modelos	<i>Solver</i>	Baseado na pressão, regime permanente	
	Funções de parede	<i>Non-equilibrium</i>	
Métodos de solução	Esquema	<i>Coupled</i>	
	<i>Gradient</i>	<i>Least Squares Cell Based</i>	
	<i>Pressure</i>	<i>Second Order</i>	
	<i>Momentum</i>	<i>First Order Upwind</i>	
	<i>Turbulent Kinetic Energy</i>	<i>First Order Upwind</i>	
	<i>Turbulent Dissipation Rate</i>	<i>First Order Upwind</i>	
	<i>Reynolds Stresses</i>	-	<i>First Order Upwind</i>
	<i>Flow Courant Number</i>	50	

Parâmetros definidos para o processamento das simulações (restantes iterações).

Parâmetro		Modelo de cálculo	
		<i>k-ε</i> realizável	RSM
Modelos	<i>Solver</i>	Baseado na pressão, regime permanente	
	Funções de parede	<i>Non-equilibrium</i>	
Métodos de solução	Esquema	<i>Coupled</i>	
	<i>Gradient</i>	<i>Least Squares Cell Based</i>	
	<i>Pressure</i>	<i>Second Order</i>	
	<i>Momentum</i>	<i>Second Order Upwind</i>	
	<i>Turbulent Kinetic Energy</i>	<i>Second Order Upwind</i>	
	<i>Turbulent Dissipation Rate</i>	<i>Second Order Upwind</i>	
	<i>Reynolds Stresses</i>	-	<i>Second Order Upwind</i>
	<i>Flow Courant Number</i>	30	

ANEXO C: Estimativa da força descendente de uma possível asa traseira

Para que a força da asa F_{asa} equilibre a carroceria anulando o momento M_P , o somatório dos momentos no ponto G tem de ser nulo. A uma velocidade de 150 km/h, $M_P = -1412$ Nm, correspondendo ao momento *pitch* presente superfície da estrada no centro da distância entre os eixos (ver secção 2.1.3), resultante da força de sustentação e calculado através do ANSYS *Fluent*.



Esquema das forças aplicadas na carroceria para cálculo da força da asa F_{asa} .

Então: [18]

$$\sum M_P = \overline{BA} \times \overline{F_{asa}} + \overline{M_P} = 0$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2.35 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ -F_{asa} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1412 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = 0$$

$$2.35 F_{asa} = 1412 \Rightarrow F_{asa} = 601 \text{ N}$$