



**FCTUC** FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# **Estudo de simulação numérica do escoamento aerodinâmico em torno de um veículo automóvel de alto desempenho**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

**Autor**

**Pedro Miguel Pereira Lopes**

**Orientadores**

**António Manuel Gameiro Lopes**

**Pedro de Figueiredo Vieira Carvalheira**

**Júri**

<b>Presidente</b>	<b>Professor Doutor Luís Adriano Alves de Sousa Oliveira</b> <b>Professor Catedrático da Universidade de Coimbra</b> <b>Professor Doutor António Manuel Gameiro Lopes</b> <b>Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra</b> <b>Professor Doutor Pedro de Figueiredo Vieira Carvalheira</b>
<b>Vogais</b>	<b>Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra</b> <b>Professor Doutor Almerindo Domingues Ferreira</b> <b>Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra</b>

**Coimbra, Setembro, 2013**

Aos meus pais e à minha irmã

## **Agradecimentos**

A realização deste trabalho seria impossível sem o apoio das pessoas que estiveram do meu lado durante este longo percurso, às quais quero aqui agradecer.

Ao Professor Doutor António Gameiro por todo o apoio e atenção dada, pelos conhecimentos imprescindíveis que me transmitiu e também pela confiança que depositou em mim.

Ao Professor Doutor Pedro Carvalheira pela oportunidade de trabalhar com o Eco Veículo e pelo suporte que me forneceu.

Aos meus amigos, por toda a motivação e apoio que me deram e pela sua amizade, convívio e confiança indispensáveis ao longo destes anos.

Aos meus familiares, que cada um à sua maneira, me apoiaram e me deram o carinho e a força que me fizeram continuar.

E por fim um especial agradecimento aos meus pais, irmã e avó por todo o amor e carinho que me deram desde sempre. Pela inabalável confiança, sacrifício e paciência demonstrada nos momentos mais difíceis.



## Resumo

Pretende-se, com este trabalho, fazer o estudo aerodinâmico de um veículo automóvel perfilado que participou na competição Shell Eco-Marathon Europe 2011, inserido no projeto “Eco Veículo” do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra. O objetivo da competição é fazer um percurso numa pista fechada consumindo a menor quantidade possível de gasolina com um veículo monolugar.

Para executar o estudo é usado o ANSYS, que é um programa de simulação para engenharia. É importada a geometria do veículo para o programa e criado o domínio de escoamento do ar. De seguida, este domínio é decomposto em milhões de volumes de controlo e são impostas as condições do escoamento do fluido, das superfícies em contacto e da simulação. Por fim, é feito o cálculo da simulação e são retirados os resultados relevantes e elucidativos do escoamento. O estudo foi efetuado com o veículo alinhado e desalinhado com o escoamento e com diferentes velocidades dentro da gama que o veículo atinge durante a competição.

O estudo pretende caracterizar o comportamento aerodinâmico do veículo e melhorá-lo através de pequenas alterações geométricas. Foi estudada a introdução de um boleado (arredondamento da aresta) entre a forma superior e forma inferior do veículo. A conclusão retirada é que apesar de o boleado diminuir a área de contacto entre o fluido e o veículo, a força de arrasto aumenta devido à alteração das características da camada limite, o que faz com que a alteração não seja compensatória para este veículo.

**Palavras-chave:** Aerodinâmica, Simulação Numérica, Eco Veículo, Corpo Perfilado, Boleado.



## Abstract

This assignment is intended to make the aerodynamic study of a streamlined vehicle that participated in the Shell Eco-Marathon Europe 2011 competition, which is inserted in the “Eco Vehicle” project of the Department of Mechanical Engineering of the University of Coimbra. The purpose of the competition is to do a circuit in a closed track consuming the minimum amount of petrol possible with a single seat vehicle.

This study is carried out by using the ANSYS, which is a simulation program for engineering. The geometry of the vehicle is imported to the program and it is created the domain of air flow. Afterwards this domain is divided into millions of elements and the conditions of the fluid flow, of the surfaces in contact and of the simulation are imposed. Finally the calculation of the simulation is made and the important and elucidative results of the flow are taken. This study was done with the car aligned and with different yaw angles and with different speeds inside the range that the vehicle reaches during the competition.

The study intends to characterize the aerodynamic behavior of the car and to improve it through small geometric changes. The introduction of a fillet between the superior and inferior surfaces of the vehicle body was studied. The conclusion is that in spite of diminishing the contact area, the drag force increases due to the change of the characteristics of the boundary layer, which makes the change not compensatory for this vehicle.

**Keywords** Aerodynamic, Numerical Simulation, Eco Vehicle, Streamlined Body, Fillet.





---

## Índice

Índice de Figuras .....	xi
Índice de Tabelas .....	xiii
Simbologia e Siglas .....	xv
Simbologia.....	xv
Símbolos Gregos .....	xv
Siglas .....	xv
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento da Aerodinâmica Automóvel.....	1
1.2. Enquadramento Teórico.....	2
1.2.1. Forças Aerodinâmicas .....	2
1.2.2. Camada Limite .....	7
2. Procedimento .....	9
2.1. Geometria.....	10
2.2. Malha Volumétrica .....	11
2.3. Condições do Escoamento .....	14
2.4. Cálculo Numérico .....	15
2.5. Análise de Resultados .....	16
3. Resultados.....	17
3.1. Estudo da Independência de Malha .....	17
3.2. Velocidade .....	20
3.3. Boleado .....	22
3.4. Ângulo de <i>Yaw</i> .....	23
4. Conclusões.....	27
Referências Bibliográficas.....	29



---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ilustração da influência da proximidade do solo sobre o escoamento de ar. ....	1
Figura 1.2. Exemplo de uma visualização de escoamento de ar. ....	2
Figura 1.3. Sentido e direção das forças aerodinâmicas exercidas sobre um veículo. Fonte: <a href="http://www.kasravi.com/cmu/tec452/Aerodynamics/Introduction.htm">http://www.kasravi.com/cmu/tec452/Aerodynamics/Introduction.htm</a> .....	3
Figura 1.4. Distribuição de velocidades dentro e fora da camada limite. Fonte: <a href="http://pt.wikipedia.org/wiki/Camada_limite">http://pt.wikipedia.org/wiki/Camada_limite</a> .....	4
Figura 1.5. A pressão na zona frontal do veículo é superior à pressão na traseira provocando assim uma força de arrasto por diferença de pressão. ....	4
Figura 1.6. Vórtices típicos existentes num veículo em movimento. Fonte: Barnard, R.H. (2001) , “Road Vehicle Aerodynamic Design” .....	5
Figura 1.7. Produção de força de sustentação, neste caso negativa. Fonte: <a href="http://en.wikipedia.org/wiki/File:Equal_transit-time_NASA_wrong1.gif">http://en.wikipedia.org/wiki/File:Equal_transit-time_NASA_wrong1.gif</a> ...	6
Figura 1.8. Evolução típica da camada limite. Fonte: <a href="http://www.avweb.com/news/reviews/182564-1.html">http://www.avweb.com/news/reviews/182564-1.html</a> .....	7
Figura 2.1. Veículo utilizado neste estudo. ....	9
Figura 2.2. Domínio de cálculo utilizado. ....	10
Figura 2.3. Ilustração do boleado aplicado ao veículo. ....	11
Figura 2.4. A diferença entre uma <i>inflation layer</i> e uma malha tetraédrica. ....	12
Figura 2.5. Valores típicos de $Y^+$ dentro de cada região de uma camada limite turbulenta. Fonte: <a href="http://www.computationalfluidynamics.com.au/wp-content/uploads/2013/04/wallfunction.png">http://www.computationalfluidynamics.com.au/wp-content/uploads/2013/04/wallfunction.png</a> .....	13

Figura 2.6. Uma <i>inflation layer</i> a captar fielmente a camada limite. Fonte: <a href="http://www.computationalfluidynamics.com.au/wp-content/uploads/2011/12/inflate3.jpg">http://www.computationalfluidynamics.com.au/wp-content/uploads/2011/12/inflate3.jpg</a> .....	13
Figura 2.7. Zonas delimitadas para refinamentos de malha do tipo corpo (zonas sombreadas).....	14
Figura 2.8. Painel de definição da execução de uma simulação.....	15
Figura 2.9. Exemplo de uso de vetores para visualização de um escoamento ao longo de um plano. ....	16
Figura 3.1. Equilíbrio entre as paredes delimitadoras do escoamento. ....	18
Figura 3.2. Visualização da malha global. ....	18
Figura 3.3. Variação de $C_x$ com o tamanho máximo dos volumes de controlo e a sua diferença relativa ao $C_x$ com 0,25 m de tamanho máximo dos volumes de controlo.....	19
Figura 3.4. A relação entre o valor de $Y^+$ e a altura da primeira camada da <i>inflation layer</i> . .....	19
Figura 3.5. A relação entre o valor de $C_x$ e intensidade de turbulência .....	20
Figura 3.6. Evolução do valor de $C_x$ com o número de Reynolds. ....	21
Figura 3.7. Evolução das forças de arrasto originadas pela viscosidade e pela diferença de pressões com a velocidade do veículo.....	21
Figura 3.8. Valores dos raios usados na operação boleado. ....	22
Figura 3.9. Variação de $C_x$ com o valor do raio do boleado.....	23
Figura 3.10. Definição de ângulo de yaw. Fonte: Barnard, R.H. (2001) , “Road Vehicle Aerodynamic Design” .....	24
Figura 3.11. Configuração para os testes com o veículo inteiro.....	24
Figura 3.12. Variação de $C_x$ com o raio do boleado, com um ângulo de <i>yaw</i> de $10^\circ$ . ....	25

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Componentes da força de arrasto e a área superficial do veículo em função do raio do boleado .....	23
--	----



## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$A$  – Área

$C_x$  – Coeficiente de arrasto

$C_L$  – Coeficiente de sustentação

$F_x$  – Força aerodinâmica segundo o eixo do  $x$

$l$  – Comprimento

$L$  – Força de sustentação

Re – Número de Reynolds

$V$  – Velocidade

$u$  – Velocidade

### Símbolos Gregos

$\mu$  – Viscosidade dinâmica

$\nu$  – Viscosidade cinemática

$\rho$  – Massa volúmica

### Siglas

ISMC – International Standard Metric Conditions





# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento da Aerodinâmica Automóvel

A aerodinâmica começou a ter um papel relevante na competição automóvel apenas a partir dos anos 60 (Katz, 2006), rivalizando assim com a potência do motor e com a aderência dos pneus como fatores determinantes para ganhar corridas. Como a competição automóvel é um mundo onde existe um grande investimento financeiro, permitiu que a aerodinâmica fosse alvo de forte investigação e experimentação, o que impulsionou em muito o progresso desta área.

A aerodinâmica automóvel difere da aérea devido ao veículo terrestre estar em permanente contacto com o solo (Figura 1.1), e devido à diferente necessidade relativa à força de sustentação. O veículo aéreo necessita de criar uma força de sustentação positiva (de baixo para cima) de forma a manter-se no ar. Já o terrestre não necessita de criar uma força de sustentação mas, pelo contrário, até é favorável uma força de sustentação negativa. Como as asas dos aviões criam forças de sustentação positivas, foram introduzidos nos veículos de competição elementos aerodinâmicos, como o *spoiler*, com o formato de uma asa de avião invertida para produzir a, geralmente, benéfica sustentação negativa.



**Figura 1.1.** Ilustração da influência da proximidade do solo sobre o escoamento de ar.

Há um par de décadas atrás foi desenvolvida a modelação numérica computacional de fenómenos aerodinâmicos que permitiu uma maior compreensão desta área devido à facilidade e baixo custo de produzir vários testes em condições diferentes e com a possibilidade de representar visualmente o fluxo de ar em estudo (Figura 1.2). Com a evolução dos programas e do *hardware* dos computadores na última década, foi tornada acessível a utilização deste método tanto a profissionais como a amadores ao permitir testes muito mais rápidos e baratos.

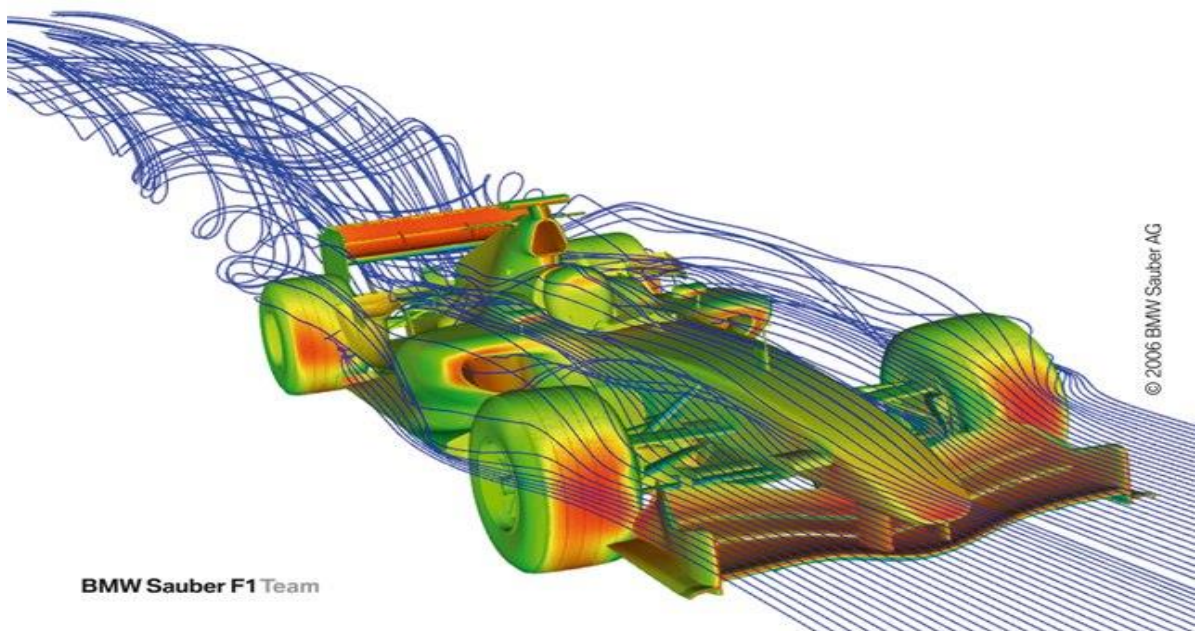


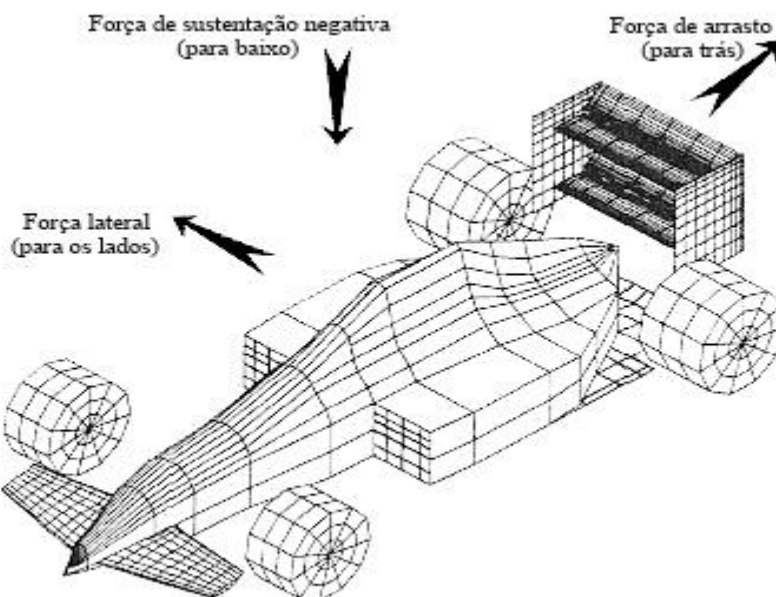
Figura 1.2. Exemplo de uma visualização de escoamento de ar.

## 1.2. Enquadramento Teórico

### 1.2.1. Forças Aerodinâmicas

A aerodinâmica automóvel pode ser interpretada como o estudo da perturbação de massa de ar causada pela presença de um veículo em movimento. A perturbação depende da forma, tamanho e velocidade do corpo, tal como da massa volúmica e viscosidade do ar. As forças, representadas na Figura 1.3, que o ar exerce sobre o veículo

são a força de arrasto e a força de sustentação. Força de arrasto poderá ter uma componente lateral que só existe quando o vento não está alinhado com o movimento do veículo.



**Figura 1.3.** Sentido e direção das forças aerodinâmicas exercidas sobre um veículo.

Fonte: <http://www.kasravi.com/cmu/tec452/Aerodynamics/Introduction.htm>

A força de arrasto é contrária ao movimento do veículo e é aproximadamente proporcional ao quadrado da velocidade. Pode ser originada pela viscosidade do ar e por diferenças de pressão causadas pela forma do veículo.

O primeiro caso é criado pela passagem de ar pela superfície do veículo pois, devido à viscosidade do ar, a camada de ar imediatamente em contacto com a superfície adota a sua velocidade. Este efeito, progressivamente mais fraco, é transmitido sucessivamente às camadas adjacentes até que deixa de ser sentido a uma certa distância da superfície. Ao conjunto de camadas que sentem esta variação de velocidade chamam-se de camada limite (McBeath, 2011), ilustrada na Figura 1.4. A fricção que esta camada exerce sobre a superfície é uma fonte de perda de energia cinética do sistema ao criar energia térmica (calor).

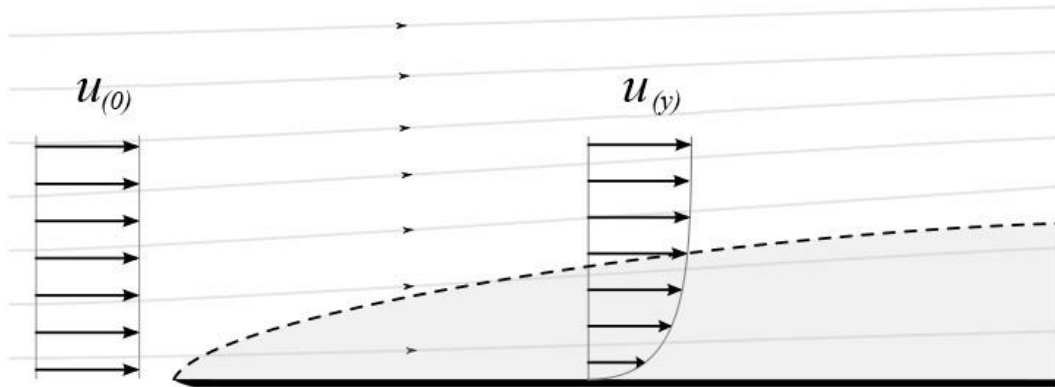


Figura 1.4. Distribuição de velocidades dentro e fora da camada limite.

Fonte: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Camada\\_limite](http://pt.wikipedia.org/wiki/Camada_limite)

O ar desloca-se de uma zona de alta pressão para uma de baixa pressão e como as suas partículas são independentes, ao contrário de um sólido, conseguem transmitir estas diferenças energéticas entre elas por longas distâncias e com muita rapidez. É isso que torna possível que a distribuição da pressão na zona traseira do veículo afete o fluxo de ar na zona frontal. Devido principalmente à camada limite e à sua conseqüente diminuição de energia do ar, a pressão relativa na zona frontal do veículo é superior à da traseira (Figura 1.5) e esta diferença de pressão “puxa” o veículo no sentido inverso ao do movimento.

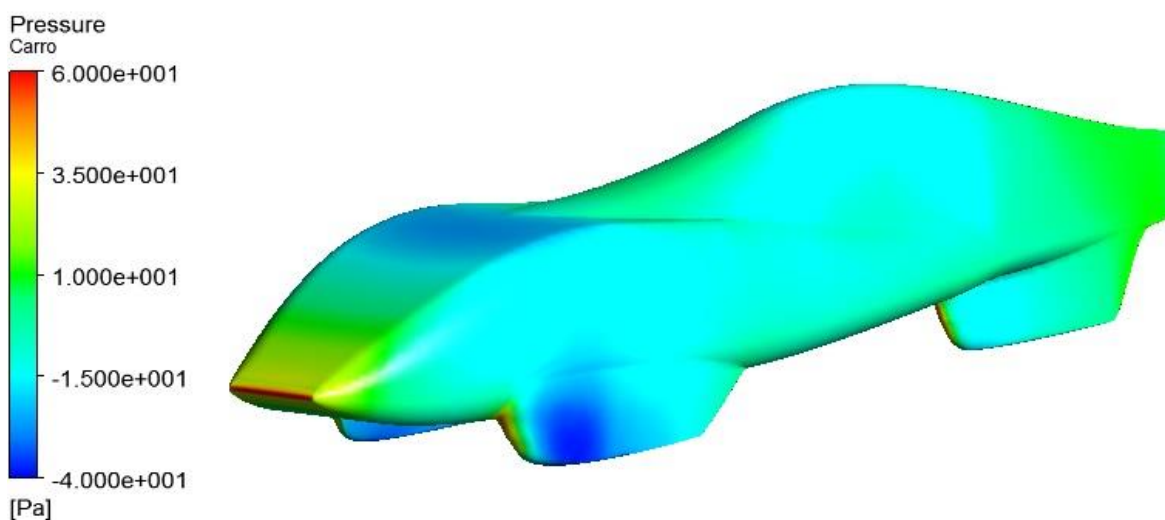
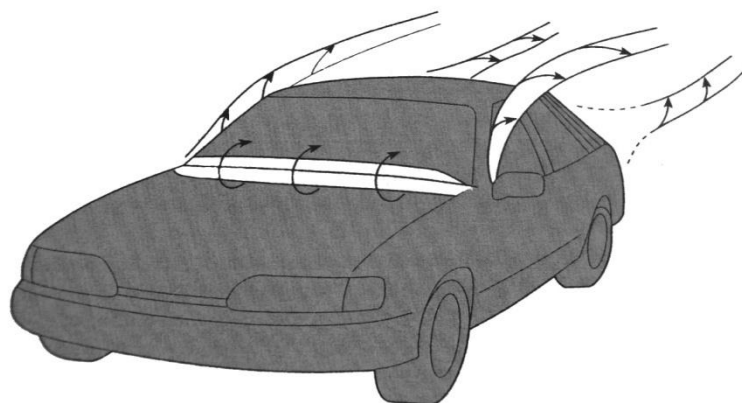


Figura 1.5. A pressão na zona frontal do veículo é superior à pressão na traseira provocando assim uma força de arrasto por diferença de pressão.

As diferenças de pressão entre a zona superior e a zona inferior do veículo induzem vórtices (Tamai, 1999), que provocam um aumento da força de arrasto, principalmente os que estão posicionados na traseira do veículo (Figura 1.6). Este aumento deve-se à existência de um aumento da velocidade, tanto maior quanto mais perto do centro do vórtice, que provoca uma zona de baixa pressão, logo uma zona de perda de energia do ar.



**Figura 1.6.** Vórtices típicos existentes num veículo em movimento. Fonte: Barnard, R.H. (2001) , “Road Vehicle Aerodynamic Design”

Como a força de arrasto depende da forma do veículo e das características do fluido, para ser mais fácil comparar entre veículos e perceber qual tem uma forma mais aerodinâmica e uma camada limite mais eficiente, foi introduzido o coeficiente adimensional de arrasto  $C_X$  que é igual a

$$C_X = \frac{F_X}{\frac{1}{2} \times \rho \times V_\infty^2 \times A}, \quad (1.1)$$

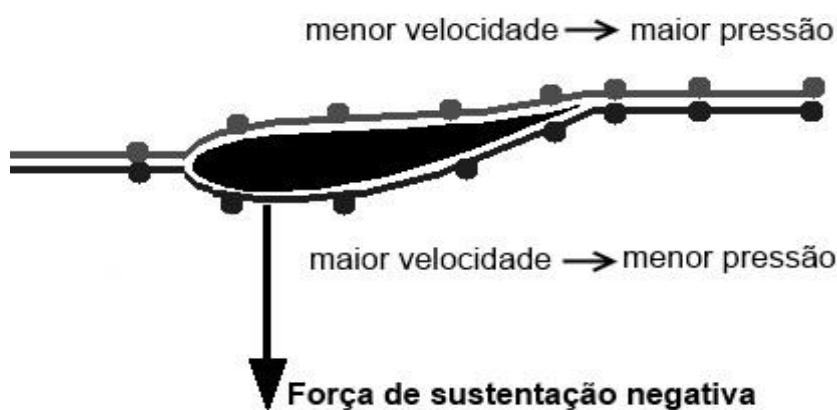
em que  $F_X$  é a componente da força que o fluido exerce sobre o veículo com a direção mas sentido oposto ao deslocamento do veículo,  $\rho$  é a massa volúmica do fluido,  $V_\infty$  é a velocidade do fluido em relação ao veículo e,  $A$  é a área de referência, que normalmente se considera a área frontal do veículo.

A força de sustentação é a força vertical que o ar exerce sobre o veículo. O ar ao incidir na frente do veículo simplesmente circula por cima e por baixo deste, ao contrário de um sólido (Barnard, 2001). Onde a velocidade do fluido é maior a pressão é menor (McBeath, 2011) e por isso ao conseguir fazer passar mais ar por baixo do veículo,

usando a forma deste para esse efeito, conseguimos criar uma zona de baixa pressão relativa. Esta diferença de pressão cria uma força vertical de cima para baixo que é a força de sustentação (Figura 1.7), neste caso negativa, que é expressa por

$$L = C_L \times \frac{1}{2} \times \rho \times V_{\infty}^2 \times A, \quad (1.2)$$

onde  $L$  é a força de sustentação e  $C_L$  é o coeficiente de sustentação (Oliveira e Lopes, 2006).



**Figura 1.7.** Produção de força de sustentação, neste caso negativa.

Fonte: [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Equal\\_transit-time\\_NASA\\_wrong1.gif](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Equal_transit-time_NASA_wrong1.gif)

A força de sustentação negativa é uma força favorável, pois aumenta a reação normal que o solo exerce sobre o veículo e, conseqüentemente, aumenta a aderência dos pneus. Ora este aumento de aderência permite acelerar, curvar e travar com melhor eficiência, pois retarda o ponto em que os pneus perdem aderência com o solo, o que por sua vez, impediria de fazer as manobras mencionadas.

A introdução de um elemento aerodinâmico para produzir sustentação negativa não produz apenas uma força vertical mas também uma força com uma componente vertical e horizontal que implica que também produz arrasto (Tamai, 1999). Por este facto, é que se deve analisar muito bem o efeito do componente aerodinâmico e perceber se o aumento do módulo da força de sustentação compensa o conseqüente aumento da força de arrasto. Dos estudos realizados verifica-se que estes componentes quase sempre só compensam em carros de competição devido às elevadas velocidades que estes praticam.

### 1.2.2. Camada Limite

A camada limite inicia-se no local mais frontal do veículo que normalmente é chamado de "nariz". Aqui a velocidade é zero (ponto de estagnação) e, por isso, é a zona de pressão relativa mais elevada. No início da camada limite, tanto a nível global como a nível local, as “partículas” de ar movem-se na mesma direção e sentido, paralelamente com a superfície do veículo. É um regime estável mas, com a perda de energia cinética devido ao efeito da viscosidade, gradualmente a camada limite começa a aumentar de espessura, a tornar-se mais instável e pode culminar por passar a um regime turbulento (Figura 1.8). No regime turbulento existe uma grande desordem a nível local e contém turbilhões e vórtices. A transição do regime laminar para o regime turbulento não é instantânea e é caracterizada por pequenas perturbações que vão ganhando maiores dimensões. A passagem de um regime para o outro implica um grande aumento da espessura da camada e, geralmente, um salto no valor de força de arrasto.



Figura 1.8. Evolução típica da camada limite.

Fonte: <http://www.avweb.com/news/reviews/182564-1.html>

Para caracterizar o fluxo de ar é usado o número de Reynolds, um parâmetro adimensional que é a relação entre as forças inerciais e as viscosas. Existe um valor crítico do número de Reynolds, dependente das condições do escoamento, que caracteriza o regime de transição e que acima deste o regime tende a ser turbulento e abaixo tende a ser laminar. O número de Reynolds é calculado com a expressão,

$$Re = \frac{V \times l}{\nu}, \quad (1.3)$$

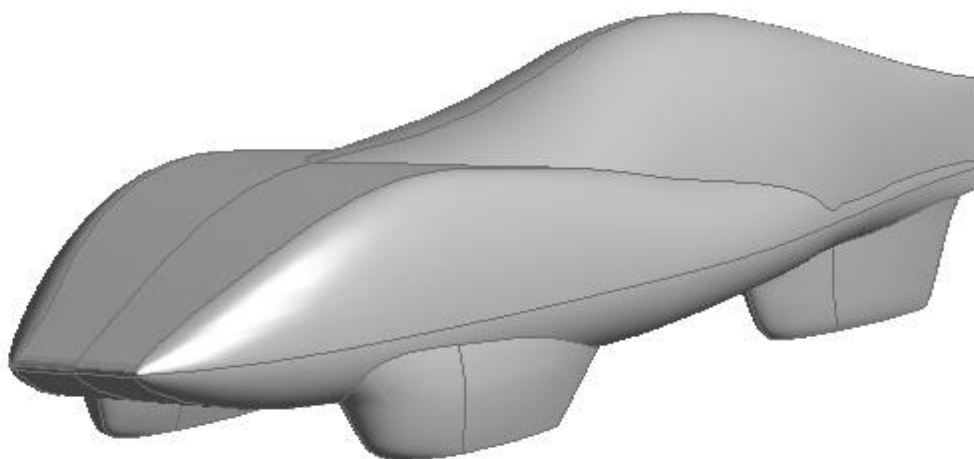
em que  $V$  é a velocidade do fluido em relação ao veículo,  $l$  é o comprimento característico e  $\nu$  a viscosidade cinemática do fluido (Oliveira e Lopes, 2006). O

comprimento característico é relativo ao sistema em estudo. Por exemplo, ao estudar o valor geral de Reynolds do escoamento de ar em torno do veículo o comprimento característico é o comprimento do veículo e, para estudar o valor local ao longo da camada limite o comprimento característico é a distância ao início da camada limite.



## 2. PROCEDIMENTO

O modelo do veículo utilizado neste estudo, ilustrado na Figura 2.1, foi criado em Autodesk Inventor e tem 2,92 m de comprimento, 0,60 m de largura e 0,61 m de altura. A altura do “nariz” ao chão é de 220 mm e da base ao solo é de 22 mm. O modelo não inclui as rodas, pois as complicações adicionais que iriam provocar na criação da malha não compensariam o pouco que a sua introdução iria influenciar nos testes de análise do efeito do boleado aplicado entre a forma superior e a forma inferior do veículo.



**Figura 2.1.** Veículo utilizado neste estudo.

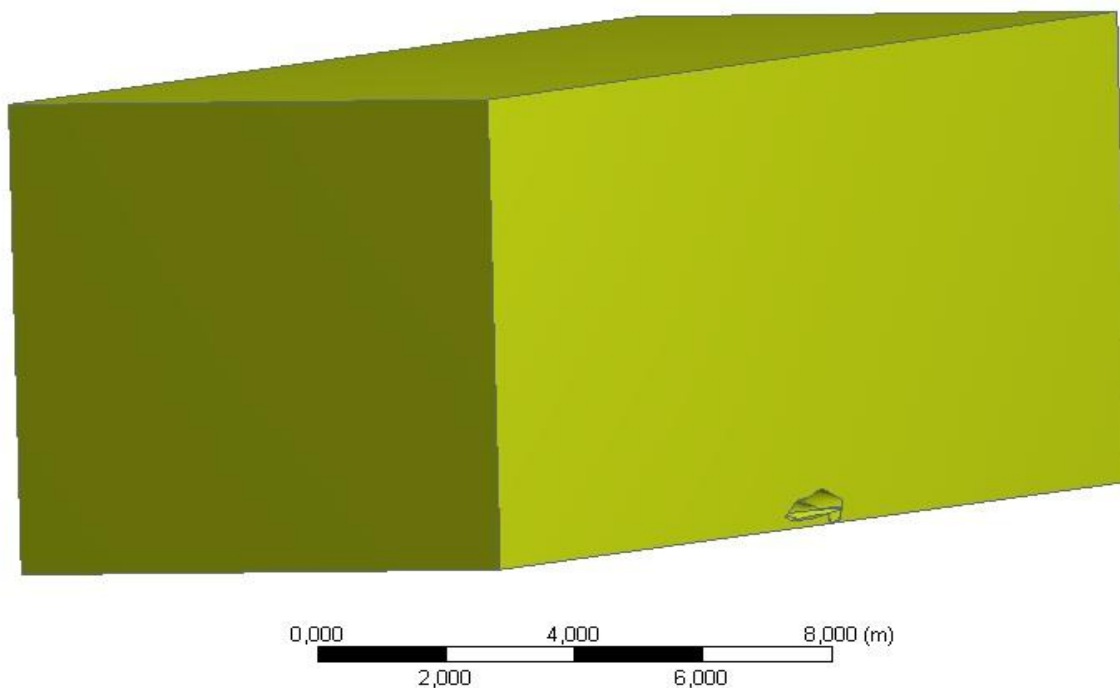
Este modelo foi importado para o ANSYS que é um programa de simulação para engenharia. Com este programa pretende-se simular o fluxo de ar em torno do veículo para calcular a força de arrasto e respetivo coeficiente de arrasto. A simulação tem duas fases, o módulo Workbench que consiste em criar a geometria do veículo e a malha do modelo e, de seguida, o módulo CFX que consiste em preparar as condições da simulação, executá-la e, por fim, extrair os dados resultantes pretendidos.

Quando o veículo está alinhado com o escoamento podemos usar apenas metade do veículo, pois existe a possibilidade de criar uma fronteira de simetria. Este

método é bastante vantajoso, visto que, para a mesma simulação o domínio tem metade do tamanho, com a conseqüente redução no tempo de cálculo, para além de se poder ir mais além no refinamento de malha sem exceder o limite de capacidade do *hardware* a ser utilizado.

## 2.1. Geometria

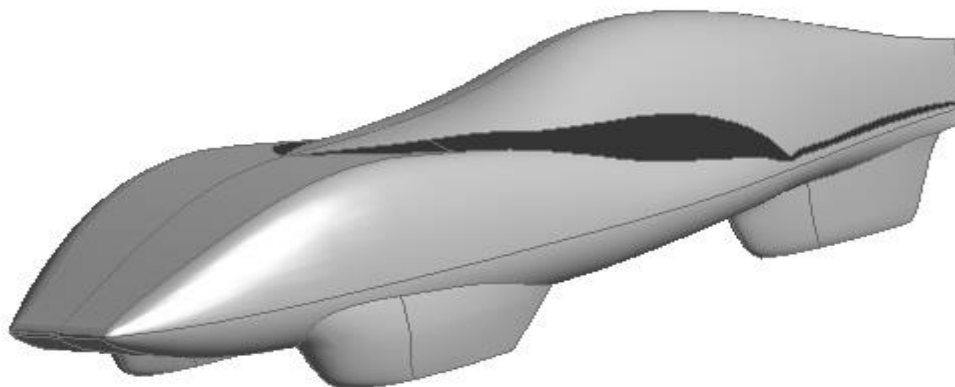
Na geometria é criado apenas o domínio onde o ar se escoar, ou seja, é criada uma “caixa” à volta do veículo, à qual retiramos a forma do veículo. Esta “caixa” tem de ser o mais pequena possível para uma maior rapidez de cálculo, mas o suficientemente grande para não influenciar o escoamento perto do veículo. Também a fronteira superior e a lateral devem ser equilibradas em termos de pressão para uma menor perturbação do escoamento. Foi estudado o efeito das dimensões do domínio de cálculo e chegou-se à conclusão que uma configuração aceitável é 30 m de comprimento (cerca de cinco vezes o comprimento do veículo para a frente e para trás deste), 8 m de largura e 8 m de altura, tal como representado na Figura 2.2.



**Figura 2.2.** Domínio de cálculo utilizado.

---

É feito um boleado entre a forma superior e a forma inferior do veículo tal como representado na Figura 2.3 e a variação deste raio é o alvo de estudo neste trabalho.



**Figura 2.3.** Ilustração do boleado aplicado ao veículo.

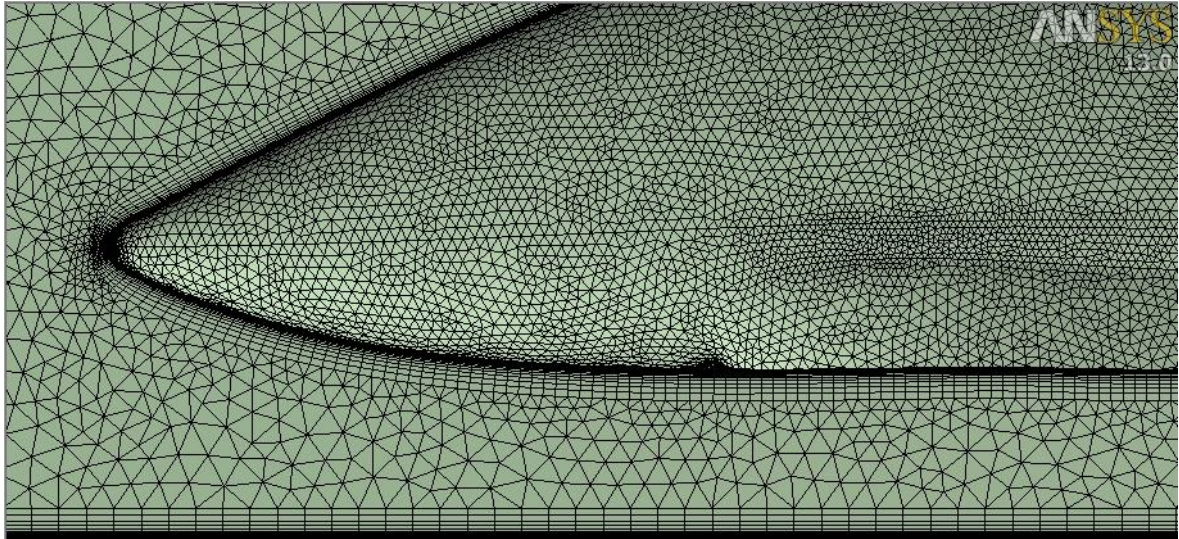
## 2.2. Malha Volumétrica

O passo seguinte é a criação da malha, que é um dos passos mais críticos. Uma boa malha é determinante para uma solução fiável e credível. Para este efeito é necessário fazer um estudo de independência de malha, para se poder concluir que o tipo de malha a ser usado não irá influenciar os resultados dos estudos.

Quanto menor o número de nodos da estrutura menor é a complexidade do modelo, o que permite simulações mais rápidas. Em virtude deste fato, foi feita uma análise a fim de constatar qual a melhor combinação de variáveis e estruturas da malha que permitem obter o valor de  $C_x$  estabilizado com o menor número de nodos.

A definição da malha geral tem vários parâmetros tais como o tamanho mínimo dos volumes de controlo, taxa de crescimento (razão entre espaçamentos de malha consecutivos), número mínimo de nodos entre superfícies e um dos mais importantes, o tamanho máximo dos volumes de controlo que compõe a malha. A malha global é tetraédrica, que é a mais fiável para este tipo de estudo e de geometria. Neste estudo foram feitos, geralmente, quatro refinamentos locais à malha.

O primeiro é a *inflation layer*, que é a criação de uma malha à volta da superfície do veículo em forma de paralelepípedos, alinhados por camadas, com a direção paralela à superfície do veículo, tal como é visível na Figura 2.4.



**Figura 2.4.** A diferença entre uma *inflation layer* e uma malha tetraédrica.

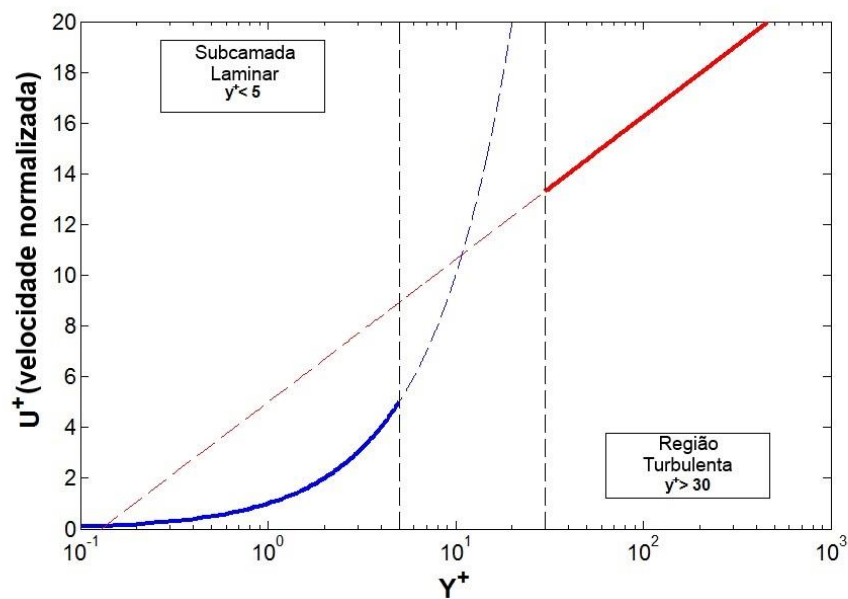
Para ser possível captar a subcamada laminar da camada limite de forma a conseguir reproduzi-la com a melhor precisão possível, o primeiro nodo terá de ficar muito próximo da superfície. Existe uma variável chamada  $Y^+$  que indica o quão próximo está a primeira camada da *inflation layer* da superfície do veículo e é calculada através da expressão,

$$Y^+ = \frac{\rho \times U^* \times \Delta y_1}{\mu}, \quad (2.1)$$

em que  $\Delta y_1$  é altura estimada da primeira camada,  $\mu$  a viscosidade dinâmica do fluido e  $U^*$  é a velocidade de fricção definida pela expressão,

$$U^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}, \quad (2.2)$$

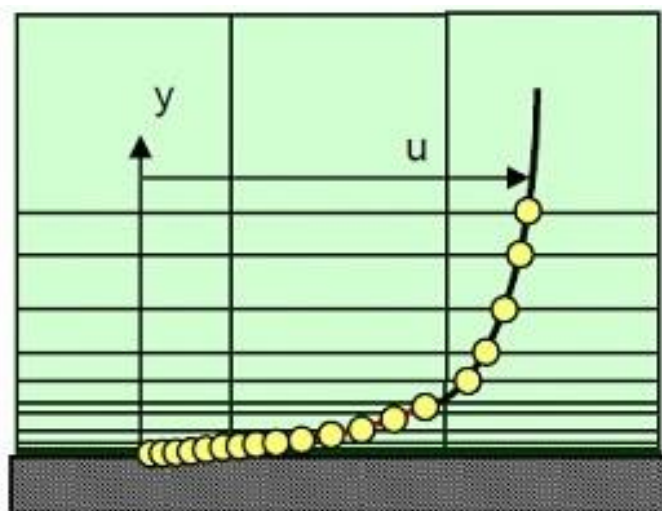
em que  $\tau_w$  é a tensão de corte nas paredes. O valor recomendado da variável  $Y^+$  é de 1 (LEAP Support Team, 2012) e a sua relação com a velocidade normalizada está representada na Figura 2.5.



**Figura 2.5.** Valores típicos de  $Y^+$  dentro de cada região de uma camada limite turbulenta.

Fonte: <http://www.computationalfluidynamics.com.au/wp-content/uploads/2013/04/wallfunction.png>

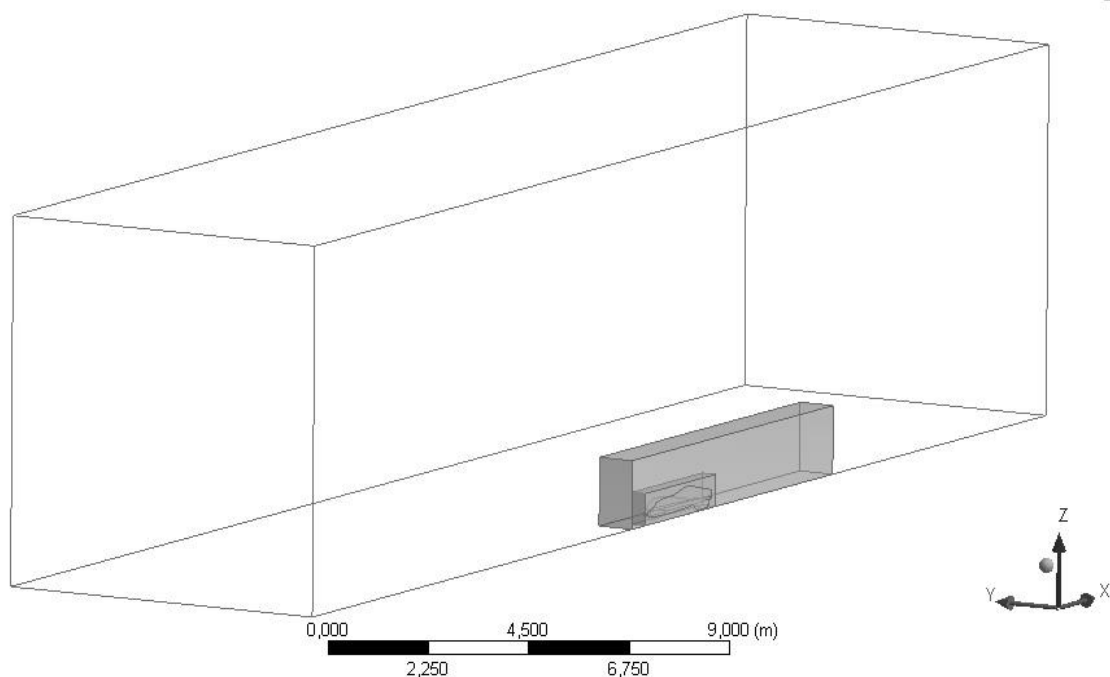
Além de um  $Y^+$  de valor baixo, são necessárias várias camadas dentro da subcamada viscosa e do resto da camada limite para se conseguir recriá-la o mais fielmente possível, como exemplificado na Figura 2.6.



**Figura 2.6.** Uma *inflation layer* a captar fielmente a camada limite.

Fonte: <http://www.computationalfluidynamics.com.au/wp-content/uploads/2011/12/inflate3.jpg>

Outros dois refinamentos são do tipo corpo que são refinamentos locais de uma zona paralelepipedica delimitada. O corpo de menor refinamento capta um volume maior que inclui o veículo e a zona na retaguarda, pois é uma zona turbulenta e propicia à existência de vórtices. O corpo de maior refinamento apenas capta o volume em volta do veículo, tal como representado na Figura 2.7.



**Figura 2.7.** Zonas delimitadas para refinamentos de malha do tipo corpo (zonas sombreadas).

Por fim, é feito um refinamento facial às superfícies do veículo que limitam o tamanho de nodos nestas faces.

### 2.3. Condições do Escoamento

A próxima fase é configurar as condições do escoamento de ar. Definimos a velocidade, o modelo de turbulência e a temperatura do ar durante a simulação. As velocidades testadas são baseadas nas velocidades típicas que o veículo em questão atinge nas competições. O modelo de turbulência usado, Shear Stress Transport, é apropriado para valores de Reynolds baixos que é o caso em estudo. A temperatura do ar é de 288 K

(15 °C), que é o valor padrão da atmosfera segundo a ISMC, *International Standard Metric Conditions*.

## 2.4. Cálculo Numérico

Nesta fase é decidido quantos processadores usar e se as iterações começam pelas condições iniciais ou pelas condições em que terminou a simulação anterior. Neste trabalho foram usados 7 processadores em paralelo e, quando os testes eram semelhantes entre si, as iterações começavam a partir da simulação anterior visto que diminuía muito o tempo de processamento. Na Figura 2.8 é possível observar a interface deste passo.

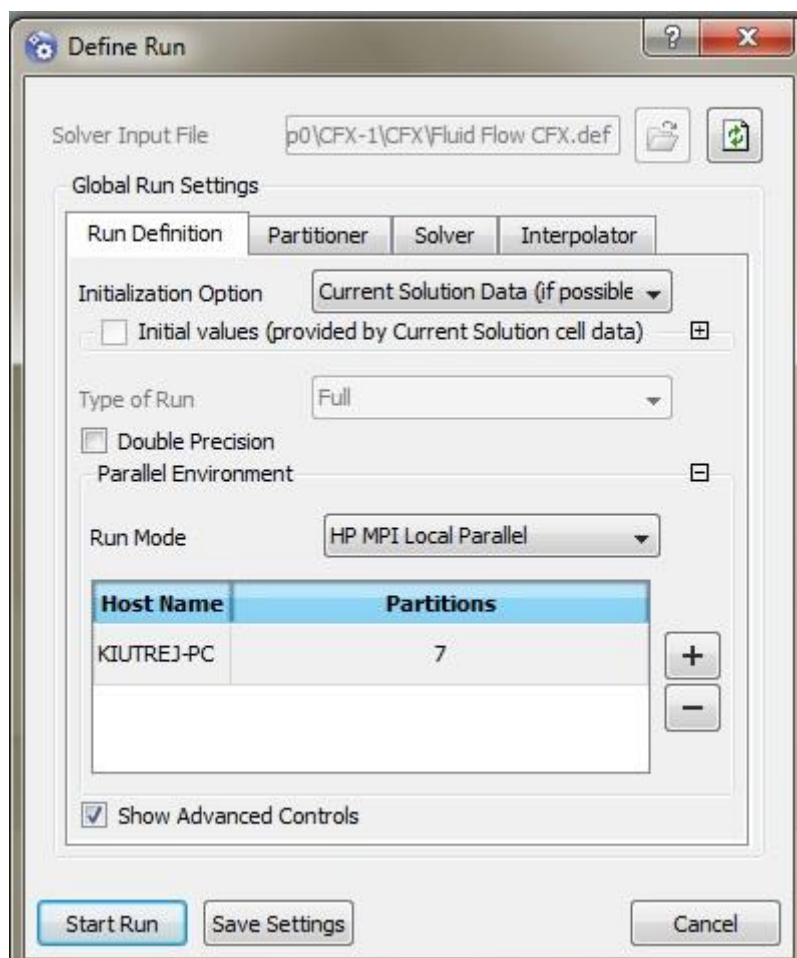
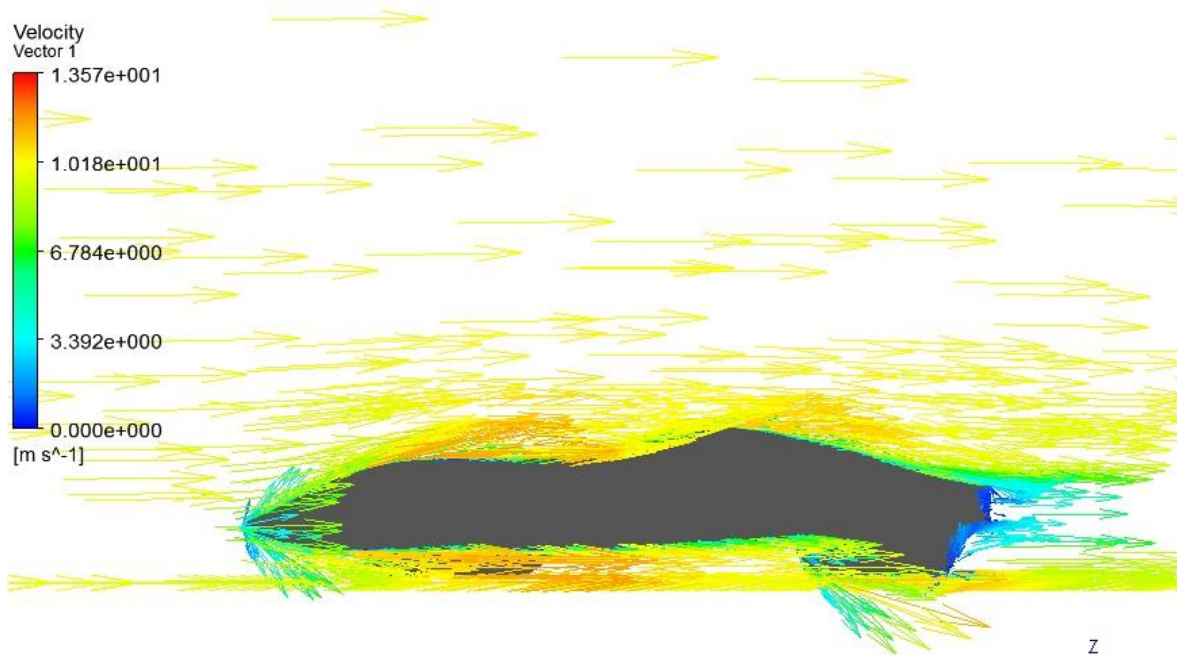


Figura 2.8. Painel de definição da execução de uma simulação.

## 2.5. Análise de Resultados

Durante esta fase é possível gerar os resultados que se pretendem estudar. Uma das primeiras variáveis a verificar é a variável  $Y^+$  atrás referida e conferir se praticamente toda a superfície do veículo está abaixo do valor pretendido. As variáveis importantes para este trabalho, que são as forças e momentos exercidos sobre as superfícies do veículo, também são calculadas durante esta fase.

Para ajudar a perceber o escoamento, é possível criar vetores de velocidade sobre uma superfície (Figura 2.9) ou, criar contornos sobre uma superfície com os valores de turbulência para visualizar a camada limite e a potencial separação.



**Figura 2.9.** Exemplo de uso de vetores para visualização de um escoamento ao longo de um plano.



## 3. RESULTADOS

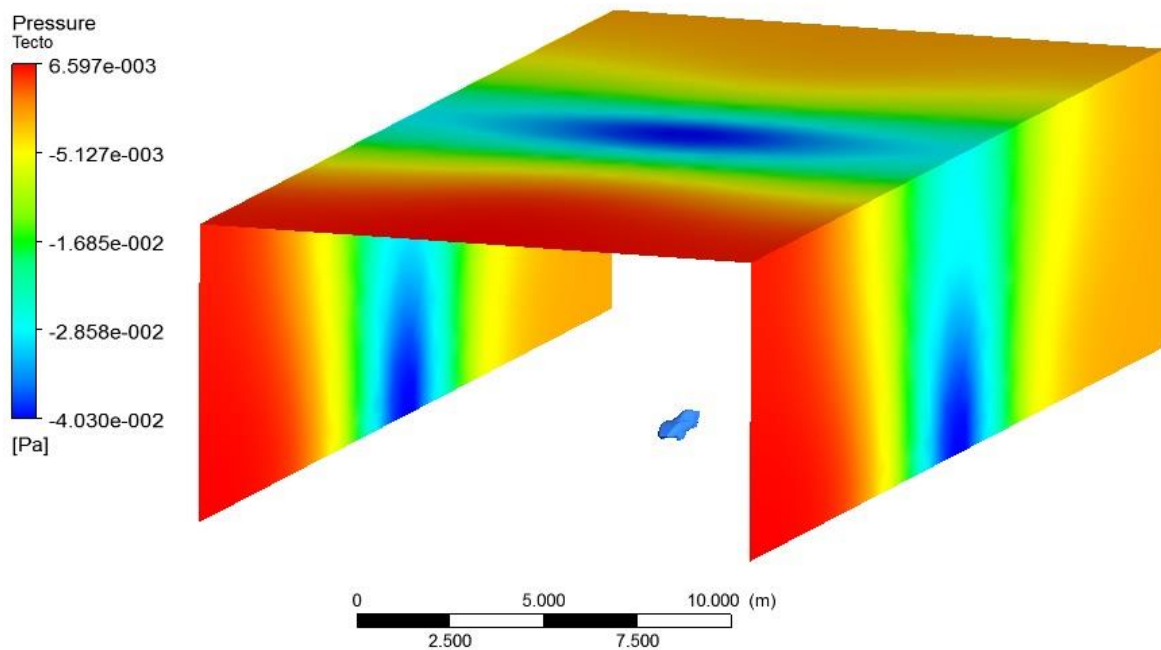
### 3.1. Estudo da Independência de Malha

O primeiro estudo a executar é o da independência de malha do sistema aerodinâmico base. É necessário que os resultados de cada teste não sejam influenciados pela malha aplicada à geometria.

O sistema aerodinâmico base escolhido consiste em o veículo estar alinhado com o escoamento, o que possibilita o uso de apenas metade do veículo nos testes, e sem um boleado aplicado entre a forma superior e a forma inferior do veículo. O escoamento de ar incidente tem uma velocidade de 10 m/s e com 5% de intensidade de turbulência.

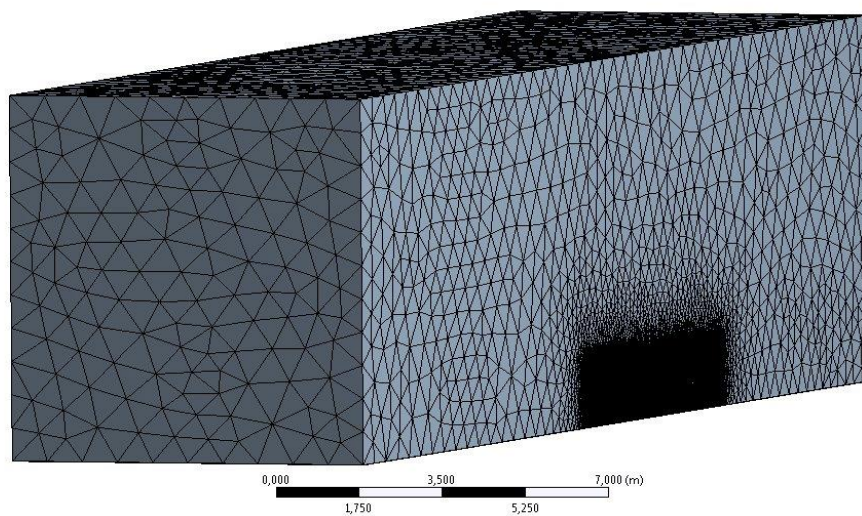
Os refinamentos de malha a usar são escolhidos para que as zonas onde o escoamento tem variações com gradientes baixos tenham uma malha grosseira e, por sua vez, as zonas onde o escoamento tem variações com gradientes elevados tenham uma malha fina. Foram feitos múltiplos testes com diferentes configurações cada vez mais refinadas, até o valor do coeficiente de arrasto estabilizar. A partir do momento em que os resultados não dependem da malha usada, é então escolhida a configuração com um coeficiente de arrasto bastante próximo do valor estabilizado e que contenha o menor número de nodos. Esta configuração é a mencionada no capítulo anterior e consiste em uma *inflation layer*, dois refinamentos do tipo corpo e um refinamento facial.

Uns dos fatores importantes a serem estudados são as dimensões da zona delimitadora do escoamento, tendo-se concluído que com um comprimento dez vezes superior ao do veículo e com 8 m de largura e 8 m de altura, além de as superfícies delimitadoras ficarem em equilíbrio ao nível da pressão (Figura 3.1), também a sua influência é praticamente nula.



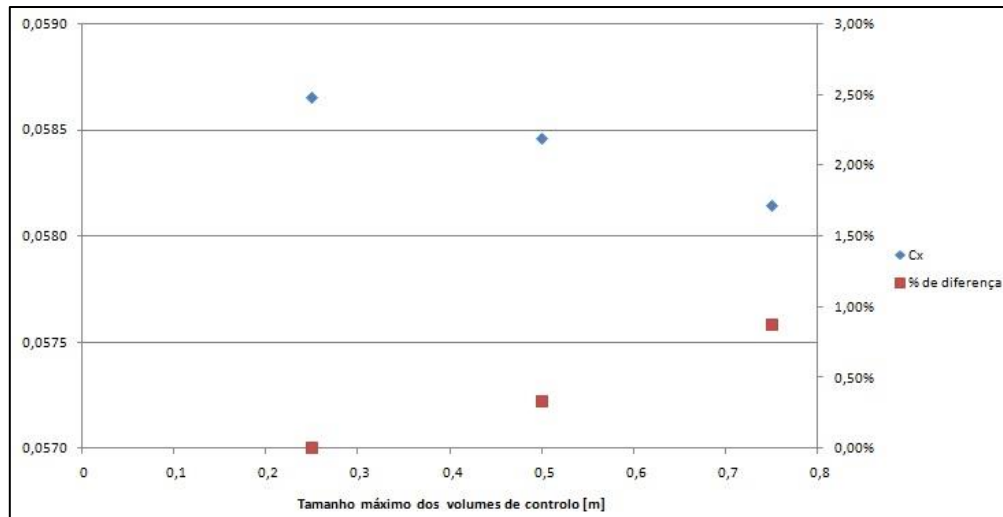
**Figura 3.1.** Equilíbrio entre as paredes delimitadoras do escoamento.

Também é importante analisar as variáveis de definição da malha geral, sendo a principal delas o tamanho máximo dos volumes de controlo. Estes têm de ser o maior possível desde que permitam captar as particularidades do escoamento. Na malha global a zona que permite uma primeira análise da adequabilidade desta variável é na entrada e saída do escoamento, evidenciada em primeiro plano na Figura 3.2.



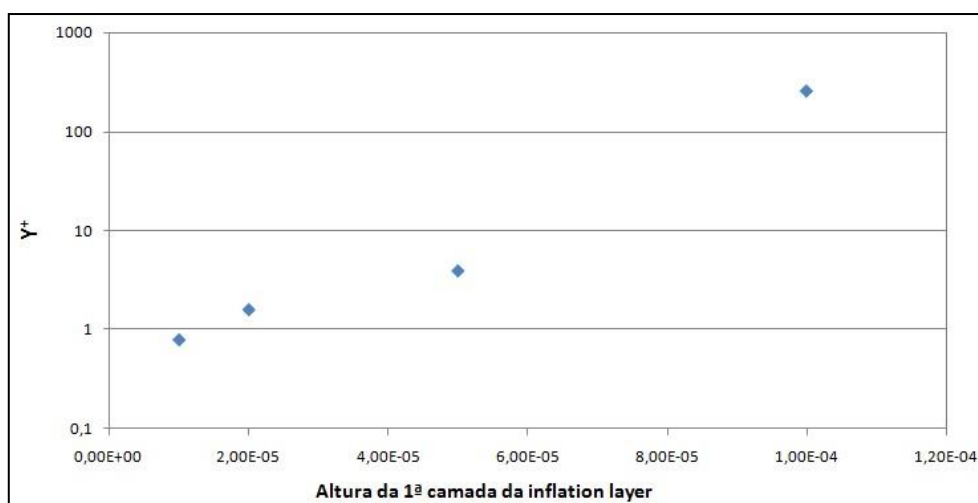
**Figura 3.2.** Visualização da malha global.

Após o estudo desta variável foi usado o valor de 0,75 m uma vez que existe uma diferença inferior a 1% no valor de  $C_x$  entre ele e o valor de 0,25 m, como se pode observar no gráfico da Figura 3.3.



**Figura 3.3.** Variação de  $C_x$  com o tamanho máximo dos volumes de controlo e a sua diferença relativa ao  $C_x$  com 0,25 m de tamanho máximo dos volumes de controlo.

A altura da primeira camada da *inflation layer* é o fator que influencia o valor da variável de  $Y^+$ . O seu estudo, representado na Figura 3.4, concluiu que a altura da primeira camada deve ter  $1 \times 10^{-5}$  m para ser possível obter um valor máximo para  $Y^+$  de 1 em todo o corpo.



**Figura 3.4.** A relação entre o valor de  $Y^+$  e a altura da primeira camada da *inflation layer*.

Foi definido como taxa de crescimento o valor de 1,3, que equilibra uma boa captação da subcamada laminar sem criar um malha demasiado fina. O número de camadas, 20, é o máximo possível para a malha utilizada, na medida em que a próxima camada seria composta por nodos maiores do que a malha em seu redor.

Foi também estudada a influência da intensidade de turbulência, cujos resultados estão representados na Figura 3.5, concluindo-se que não existem perturbações devido à variação deste fator.

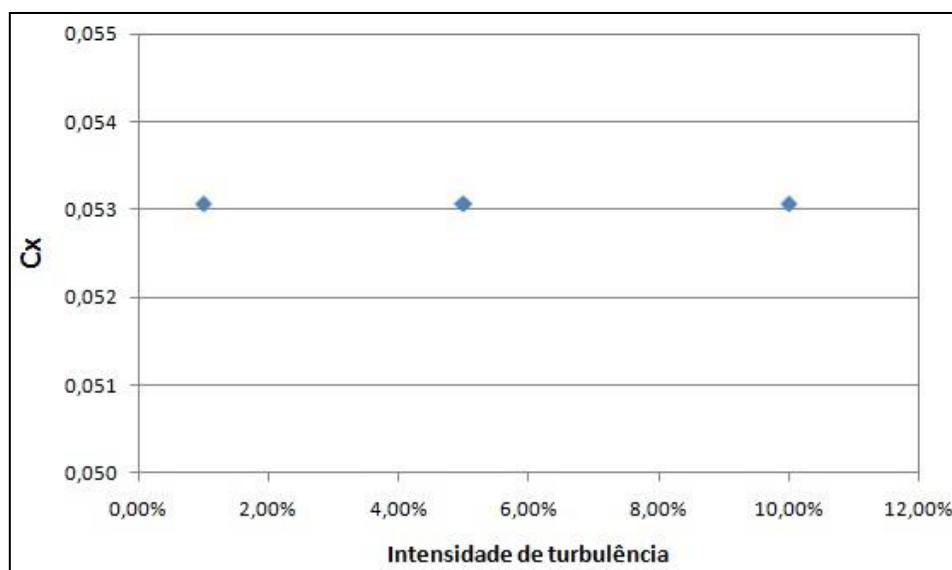


Figura 3.5. A relação entre o valor de  $C_x$  e intensidade de turbulência

### 3.2. Velocidade

Foi feito um pequeno estudo para observar o comportamento do valor do coeficiente de arrasto com o número de Reynolds (Figura 3.6) e das forças de arrasto provocadas pela viscosidade e pela diferença de pressão com a velocidade (Figura 3.7). Foram escolhidas as velocidades 2,5; 5, 7,5; 8,33 e 10 m/s, na medida que é esta a gama de velocidade que o veículo atinge durante as competições em que participa.

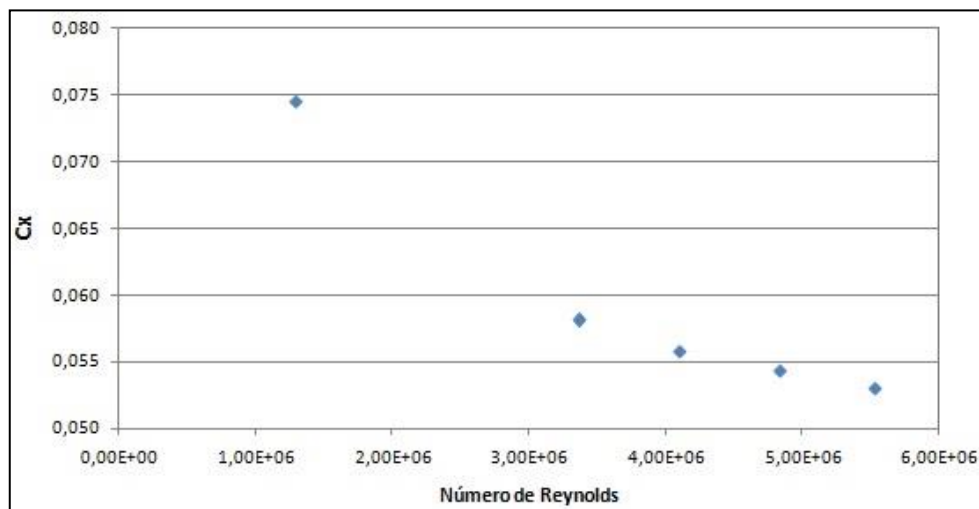


Figura 3.6. Evolução do valor de Cx com o número de Reynolds.

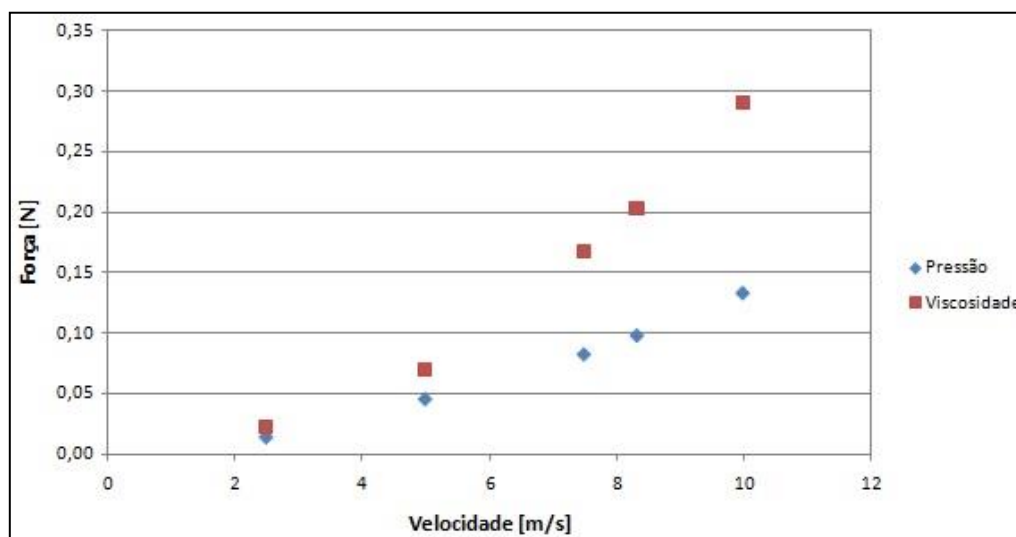
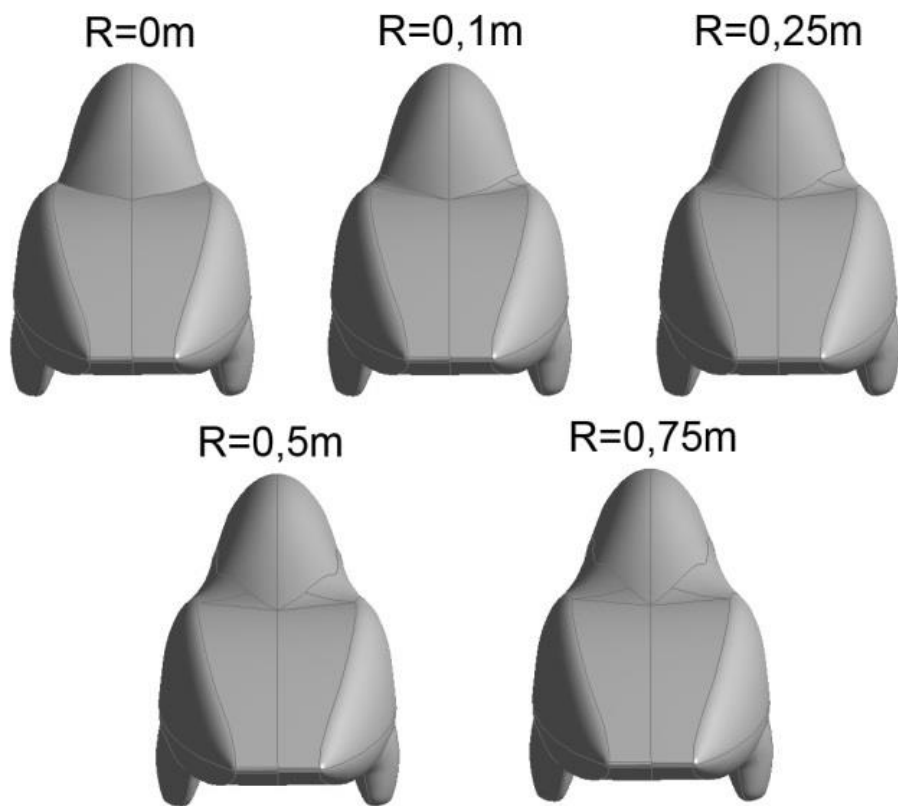


Figura 3.7. Evolução das forças de arrasto originadas pela viscosidade e pela diferença de pressões com a velocidade do veículo.

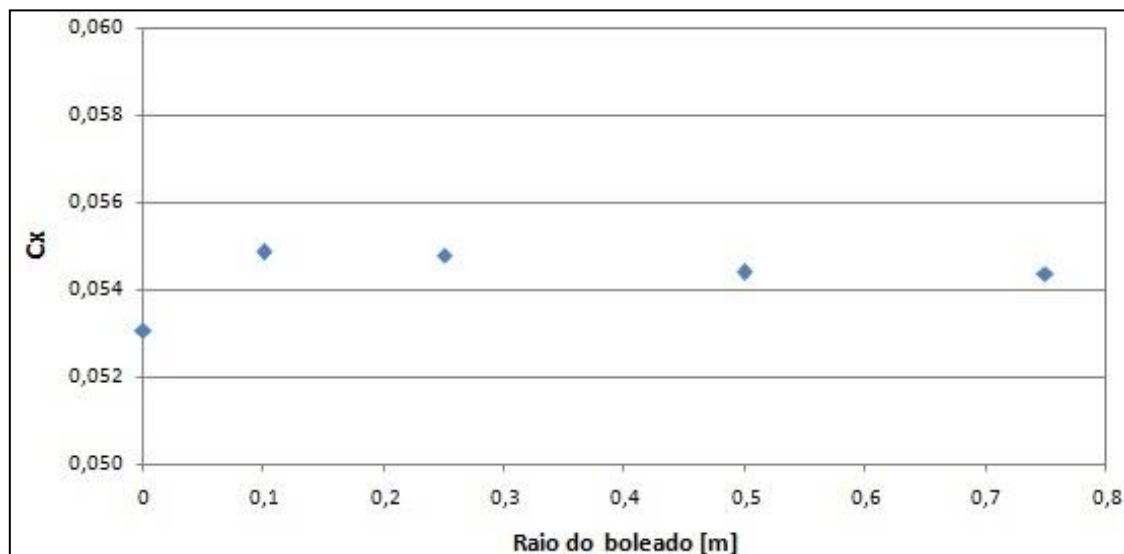
Do estudo realizado conclui-se que com o aumento da velocidade o valor do coeficiente de arrasto diminui, apesar do aumento exponencial da força que o ar exerce sobre o veículo.

### 3.3. Boleado

O estudo seguinte é a análise de como varia o coeficiente de arrasto com a introdução de um boleado entre a forma superior e a forma inferior do veículo (Figura 3.9). Esta operação faz um arredondamento, com raio variável, da aresta que estabelece fronteira entre a forma superior e a inferior, ao qual é imposto um valor máximo. Os diversos valores usados estão ilustrados na Figura 3.8.



**Figura 3.8.** Valores dos raios usados na operação boleado.



**Figura 3.9.** Variação de  $C_x$  com o valor do raio do boleado.

Ao contrário do que seria de esperar, a alteração ao veículo é prejudicial para o seu desempenho aerodinâmico. Apesar de haver uma diminuição da área superficial do veículo existe, contudo, um aumento da força de arrasto provocada pelas forças viscosas e um aumento ainda maior da força de arrasto por pressão, que pode ser explicado pela alteração da camada limite em termos do local onde inicia a sua transição para o regime turbulento e a sua espessura. (Tabela 3.1).

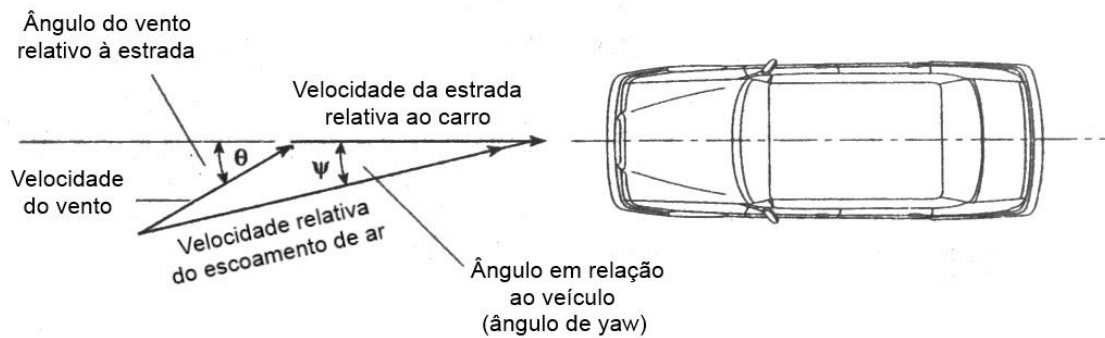
**Tabela 3.1.** Componentes da força de arrasto e a área superficial do veículo em função do raio do boleado

	Força de arrasto por fricção [N]	Força de arrasto por pressão [N]	Área [m <sup>2</sup> ]
<b>Raio de boleado 0 m</b>	0,290	0,133	2,07428
<b>Raio de boleado 0,75 m</b>	0,302	0,310	2,07222

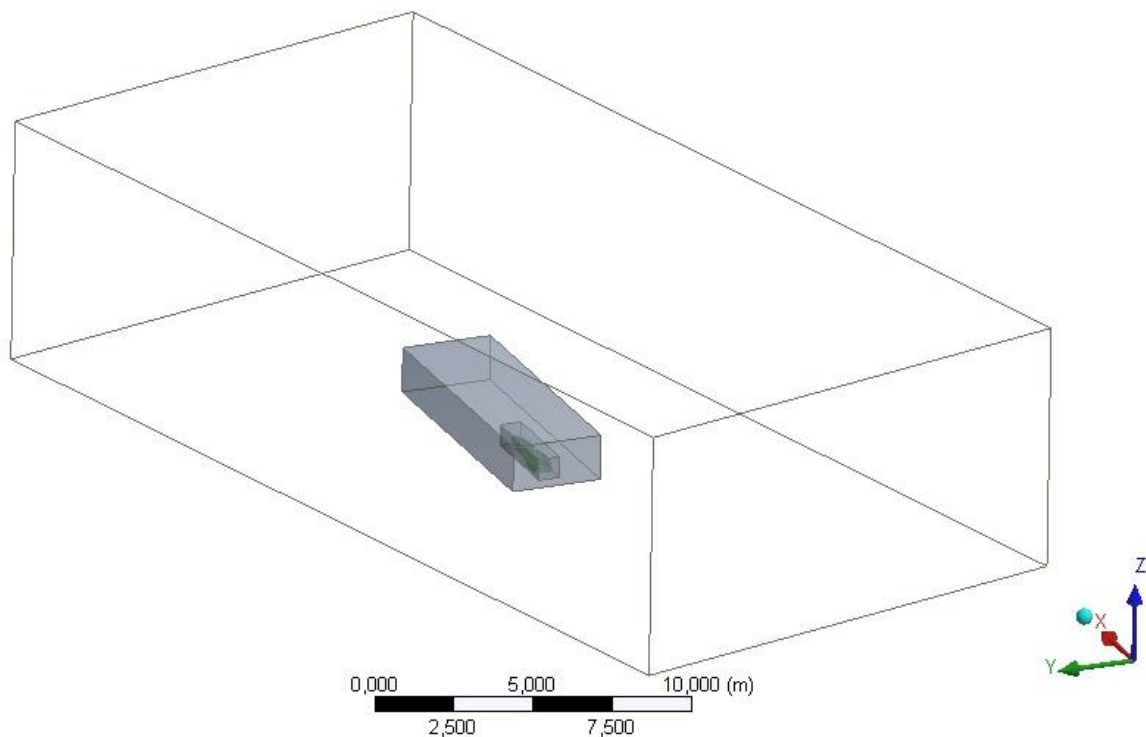
### 3.4. Ângulo de *Yaw*

Foi ainda estudada a influência do ângulo que a componente da velocidade relativa do escoamento paralela ao solo faz com o plano de simetria do veículo, que é designado de ângulo de *yaw* (Figura 3.10). Ao contrário dos testes anteriores em que era só

usado metade do veículo, agora é necessário usar o veículo inteiro nos testes, pois deixa de haver plano de simetria (Figura 3.11). Assim sendo, é usado uma malha menos refinada pois a geometria aumenta de volume para o dobro e com o mesmo tipo de malha o *hardware* era insuficiente para a execução da simulação.



**Figura 3.10.** Definição de ângulo de yaw. Fonte: Barnard, R.H. (2001) , “Road Vehicle Aerodynamic Design”

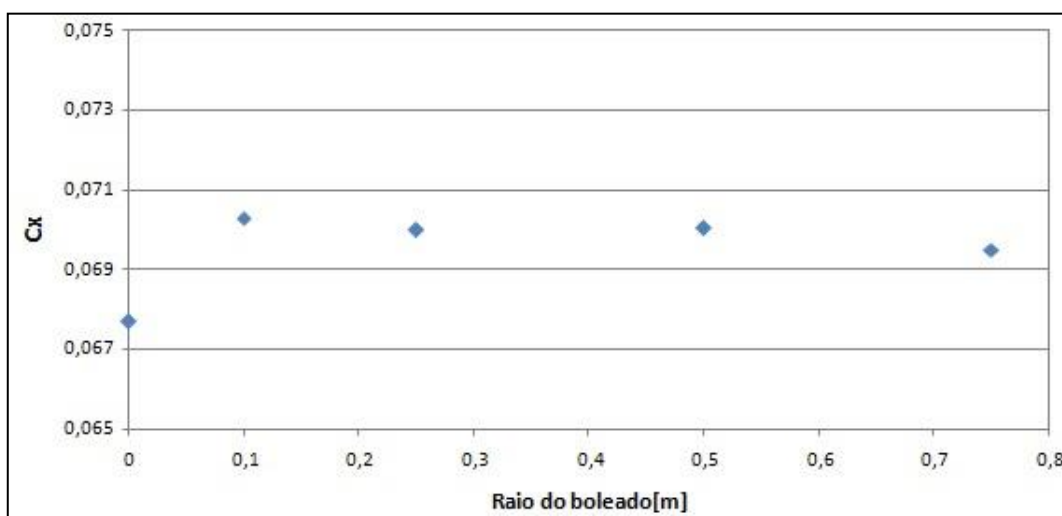


**Figura 3.11.** Configuração para os testes com o veículo inteiro.



A malha contém os mesmos refinamentos, no entanto os volumes de controlo da malha geral passam a ser limitados a 1 m de tamanho máximo, apenas o máximo de 15 camadas de *inflation layer* e os volumes de controlo do refinamento facial ficam limitados a 20 mm.

Foi feito novamente o estudo da variação do raio do boleado, mas agora com o veículo com um ângulo de *yaw* de 10 graus (Figura 3.12).



**Figura 3.12.** Variação de  $C_x$  com o raio do boleado, com um ângulo de *yaw* de 10°.

De registar que os resultados obtidos foram semelhantes aos resultados do mesmo estudo com o ângulo de *yaw* de zero graus.



## 4. CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi a análise do efeito da introdução de um boleado e a conclusão chegada não foi a esperada. Apesar de uma pequena diminuição da área em contacto com o ar e do arredondamento de uma das arestas principais, o veículo apresentou um comportamento pior a nível aerodinâmico.

O valor do coeficiente de arrasto a que se chegou nos testes é demasiado baixo, todavia, era expectável este resultado, uma vez que, o modelo usado é uma versão simplificada do real que não contém as rodas.

No trabalho realizado o potencial do programa ANSYS foi limitado pela capacidade máxima do *hardware* utilizado. Assim considera-se que no futuro é possível aperfeiçoar este trabalho com valores mais fiáveis e com visualizações mais complexas do escoamento aerodinâmico. Também é convicção que o ANSYS pode ser melhorado, principalmente no que diz respeito a tornar mais intuitiva a criação de malha e a possibilitar uma melhor organização dos resultados apresentados sem haver necessidade de se recorrer a programas secundários.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barnard, R.H. (2001) , “Road Vehicle Aerodynamic Design”, 2º Ed., MechAero Publishing.

Katz, Joseph (2006), “Race Car Aerodynamics”, Bentley Publishers.

LEAP Support Team (2012), “Tips & Tricks: Estimating the First Cell Height for correct Y+”. Acedido em 2 de Julho de 2013, em: <http://www.computationalfluidynamics.com.au/tips-tricks-cfd-estimate-first-cell-height/>.

McBeath, Simon (2011), “Competition Car Aerodynamics”, 2ª Ed., Haynes Publishing.

Oliveira, L.A. e Lopes, A.M.G. (2006), “Mecânica dos Fluidos”, 2ª Ed., LIDEL -Edições Técnicas.

Tamai, Goro (1999), “The Leading Edge”, Robert Bentley Publishers.