



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Optimização Aerodinâmica da Forma da Carroçaria de um Veículo Automóvel Protótipo de Elevada Eficiência Energética para Competir na Shell Eco-Marathon Europe 2014

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Automóvel

Autor

João Miguel Geraldês Leitão

Orientador

Pedro de Figueiredo Vieira Carvalheira

Júri

Presidente Professor Doutor Almerindo Domingues Ferreira
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Professor Doutor António Manuel Gameiro Lopes
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor Pedro de Figueiredo Vieira Carvalheira
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Julho, 2014

Engineers turn dreams into reality.

Hayao Miyazaki, *The Wind Rises*

Agradecimentos

Gostaria de aproveitar este espaço para agradecer sinceramente a todos os que me ajudaram e encorajaram ao longo da minha carreira académica, sem os quais este trabalho não podia ter sido realizado.

Ao Professor Doutor Pedro Carvalheira pelo apoio e ensinamentos prestados, não só neste trabalho como também ao longo do curso e na equipa do Eco Veículo.

À minha família por sempre acreditarem em mim e me apoiarem nas minhas decisões.

Aos meus amigos, que de perto ou à distância me acompanharam nesta fase da minha vida.

Resumo

O objectivo deste trabalho no âmbito da Dissertação de Mestrado em Engenharia Automóvel consiste em desenhar, estudar e otimizar a forma da carroçaria para um veículo protótipo com o objectivo de participar na Shell Eco-Marathon Europe, de forma a minimizar o arrasto aerodinâmico e, conseqüentemente, o consumo de combustível do veículo na competição.

O estudo inicia-se com a pesquisa bibliográfica de vários tipos de formas aerodinâmicas e a sua optimização através de métodos matemáticos. De acordo com os conhecimentos obtidos, é definida a geometria da carroçaria do veículo que terá que conter o chassis e componentes já existentes, para além de respeitar o regulamento da competição. Esta geometria deverá ter uma área frontal, lateral e volume o mais baixos possível.

De seguida, procura-se estudar a influência de variáveis geométricas da carroçaria, como a altura do nariz ao solo, a altura máxima do carro e a forma da linha de camber e o seu camber máximo no comportamento aerodinâmico do carro, enquanto que nas carenagens das rodas foram estudados parâmetros como as coordenadas do bordo de ataque e o camber máximo. Esta análise é efectuada com recurso a um *software* de mecânica de fluidos computacional.

Palavras-chave: Aerodinâmica, Protótipo, Mecânica de Fluidos Computacional, Arrasto Aerodinâmico, Eficiência Energética.

Abstract

The objective of the work presented in the context of a Master's Thesis in Automotive Engineering is to design, study and optimize the body shape of a prototype vehicle with the aim to compete in the Shell Eco-Marathon Europe, with the goal of reducing the aerodynamic drag and consequently, the fuel consumption of the vehicle in the event.

The study starts with the research of various types of aerodynamic shapes and their optimization through mathematical means. In accordance to the knowledge acquired, the shape of the body is designed, knowing that it must envelop both the chassis and the other components, and also comply with the event's rules. The bodywork must have frontal and side areas, as well as a volume, as low as possible.

Next, the aim is to study the influence of the geometric variables of the body like the nose height, the maximum height of the vehicle and the shape of the camber line and its maximum camber in the aerodynamic behaviour of the vehicle. Meanwhile, in the wheel fairings the parameters studied were such as the leading edge's coordinates and the maximum camber. This analysis was made with a commercial software of computational fluid dynamics.

Keywords Aerodynamics, Prototype, Computational Fluid Dynamics, Aerodynamic Drag, Energy Efficiency

Índice

Índice de Figuras	vi
Índice de Tabelas	vii
Simbologia e Siglas	viii
Simbologia.....	viii
Siglas	ix
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Revisão Bibliográfica	2
2. Fundamentos Teóricos.....	3
2.1. Atrito Viscoso	3
2.2. Coeficiente de Arrasto	4
3. Projecto do Veículo	5
3.1. Premissas do Projecto	5
3.2. Geometria da Carroçaria	5
3.3. Geometria das Carenagens Dianteiras	8
3.4. Geometria da Carenagem Traseira	8
3.5. Modelação 3D.....	9
4. Simulação Numérica.....	11
4.1. Domínio de Cálculo	11
4.1.1. Blocagem	12
4.1.2. Comprimento do Domínio de Cálculo.....	13
4.2. Malha	14
4.2.1. Inflation Layer	14
4.2.2. Tamanho da malha.....	16
4.2.3. Face Sizing	17
4.2.4. Cells Across Gap	18
4.3. CFX-Pre	19
4.4. CFX-Solver	20
4.5. CFX-Post	21
5. Apresentação e Análise de Resultados	22
5.1. Linha de Camber e Altura do Nariz.....	22
5.2. Carenagens Dianteiras	25
5.3. Resultados Finais	26
6. Conclusões.....	29
Referências Bibliográficas.....	30
Anexo A – Resultados dos Ensaios de Geometria	31

Anexo B – Geometrias do Veículo para Diferentes Valores de Camber Máximo	33
Anexo C – <i>Inputs</i> no CFX-Pre	34

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição de velocidade do escoamento numa placa plana (White, 1998)	3
Figura 2 - Representação da vista de perfil no MS Excel	6
Figura 3 - Exemplo de uma secção da carroçaria	7
Figura 4 - Pontos do bordo de ataque da carenagem traseira	9
Figura 5 - Visualização das secções no Autodesk Inventor	9
Figura 6 - Sólido 3D do veículo	10
Figura 7 - Domínio de cálculo	11
Figura 8 - C_x em função do comprimento do domínio de cálculo atrás do carro	13
Figura 9 - C_x em função do comprimento do domínio de cálculo à frente do carro	14
Figura 10 - Pormenor da <i>inflation layer</i> na visualização da malha	16
Figura 11 - C_x em função do tamanho dos elementos	16
Figura 12 - C_x em função do <i>face sizing</i> na carroçaria	17
Figura 13 - C_x em função do <i>face sizing</i> nas carenagens e rodas	18
Figura 14 - C_x em função do número de camadas de células entre objectos	19
Figura 15 - Gráfico dos cálculos no CFX-Solver	20
Figura 16 - Representação gráfica dos resultados do cálculo do escoamento em torno do carro	21
Figura 17 - C_x em função da altura do nariz, para valores de camber máximo diferentes .	23
Figura 18 - C_x em função da altura do nariz para camber nulo	24
Figura 19 - Vista lateral da geometria final	24
Figura 20 - Comparação da vista de perfil entre as geometrias original e final	25
Figura 21 - Comparação da vista frontal entre as geometrias original e final	25
Figura 22 - C_x , C_p , C_v e forças em função da velocidade	27
Figura 23 - Eco Veículo XC20i e PAC-CAR II	28
Figura 24 - C_v em função da altura do nariz para valores de camber diferentes	32
Figura 25 - C_p em função da altura do nariz para valores de camber diferentes	32
Figura 26 - Vista de perfil das geometrias para valores de camber diferentes e altura do nariz de 252 mm	323

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de C_x para diferentes valores de blocagem.....	12
Tabela 2 - Características da <i>Inflation Layer</i>	15
Tabela 3 - C_x , C_p e C_v para diferentes cambers nas carenagens da frente	26
Tabela 4 - C_x , C_p , e C_v para diferentes velocidades de escoamento	26
Tabela 5 - Comparação de C_x e A_f entre diferentes veículos	28
Tabela 6 - Comparação de $C_x \times A_f$ entre diferentes veículos.....	28
Tabela 7 - Resultados dos ensaios de geometria	31

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

A_f - área frontal do veículo

A_t - área de secção transversal ao escoamento do domínio de cálculo

B - blocagem

C_p - coeficiente de arrasto aerodinâmico devido à pressão

C_v - coeficiente de arrasto aerodinâmico por forças viscosas

C_x - coeficiente de arrasto aerodinâmico

C_{x_c} - coeficiente de arrasto aerodinâmico corrigido

C_{x_m} - coeficiente de arrasto aerodinâmico medido

L - comprimento do corpo com que é calculado o número de Reynolds

R - raio

Re - número de Reynolds

u^* - velocidade de atrito

V_∞ - velocidade do escoamento

x_C - valor de x na linha de camber do perfil

x_L - valor de x na linha inferior do perfil

x_U - valor de x na linha superior do perfil

y_L - distância para a parede mais próxima

Y^+ - parâmetro adimensional que avalia a distância do primeiro nó à parede

z_C - valor de z na linha de camber do perfil

z_L - valor de z na linha inferior do perfil

z_T - valor de z obtido no perfil NACA

z_U - valor de z na linha superior do perfil

δ - espessura da camada limite

μ - viscosidade dinâmica

ρ - massa volúmica do fluido

ν - viscosidade cinemática

Siglas

CFD - Computational Fluid Dynamics

NACA - National Advisory Committee for Aeronautics

RAM - Random-Access Memory

SST - Shear Stress Transport

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Num mundo moderno cada vez mais preocupado com criar um modelo sustentável de obtenção e utilização de energia, é de máxima importância aumentar a eficiência energética dos veículos. Dos vários métodos através dos quais a redução do consumo de um veículo automóvel pode ser obtida, a optimização aerodinâmica é talvez a mais simples e elegante.

Apesar do estudo da aerodinâmica de veículos ter tido como objectivo original obter maiores velocidades de ponta, os mesmos conceitos podem ser aplicados na eficiência energética uma vez que o objectivo comum continua a ser o de reduzir as forças que se opõem ao movimento do veículo.

Este trabalho tem como objectivo projectar a carroçaria para um veículo protótipo capaz de participar e lutar pela vitória na Shell Eco-Marathon Europe, no âmbito do projecto Eco Veículo. Tendo como ponto de partida o trabalho realizado em Oliveira (2013), é necessário redesenhar o veículo de forma a respeitar o novo raio de viragem requerido, bem como todas as outras regras da competição, tanto dimensionais como de visibilidade do piloto. Também é necessário que a carroçaria envolva o chassis e todos os componentes já existentes no veículo, respeitando folgas pré-definidas. Por fim, a performance deve ser maximizada, estudando a forma com recurso a *software* de CFD, de modo a analisar a influência de cada parâmetro geométrico no comportamento aerodinâmico do carro e reduzir as forças opostas ao movimento. Para tal, também é estudada a construção de malha no *software* para que os resultados obtidos sejam fiáveis.

1.2. Revisão Bibliográfica

Este trabalho teve por base a continuação e melhoramento do trabalho semelhante já realizado em Oliveira (2013), sem o qual os resultados apresentados neste estudo não podiam ter sido possíveis. As bases de conhecimento em mecânica dos fluídos e do comportamento dos escoamentos foram obtidas em White (1998), não só para este estudo como também no âmbito das aulas de Aerodinâmica de Veículos leccionadas pelo Prof. Doutor Pedro Carvalheira no âmbito do Mestrado em Engenharia Automóvel da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Schlichting (2004) e Hoerner (1965) foram também uma importante fonte de conhecimento sobre o comportamento de escoamentos.

Abbot e von Doenhoff (1959) foi indispensável uma vez que foi fonte de todos os dados e fórmulas sobre perfis aerodinâmicos utilizados neste trabalho. Outras informações foram retiradas de livros com informação sobre aerodinâmica de carros como Katz (1995) e Milliken (1995) ou sobre aerodinâmica de aviões como Stinton (1983) e Torenbeek (1982).

Por fim, Câmara (2010) foi útil aquando da criação do domínio de cálculo, e Santin et al. (2007) mostrou outro ponto de vista de como construir um veículo deste tipo.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Esta secção limita-se a apresentar de forma simples e sucinta alguns dos conceitos teóricos referidos ao longo do trabalho.

2.1. Atrito Viscoso

Independentemente da velocidade do escoamento ou da geometria do corpo, a velocidade relativa do fluido na superfície vai ser sempre igual a zero, mas distante da superfície, a velocidade relativa do fluido sobre o corpo vai ter uma velocidade média resultado de uma distribuição crescente proporcional à distância da superfície, até que estabiliza num valor de V_{∞} . A distância a que esse valor estabiliza chama-se espessura de camada limite, e é normalmente variável ao longo do escoamento, como se pode verificar na Figura 1.

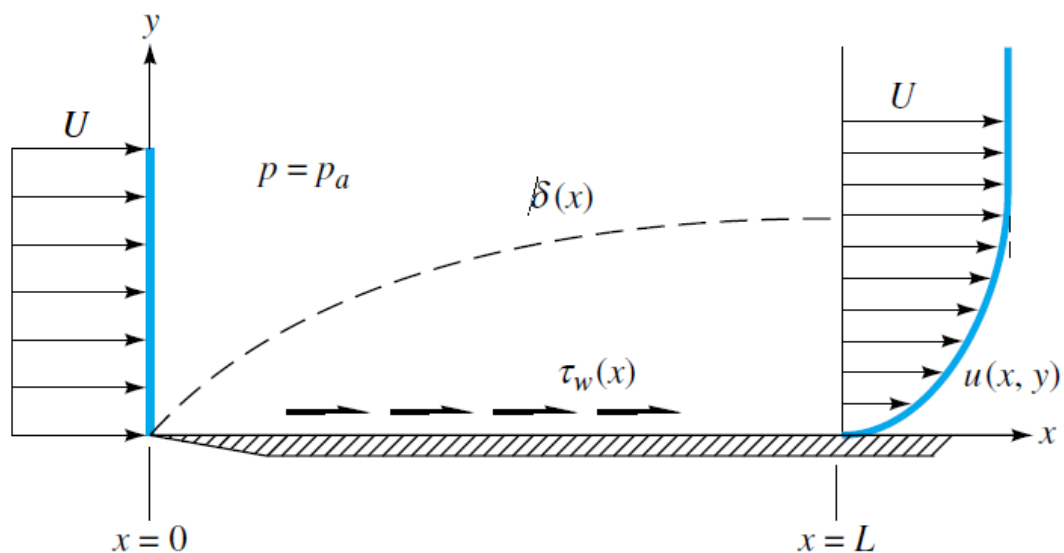


Figura 1 - Distribuição de velocidade do escoamento numa placa plana (White, 1998)

Duas características importantes nos escoamentos são a diferença entre colado ou descolado e laminar ou turbulento. Quando o escoamento segue o contorno da

superfície designa-se por escoamento colado, mas se por outro lado segue outra direcção, chama-se de escoamento separado.

Quando as partículas seguem a direcção do escoamento de forma organizada e paralela ao escoamento, este é designado por laminar, e ocorre a velocidades mais baixas. Designa-se por escoamento turbulento quando as partículas avançam de forma aparentemente aleatória e desorganizada, ocorrendo a velocidades mais elevadas. Um exemplo prático deste efeito ocorre quando é aberta uma torneira, e a partir de certo ponto é possível observar esta diferença a olho nu.

No escoamento em torno de veículos é importante saber identificar os diferentes tipos de escoamento para prever o seu comportamento, sendo o número de Reynolds o método mais usado, dado pela equação (1)

$$Re = \frac{\rho V_{\infty} L}{\mu} \quad (1)$$

Considera-se que para um Reynolds inferior a 10^5 o escoamento sobre uma placa plana é sempre laminar, sendo que acima desse valor pode ser laminar ou turbulento dependendo de vários factores. A zona em que ocorre a passagem de escoamento para turbulento chama-se zona de transição. Quando o escoamento passa a turbulento a espessura da camada limite aumenta.

2.2. Coeficiente de Arrasto

O objectivo principal deste trabalho é reduzir o coeficiente de arrasto do veículo, uma vez que quanto menor for a força que tem que vencer menos energia será despendida. Este coeficiente é dado pela equação (2).

$$Cx = \frac{Fx}{\frac{1}{2} \times \rho \times V_{\infty}^2 \times A_f} \quad (2)$$

Onde Fx é a força oposta ao carro no eixo dos xx (N)

ρ é a massa volúmica do fluido em que ocorre o escoamento (kg/m³)

V_{∞} é a velocidade do escoamento (m/s)

A_f é a área frontal do corpo (m²)

3. PROJECTO DO VEÍCULO

3.1. Premissas do Projecto

Os principais requisitos do projecto são o cumprimento dos regulamentos da Shell Eco-Marathon e a possibilidade de conter todos os componentes e o chassis que já existem. Para melhor performance na competição é desejado que o comportamento aerodinâmico seja o melhor possível, reduzindo as áreas frontal e lateral da carroçaria. Esta deve também promover um escoamento laminar do ar durante o máximo comprimento possível, com as isolinhas de pressão paralelas entre si.

Foi definido um sistema de eixos com origem no centro das rodas e no eixo de simetria do veículo. O eixo dos xx corresponde ao eixo longitudinal do carro, da frente para trás; o eixo dos yy é perpendicular ao dos xx e o eixo dos zz é vertical, positivo de baixo para cima.

A carroçaria será desenvolvida no *software* MS Excel e mais tarde exportada para o Autodesk Inventor através da aplicação Autodesk Point Linker onde será criado o sólido para as simulações numéricas.

3.2. Geometria da Carroçaria

A planta da carroçaria segue o perfil NACA 63-021 retirado de Abbot e von Doenhoff (1959) e multiplicado por um factor de 1,1922 para um comprimento de 2922,6 mm.

O perfil do carro acompanha uma linha de camber definida através da forma de Morelli. Definiu-se um camber inicial de 0,033 e uma altura do nariz de 252 mm. A linha superior do perfil é dada por um perfil NACA 66-018 que é um perfil com a espessura máxima um pouco mais atrás do que os outros, multiplicado por um coeficiente variável. O perfil foi ainda alongado entre 45 % e 60 % do veículo, e a partir de 50 % foi alargado com recurso a um polinómio de modo a ser possível englobar o chassis actual e melhorar o escoamento na traseira do veículo. A linha inferior não é simétrica, seguindo o mesmo

perfil 66-018 até 20 % do veículo, sendo recta desse ponto até à traseira de modo a evitar o efeito de sustentação. Os pontos destas linhas são dados em relação à linha de camber e o ângulo α entre pontos consecutivos, sendo as coordenadas da linha superior (*upper*) dadas pelas equações (3) e (4) e as da linha inferior (*lower*) pelas equações (5) e (6), retiradas de Abbot e von Doenhoff (1959), onde z_t corresponde aos valores do perfil NACA obtidos.

$$x_U = x - z_t \times \sin \alpha \quad (3)$$

$$z_U = z_0 + z_t \times \cos \alpha \quad (4)$$

$$x_L = x + z_t \times \sin \alpha \quad (5)$$

$$z_L = z_c - z_t \times \cos \alpha \quad (6)$$

Na Figura 2 é possível observar ambas as linhas, bem como a linha de camber, os pontos de chassis críticos no desenho da carroçaria e as rodas.

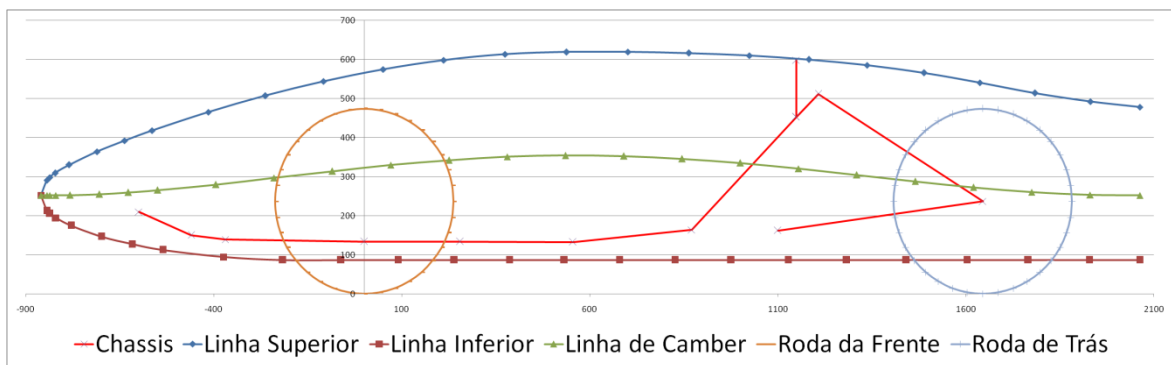


Figura 2 - Representação da vista de perfil no MS Excel

Para ser possível criar um sólido 3D é necessário definir pontos entre as linhas superiores e inferiores e a planta do veículo. Foram então criadas 25 secções correspondentes a cada ponto dado pelos perfis NACA, cada secção com 36 pontos no plano YZ, um a cada 10 graus, que formam curvas hiperquadráticas de equação (7).

$$\left(\frac{y}{a}\right)^m + \left(\frac{z}{b}\right)^m = 1 \quad (7)$$

O expoente m é diferente das curvas superiores e inferiores devido à necessidade da metade inferior da carroçaria ser mais larga. Para cálculo mais preciso das secções em zonas críticas, foram criadas 16 secções adicionais que não são usadas na

construção do sólido 3D, servindo apenas para definir as folgas na carroçaria. A Figura 3 mostra um exemplo de uma dessas secções, onde é possível observar as curvas superiores e inferiores da carroçaria bem como os pontos críticos do chassis naquela ordenada que a carroçaria deve envolver.

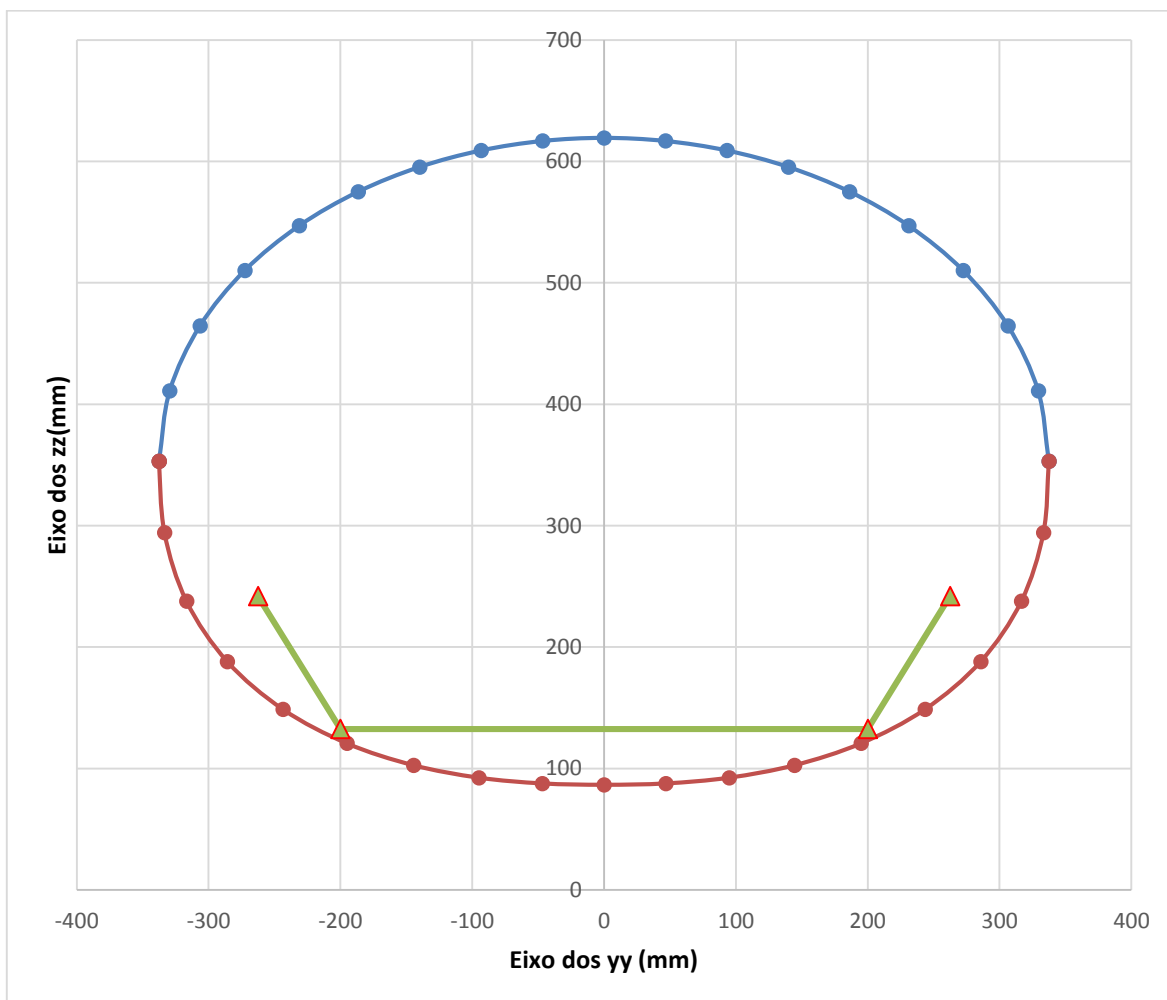


Figura 3 - Exemplo de uma secção da carroçaria

Para cálculo das coordenadas de cada ponto foram usadas as equações (8) e (9) em que z_0 corresponde ao valor de z na linha de camber e R é obtido através da equação (10) onde a é o valor do y na planta e b corresponde à diferença entre o z superior ou inferior e o z_0 .

$$y = R \times \cos(\theta) \tag{ 8 }$$

$$z = z_0 + R \times \text{sen}(\theta) \tag{ 9 }$$

$$R = \frac{a \times b}{\sqrt[m]{b^m \cos^m(\theta) + a^m \sin^m(\theta)}} \quad (10)$$

3.3. Geometria das Carenagens Dianteiras

Para as rodas da frente foram avaliadas três soluções: uma carenagem completa que englobasse a roda até ao ponto de viragem máximo, uma carenagem constituída apenas por bordo de ataque e bordo de fuga, ou seja, aberta de lado; ou a ausência de qualquer carenagem. Foi observado que uma carenagem completa teria uma largura de quase 20 mm em cada roda, o que iria aumentar significativamente a área frontal do veículo, e que a ausência de carenagem também provocaria um aumento no coeficiente de arrastamento total devido ao atrito dos pneus com o ar. Foi assim seleccionada a solução intermédia, ou seja, carenagem aberta lateralmente para permitir a viragem da roda.

Tal como para a carroçaria, foram criadas várias secções a alturas diferentes, sendo calculadas respeitando as folgas definidas, e com camber, ângulo de ataque e corda variáveis. Foi importante dar atenção à suavidade nos bordos de ataque e fuga, bem como na distribuição de espessura para não haver variações bruscas entre as camadas.

3.4. Geometria da Carenagem Traseira

A carenagem traseira foi realizada através de um método semelhante ao das dianteiras, com a diferença de o camber ser nulo, e o bordo de ataque ser suavizado no contacto com o fundo da carroçaria. As coordenadas desses pontos são dadas em (11) e exemplificadas na Figura 4.

$$\left\{ \begin{array}{l} A: (x_C - \sigma \tan 30 - \delta ; z_L) \\ B: (x_C - \frac{2}{3} \sigma \tan 50 ; z_L - \frac{1}{3} \delta) \\ C: (x_C ; z_L - \delta) \end{array} \right. \quad (11)$$

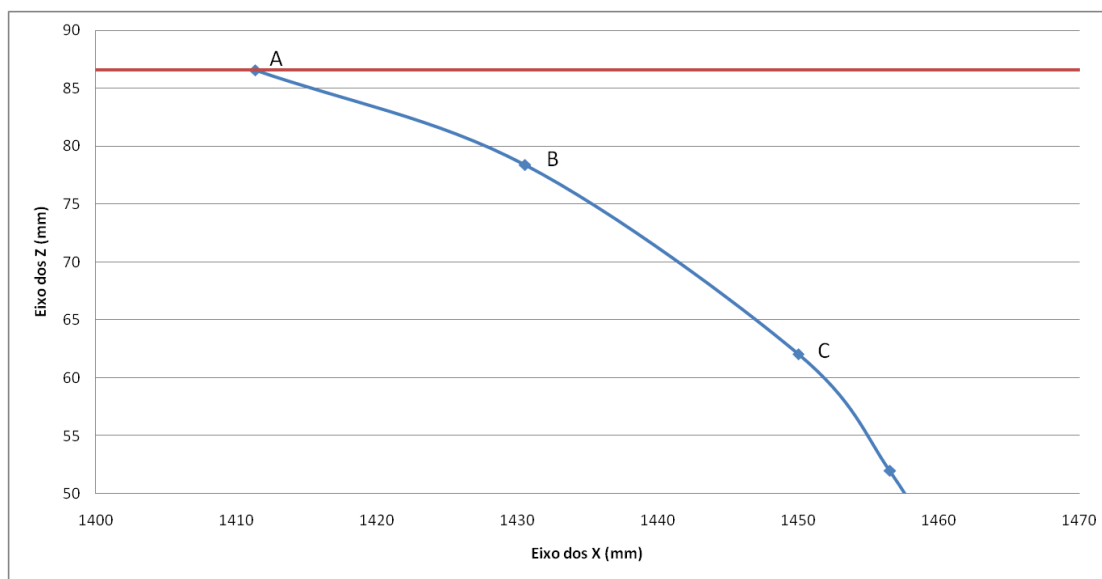


Figura 4 - Pontos do bordo de ataque da carenagem traseira

3.5. Modelação 3D

Para cada secção, da carroçaria ou das carenagens, é criada uma página no MS Excel com as suas coordenadas. As secções são depois individualmente importadas para o Autodesk Inventor com recurso a uma aplicação chamada Autodesk Inventor Point Linker. Os pontos são abertos num *Sketch* 3D para cada secção, e unidos por uma linha através da ferramenta *Spline*. O resultado é o apresentado na Figura 5.

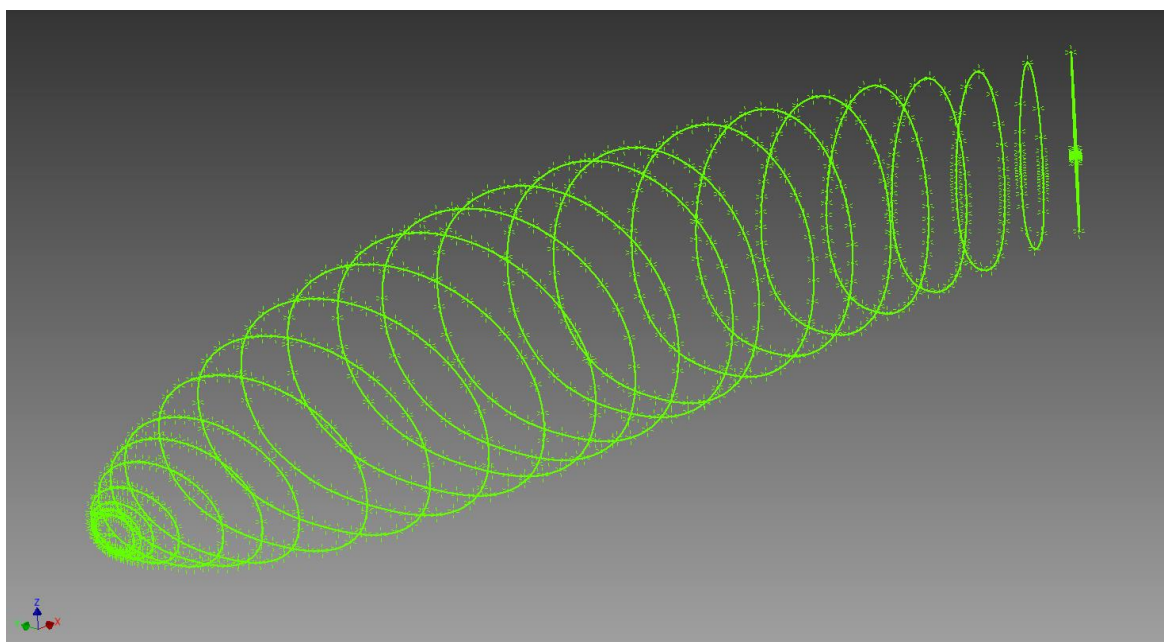


Figura 5 - Visualização das secções no Autodesk Inventor

As secções são depois unidas com um *Loft*, seguindo-se o mesmo processo para as carenagens traseira e dianteira direita. A carenagem dianteira esquerda é simétrica à direita, e por isso basta apenas usar a ferramenta *Mirror* para criar um sólido simétrico ao seleccionado. O sólido final, pronto a ser simulado é apresentado na Figura 6:

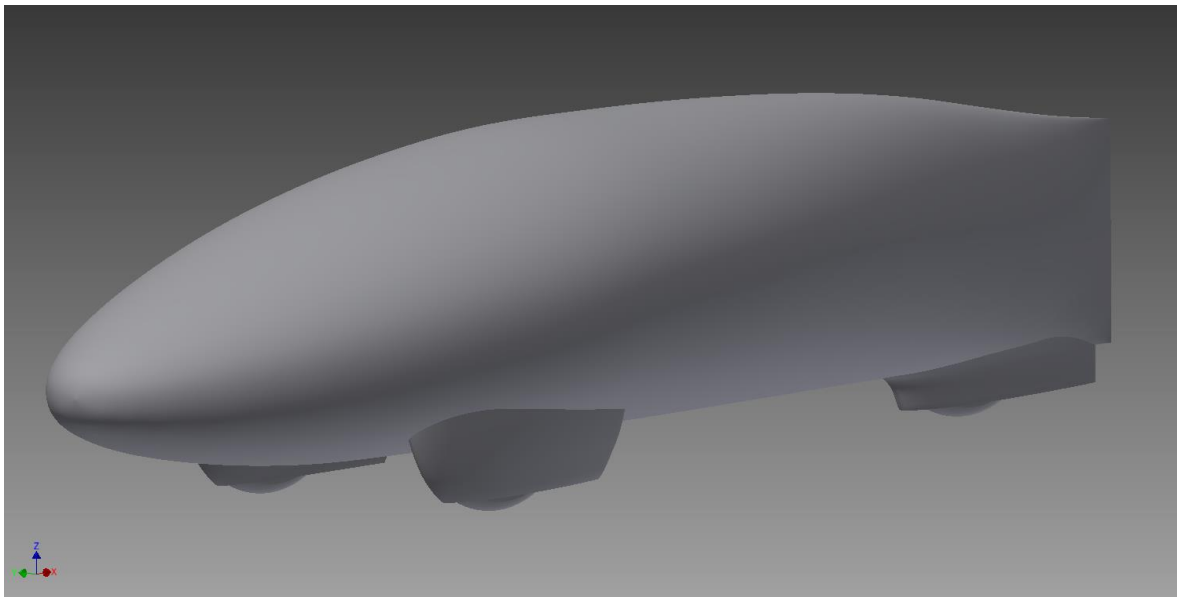


Figura 6 - Sólido 3D do veículo

4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Para realizar as simulações numéricas foi utilizado o software comercial de mecânica de fluidos computacional ANSYS, nomeadamente as ferramentas *Geometry*, *Mesh*, *CFX-Pre*, *CFX-Solver* e *CFX-Post*.

4.1. Domínio de Cálculo

Depois de criado o ficheiro IGES no Autodesk Inventor, este é importado com a ferramenta *Geometry* para o WorkBench. É criado um paralelepípedo ao qual é subtraído o volume do veículo com um *Boolean*, e dividido ao meio pelo eixo de simetria para facilitar as operações seguintes. A altura do carro ao solo foi fixada no mínimo possível (1 mm) enquanto que as restantes variantes geométricas foram alvo de estudo. O resultado final da criação do domínio de cálculo é apresentado na Figura 7.

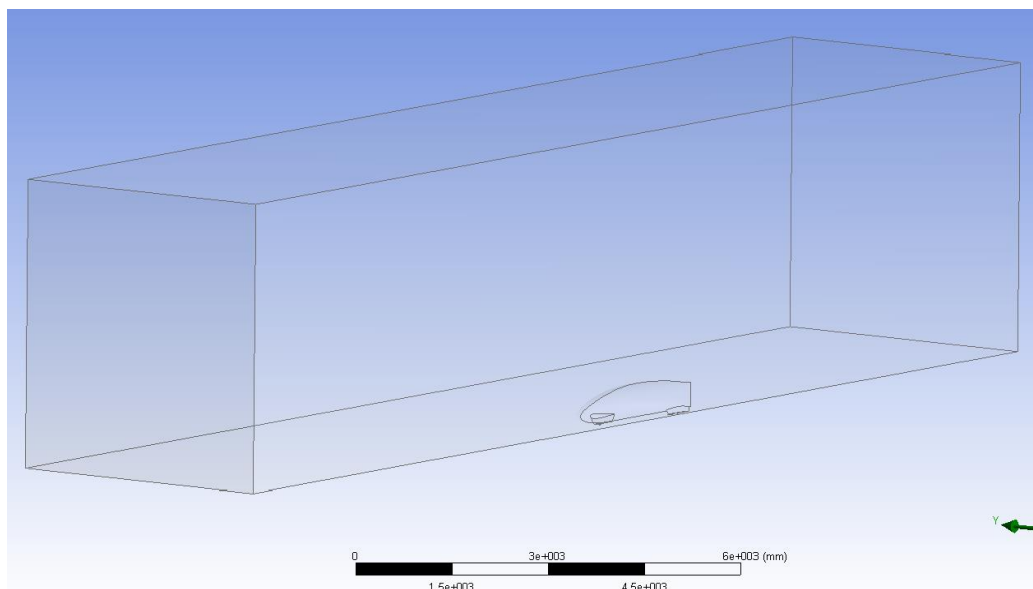


Figura 7 - Domínio de cálculo

4.1.1. Blocagem

A blocagem corresponde à razão entre a área frontal do veículo e a área da secção do domínio de cálculo transversal ao escoamento, sendo dada pela equação (12).

$$B = \frac{Af}{At} \times 100 \quad (12)$$

Foram realizados ensaios para três blocagens diferentes: 1 %, 2 % e 4 %, para uma área frontal do veículo de aproximadamente 0,34 m². Para ter em conta o efeito de blocagem, os resultados obtidos foram corrigidos para blocagem nula com a equação (13), retirada de Katz (1995).

$$Cx_c = Cx_m \left[\frac{1}{\left(1 + \frac{1}{4} \times \frac{Af}{At}\right)^2} \right] \quad (13)$$

Como é possível perceber pela fórmula, quanto menor for a blocagem, isto é, quanto maior for a secção do túnel, mais próximo está o valor corrigido do valor calculado. A maior secção para a qual foi possível gerar malha foi de 4 m de altura por 4 m de largura, que após considerada a simetria corresponde a 4 m por 8 m. Os valores de Cx obtidos, corrigidos e a variação são apresentados na Tabela 1.

Blocagem	Cx calculado	Cx corrigido	Cx _m - Cx _c
1%	0,053591	0,053307	0,000284
2%	0,054309	0,053770	0,000539
4%	0,054315	0,053229	0,001086

Tabela 1 - Valores de Cx para diferentes valores de blocagem

Por apresentar os valores mais fiáveis e não ser possível uma blocagem menor, daqui em diante a blocagem utilizada será de 1 %.

4.1.2. Comprimento do Domínio de Cálculo

A outra variável importante no domínio de cálculo é o seu comprimento, que corresponde ao comprimento do veículo somado com o comprimento à frente e atrás do veículo. O comprimento do carro para este estudo é considerado como 2900 mm, sendo os valores experimentais para o comprimento do domínio de cálculo à frente e atrás múltiplos deste valor.

O gráfico da Figura 8 mostra a variação do C_x em função do comprimento do domínio de cálculo atrás do carro, sendo a linha azul para um comprimento de $2L$ (duas vezes o comprimento do carro) à frente e a linha vermelha corresponde a um comprimento de $3L$ à frente.

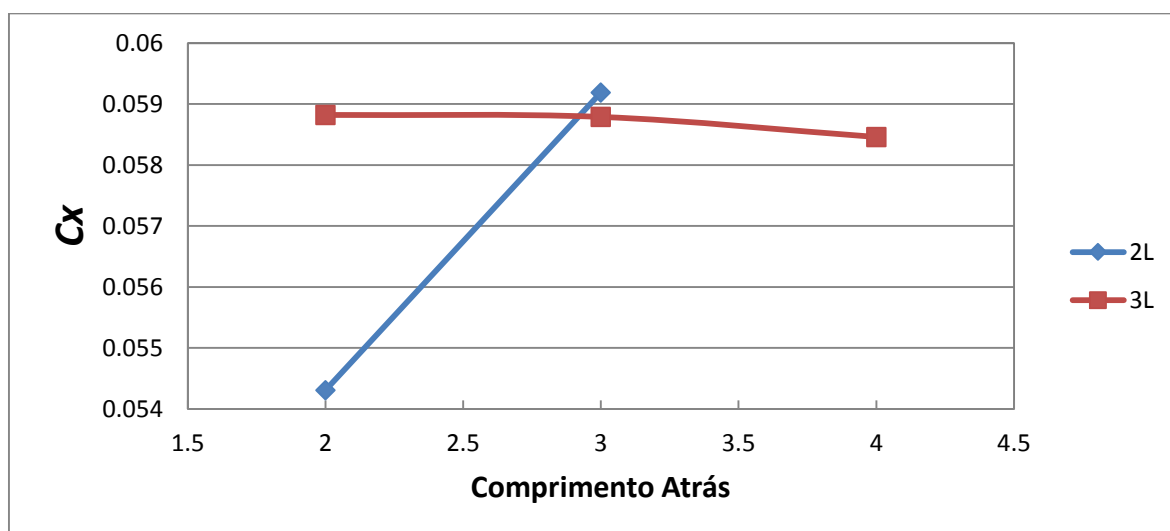


Figura 8 - C_x em função do comprimento do domínio de cálculo atrás do carro

A Figura 9 serve o mesmo propósito, mas para estudar o comprimento depois do veículo.

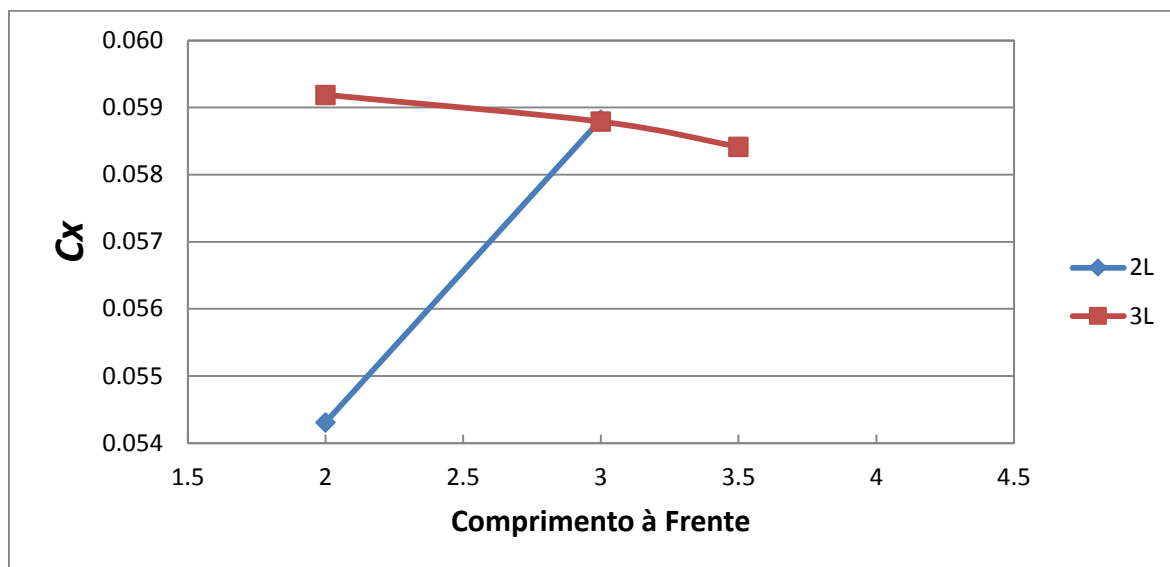


Figura 9 - Cx em função do comprimento do domínio de cálculo à frente do carro

Em ambos os casos, é possível verificar que os comprimentos de 3L, tanto antes como depois do veículo apresentam os resultados mais estáveis, tendo sido essa a opção tomada.

4.2. Malha

Um dos aspectos mais importantes para realizar ensaios eficientes é encontrar o equilíbrio entre uma malha com boa resolução e um tempo de cálculo baixo. São definidas 8 *Named Selections*, 6 correspondentes ao túnel (Inlet, Right, Left, Top, Outlet, Road) e duas relativas ao veículo (Body e Wheels). Os parâmetros de malha que foram estudados são os seguintes:

4.2.1. Inflation Layer

Para definir a *Inflation Layer* é possível alterar os valores de número de camadas, altura da primeira camada e *growth rate*, mas primeiro é necessário calcular a espessura da camada limite no bordo de fuga do carro para uma camada limite turbulenta, que é dada pela equação (14) para uma placa plana com gradiente de pressão nulo, onde L é o comprimento total do veículo, e o número de Reynolds é estimado para a pressão de 1 atm, a temperatura de 25 °C e velocidade máxima do veículo de 36 km/h ou 10 m/s.

$$\delta = \frac{0,16 \times L}{Re^{1/7}} \quad (14)$$

Com estes *inputs* seleccionados é possível calcular a espessura máxima da *inflation layer* que deverá ser maior que a altura da camada limite. Infelizmente, devido às limitações do *software* utilizado não é possível criar camadas suficientes para que isso aconteça, procurando-se assim chegar o mais perto possível.

Outro factor a ter em conta é o Y^+ , dado por (15) e que deve ser inferior a 3 nas 3 primeiras camadas para os três primeiros nós se manterem na subcamada laminar.

$$Y^+ = \frac{u^* \times y_l}{\nu} \quad (15)$$

Das 8 *inflation layers* que foi possível construir cumprindo os requisitos referidos, foi seleccionada a que tem as seguintes características, apresentadas na Tabela 2.

Growth Rate	1,3
Altura da primeira camada	0,05 mm
Número de camadas	20
Altura na última camada	7,3096 mm
Y^+ na 3ª camada	2,35346

Tabela 2 - Características da *Inflation Layer*

Na Figura 10 é possível ver a *inflation layer* resultante.

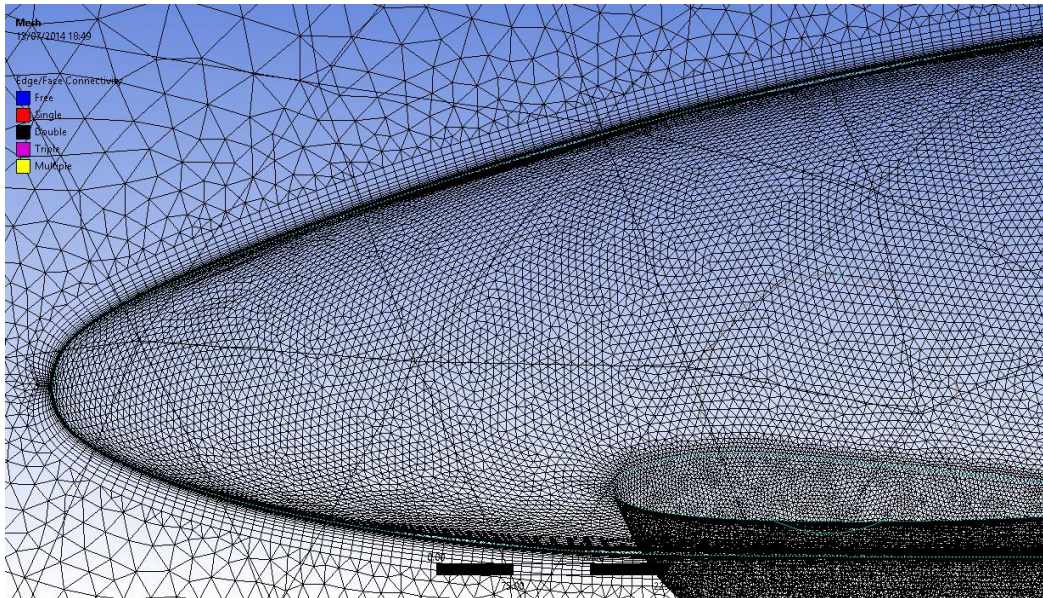


Figura 10 - Pormenor da *inflation layer* na visualização da malha

4.2.2. Tamanho da malha

Para a malha mais grosseira, foi importante avaliar não só a precisão mas também o tempo de cálculo. Os resultados são apresentados na Figura 11.

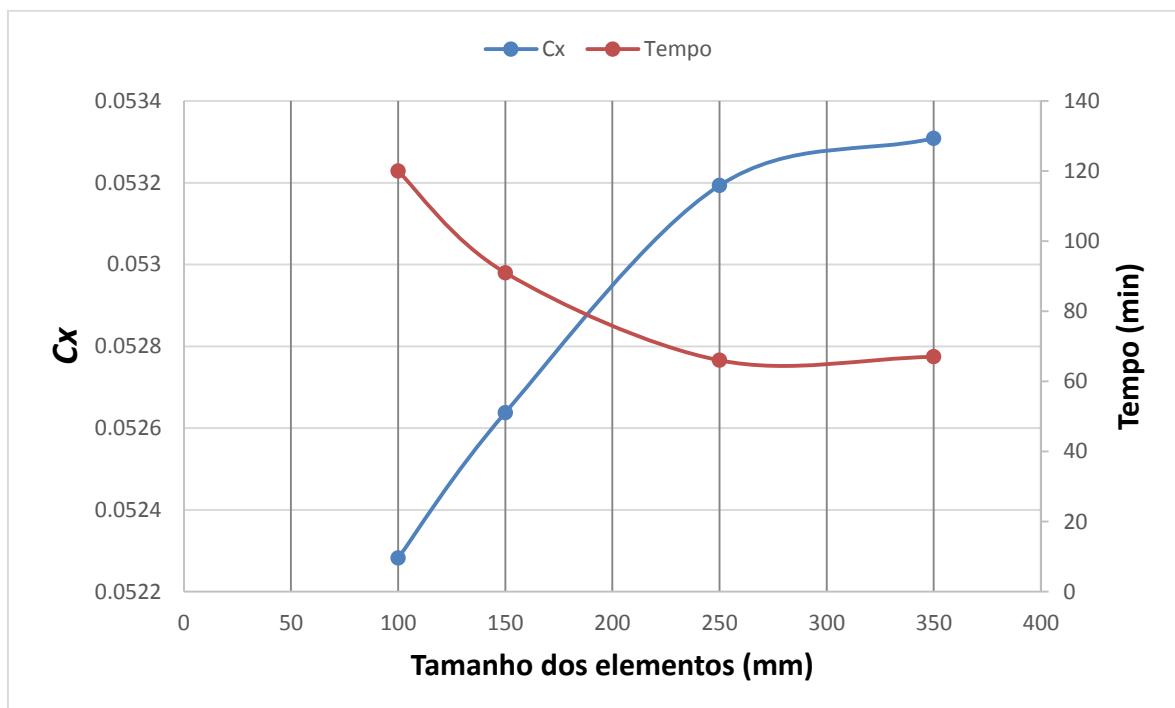


Figura 11 - Cx em função do tamanho dos elementos

Foi seleccionada uma malha com tamanho de elementos de 250 mm para uso nos ensaios comparativos, uma vez que devido ao elevado número de simulações é importante reduzir o tempo de cálculo. Para simulações em que é importante um resultado mais significativo, será usada uma malha mais refinada.

Quanto ao tamanho mínimo, a influência no tempo de simulação era insignificante, pelo que foi seleccionada a malha mais refinada que foi possível gerar, com elementos de 1 mm para todos os ensaios.

4.2.3. Face Sizing

Este parâmetro consiste em criar uma malha mais refinada em certas zonas mais importantes da simulação, neste caso, carroçaria e carenagens com rodas. Para a carroçaria foram realizadas 8 simulações para tamanho dos elementos entre os 3 mm e os 20 mm, como é possível observar na Figura 12.

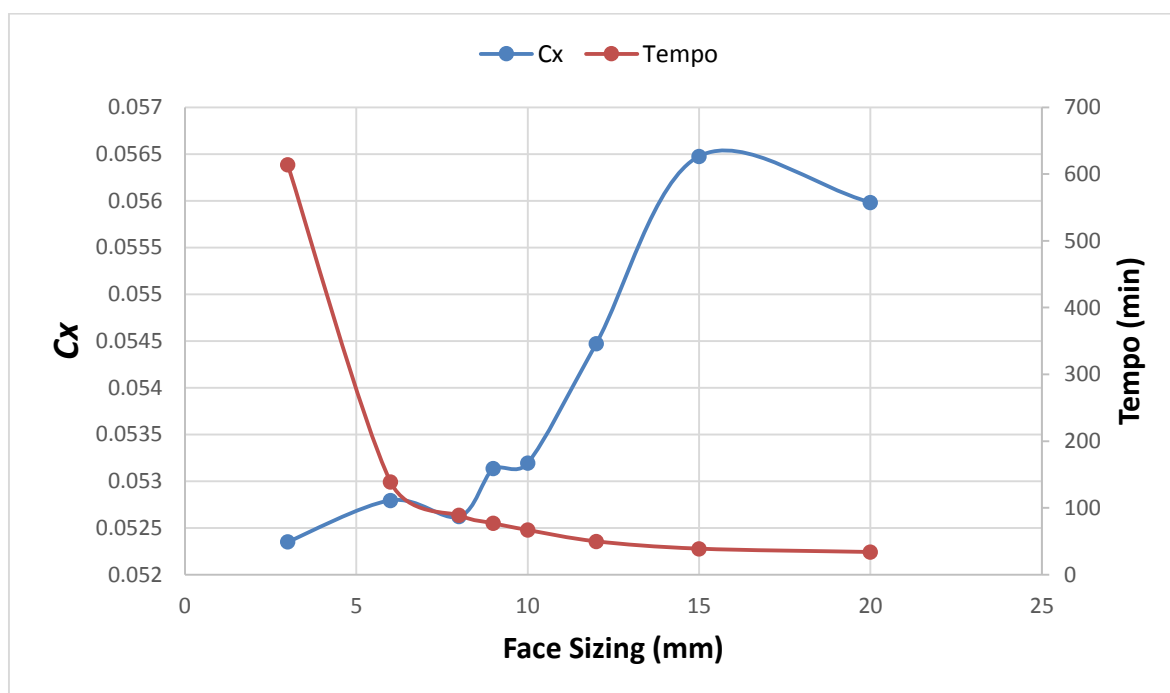


Figura 12 - Cx em função do *face sizing* na carroçaria

A malha escolhida foi a de 10 mm, uma vez que os resultados foram inconstantes para malhas com maior resolução, e o tempo de cálculo aumenta

significativamente. Quanto à resolução nas carenagens e rodas, foram realizados 7 ensaios entre 1,5 mm e 15 mm, com os resultados apresentados na Figura 13.

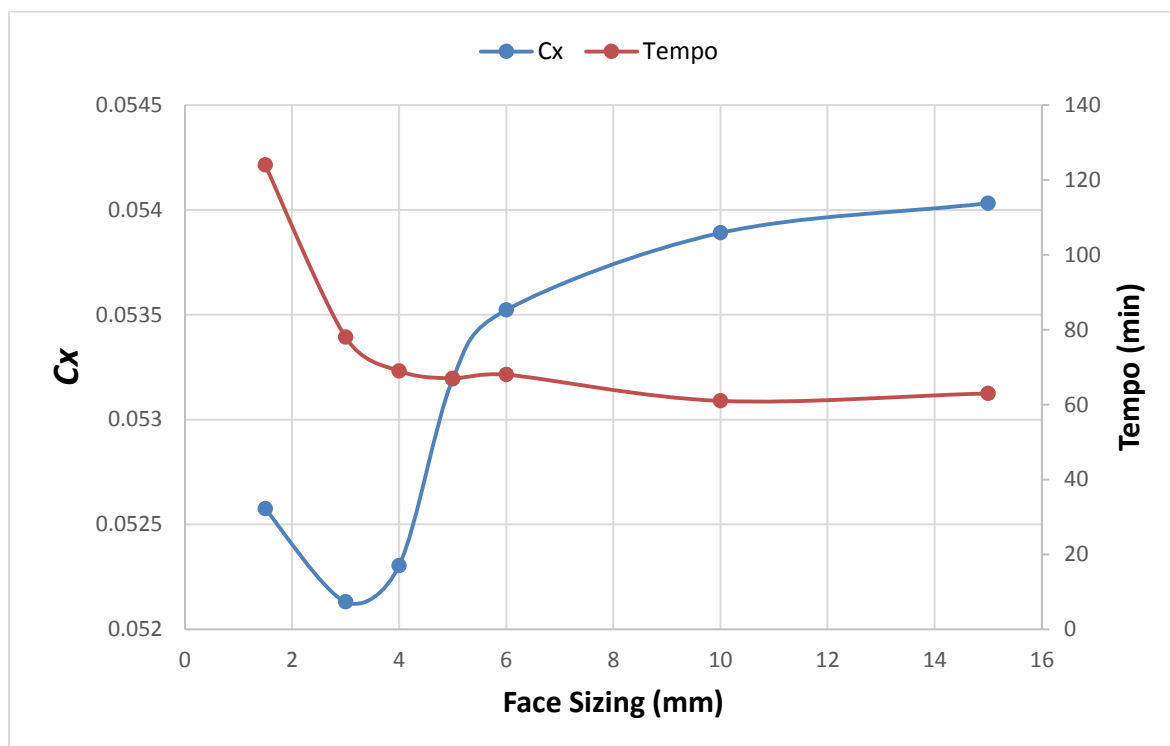


Figura 13 - Cx em função do *face sizing* nas carenagens e rodas

Há uma grande diferença entre os valores superiores e inferiores a 5 mm, sendo que se optou pelo primeiro valor abaixo, 4 mm, uma vez que oferece maior resolução sem que o tempo de cálculo seja proibitivo.

4.2.4. Cells Across Gap

Este parâmetro define o número de camadas de elementos a serem geradas entre objectos. Tal como nos outros casos, seleccionou-se o valor que permite máxima resolução sem aumento significativo do tempo de cálculo, neste caso 7 camadas. Os resultados obtidos apresentam-se na Figura 14.

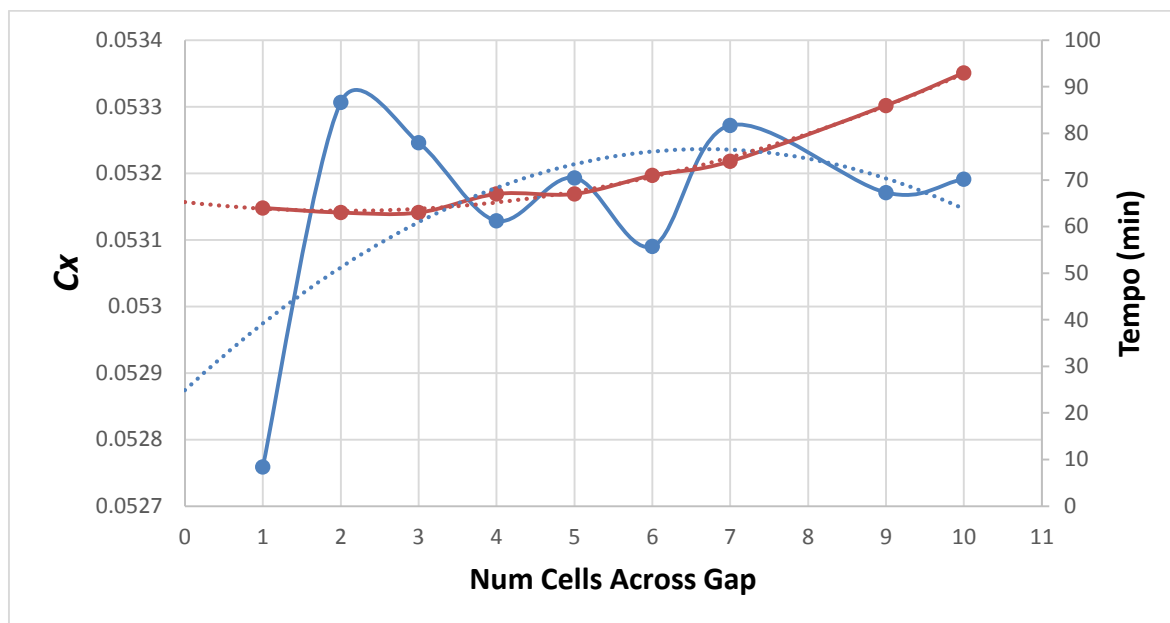


Figura 14 - Cx em função do número de camadas de células entre objetos

4.3. CFX-Pre

Após definida e gerada a malha com sucesso, é necessário definir as condições da simulação. Para todas as simulações realizadas, foi considerado o fluido como sendo ar à pressão de 1 atm (101325 Pa) e à temperatura de 25° C (288 K). O modelo de turbulência utilizado foi o SST, que combina k-Epsilon para Reynolds altos e k-Omega para Reynolds baixos (Oliveira, 2013). As *Named Selections* "Top", "Left" e "Road" são definidas como paredes com escorregamento, enquanto as *Named Selections* que definem o carro, "Body" e "Wheels" são consideradas paredes sem escorregamento. Em "Inlet" define-se a velocidade do escoamento, os 7 m/s que correspondem à velocidade média do carro em prova, e a intensidade de turbulência como 5 %. No "Outlet" considera-se que a pressão é estática. Por fim devem ser definidas as iterações de cálculo, que para as simulações realizadas foram sempre 100. Um exemplo de todos os *inputs* utilizados pode ser encontrado no Anexo C.

4.4. CFX-Solver

O *solver* serve para resolver as equações e definir como serão divididos os cálculos no processador. O computador utilizado corre no sistema operativo Windows 8 e possui um processador Intel®Core™ i7-4700HQ @ 2,40 GHz e dispõe de 32GB de memória RAM. Durante o cálculo é apresentada informação via texto e também um gráfico como o da Figura 15.

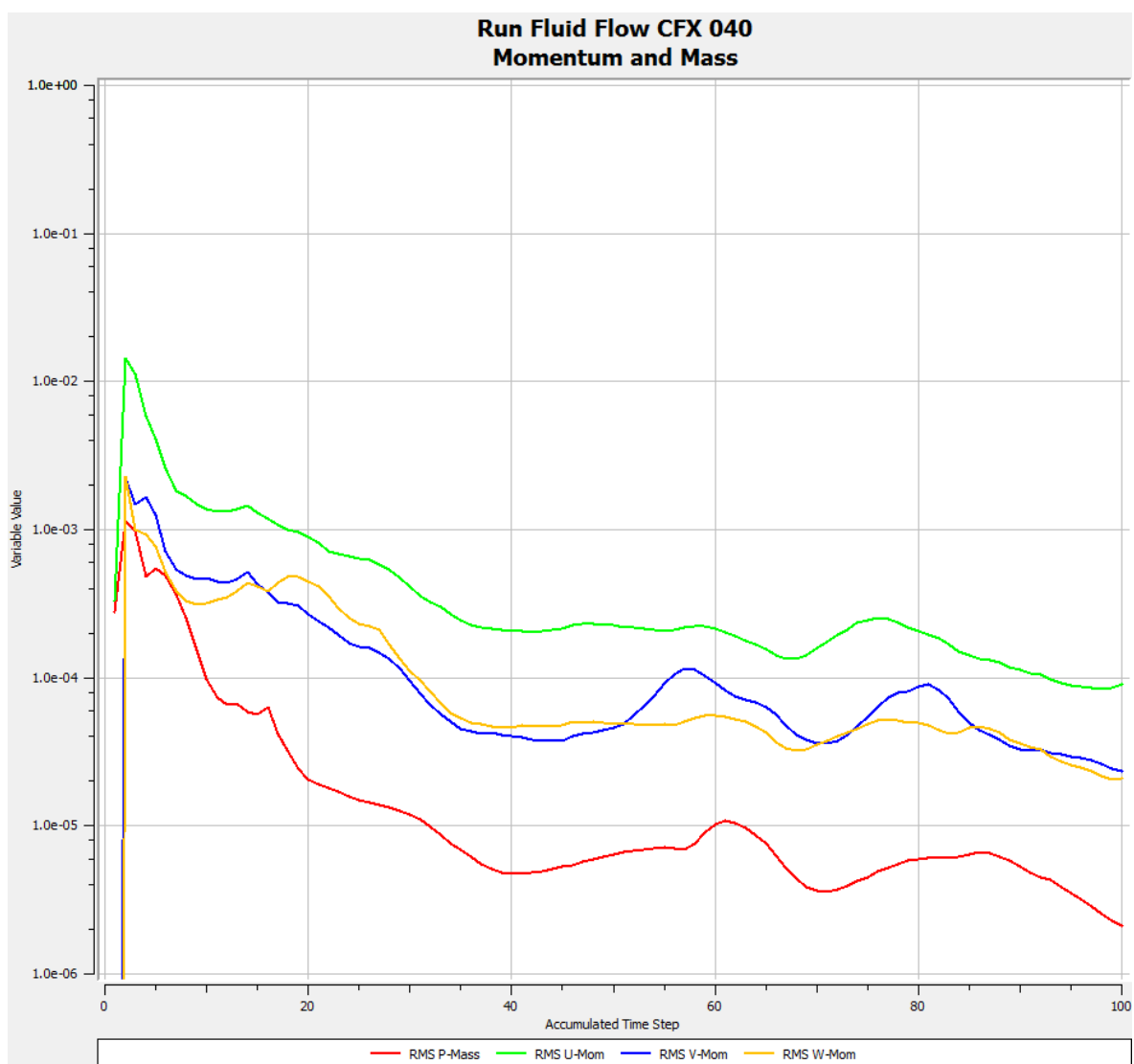
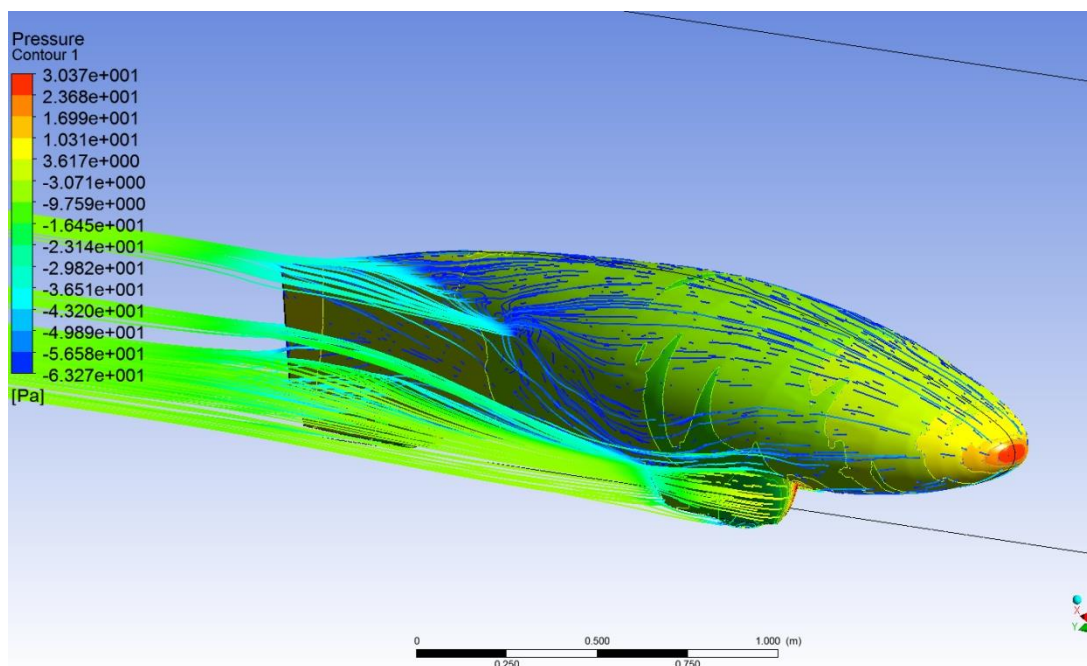


Figura 15 - Gráfico dos cálculos no CFX-Solver

4.5. CFX-Post

O CFX-Post é a ferramenta que permite analisar os resultados do cálculo. Para este estudo foram retirados os valores de Forças e Momentos Totais, de Pressão e Viscosos. É possível também visualizar uma representação gráfica como a da Figura 16, sendo que neste caso se optou por visualizar a pressão na superfície da carroçaria e as *streamlines* do escoamento.



5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações com variação de parâmetros geométricos de forma a otimizar o comportamento aerodinâmico do veículo.

5.1. Linha de Camber e Altura do Nariz

Para esta fase do projecto foram desenhados inicialmente 15 veículos, para além da geometria original com camber de 0,033 e altura de nariz de 252 mm. Foram designadas quatro alturas de nariz diferentes, espaçadas 20 mm entre si (212, 232, 252 e 272) e quatro valores de camber distintos para 0 %, 50 %, 100 % e 150 % do original (0; 0,0165; 0,033 e 0,0495). Os resultados apresentam-se na Figura 17 e com mais detalhe no Anexo A.

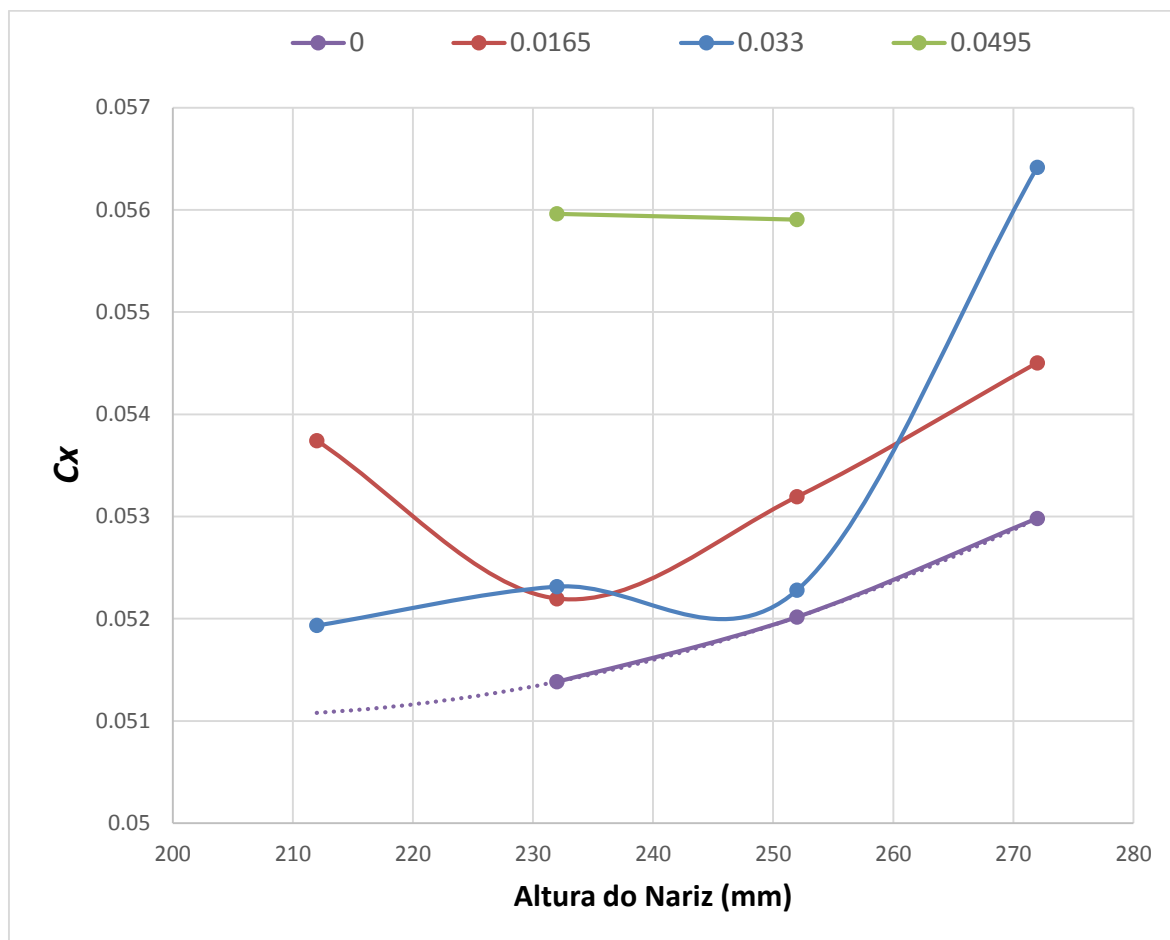


Figura 17 - Cx em função da altura do nariz, para valores de camber máximo diferentes

As simulações para o camber de 0,0495 não foram feitas para alturas de nariz a 212 mm e 272 mm devido a dificuldades em cumprir os requisitos necessários, e devido aos maus resultados das duas simulações realizadas, esse camber provou não ser uma alternativa viável. O camber 0,0165 apresentou um resultado satisfatório para o nariz de 232 mm, enquanto o camber original de 0,033 teve bons resultados nas três alturas de nariz mais baixas.

Contudo, o camber que apresentou os melhores resultados foi o camber nulo, para altura de nariz de 232 mm. Não foi possível gerar a malha para realizar uma simulação a 212 mm, mas ajustando um polinómio aos três resultados obtidos para esse camber, a projecção é a de que é possível baixar ainda mais o Cx com um nariz mais baixo. Foram então desenhadas mais duas geometrias para o camber nulo com alturas de nariz de 217 mm e 222 mm, apresentando-se os resultados na Figura 18.

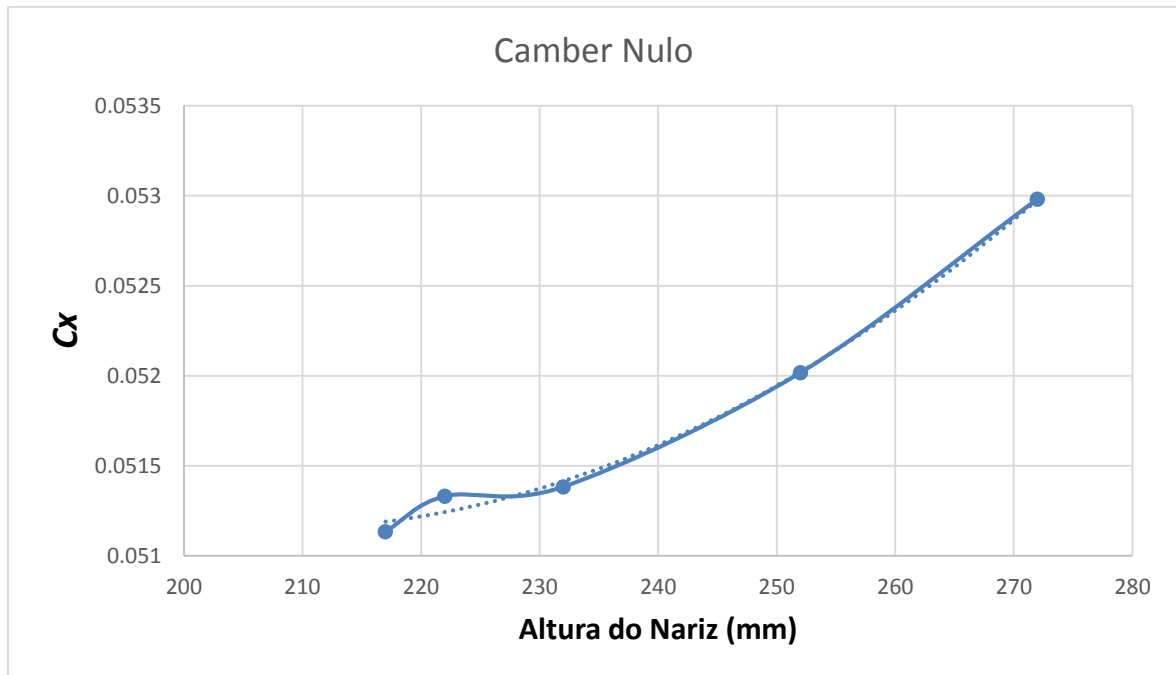


Figura 18 - Cx em função da altura do nariz para camber nulo

Como previsto, o C_x mais baixo ocorre para a altura de nariz mais baixa a que foi possível gerar malha, sendo a geometria com camber nulo e nariz a 217 mm a carroçaria a ser usada daqui em diante. A vista lateral dessa simulação é apresentada na Figura 19. Nas Figuras 20 e 21 é possível visualizar as geometrias inicial e final lado a lado.

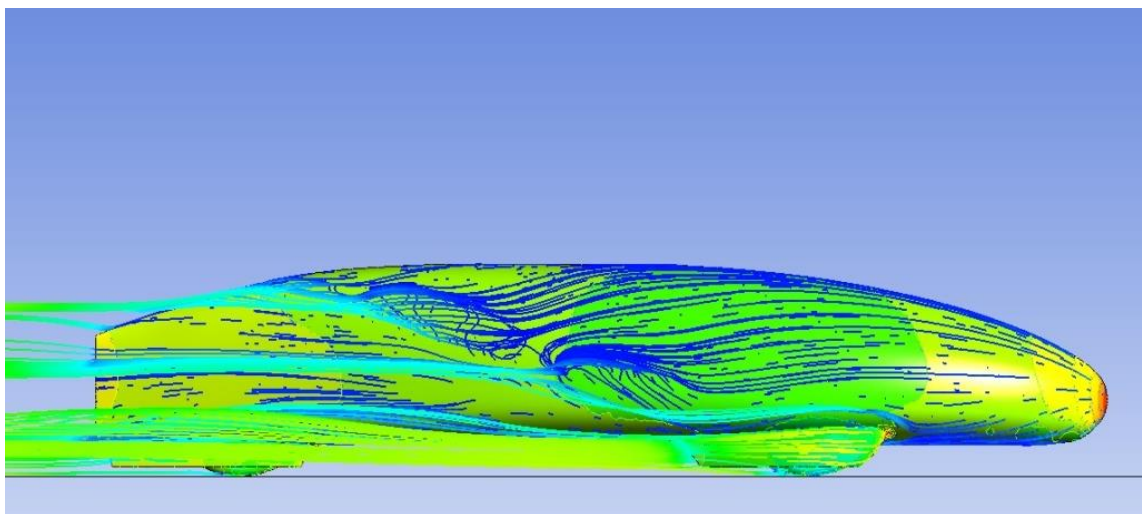


Figura 19 - Vista lateral da geometria final

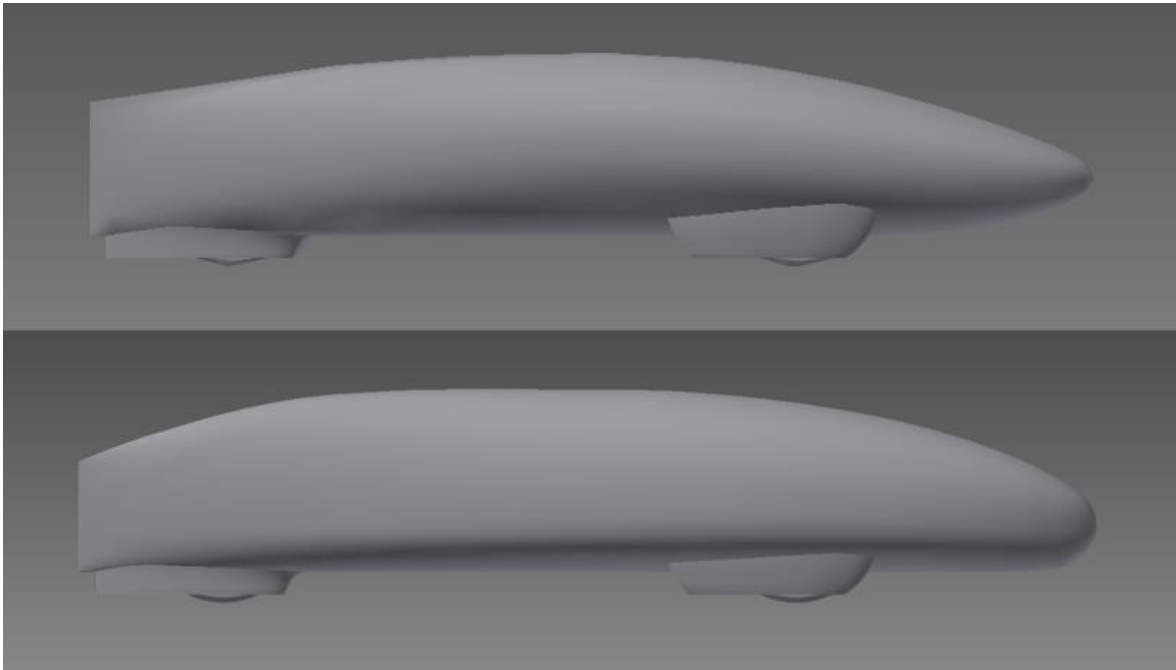


Figura 20 - Comparação da vista de perfil entre as geometrias original e final

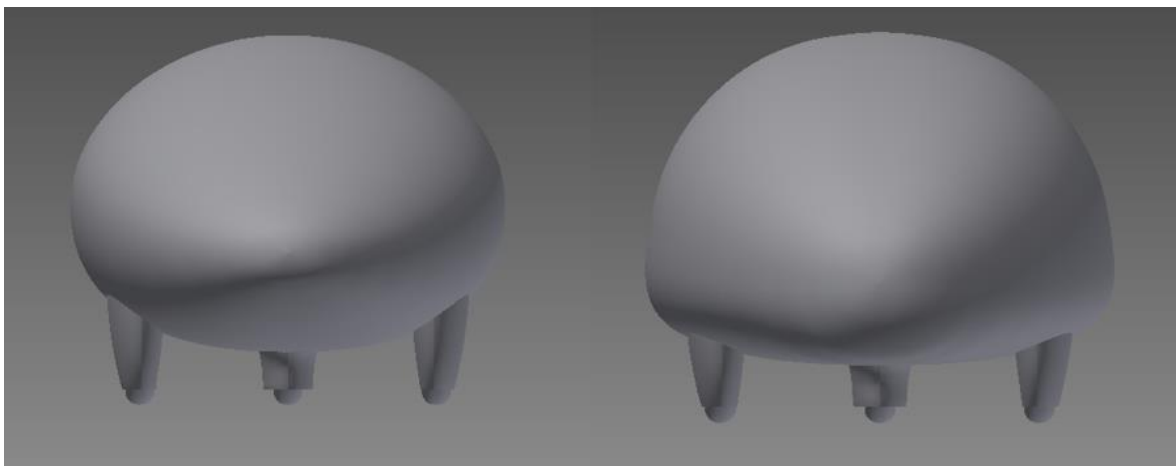


Figura 21 - Comparação da vista frontal entre as geometrias original e final

5.2. Carenagens Dianteiras

Para as carenagens dianteiras foram feitas simulações para valores de camber diferentes do 0,02 utilizado até aqui. Foram desenhadas e simuladas carenagens com valores de 0,01; 0,02; 0,03 e uma última com camber de 0,03 no ponto mais baixo, sendo

diminuído progressivamente até atingir 0,01 no ponto mais afastado do solo. Os resultados obtidos são os seguintes:

Camber	C_x	C_p	C_v
0,01	0,051463	0,018856	0,033384
0,02	<u>0,051134</u>	0,018403	0,032729
0,03	0,051499	0,018856	0,032644
0,03 a 0,01	0,051198	0,018459	0,032738

Tabela 3 - C_x , C_p e C_v para diferentes cambers nas carenagens da frente

A carenagem com camber máximo de 0,02 mostra ser a melhor, sendo a mais próxima a que tem camber a variar de 0,03 para 0,01. As outras duas carenagens não são muito piores, sendo que a de camber 0,03 apresenta comportamento viscoso melhor que as outras opções. Apesar de tudo, as variações de resultados são mínimas, podendo-se concluir que as carenagens dianteiras não têm muita influência no comportamento aerodinâmico total do carro.

5.3. Resultados Finais

Tendo então definida a geometria final do carro, procedeu-se a simulações com a malha mais refinada, para obter resultados mais precisos e perto da realidade. Foram também realizadas simulações a velocidades de escoamento diferentes dos 7,0 m/s que tem sido constante até este ponto, apresentadas na Tabela 4 e Figura 20.

Velocidade	C_x	C_p	C_v
5,0 m/s	0,056419	0,021609	0,034809
7,0 m/s	0,050638	0,017894	0,032743
10,0 m/s	0,046352	0,014990	0,031361

Tabela 4 - C_x , C_p , e C_v para diferentes velocidades de escoamento

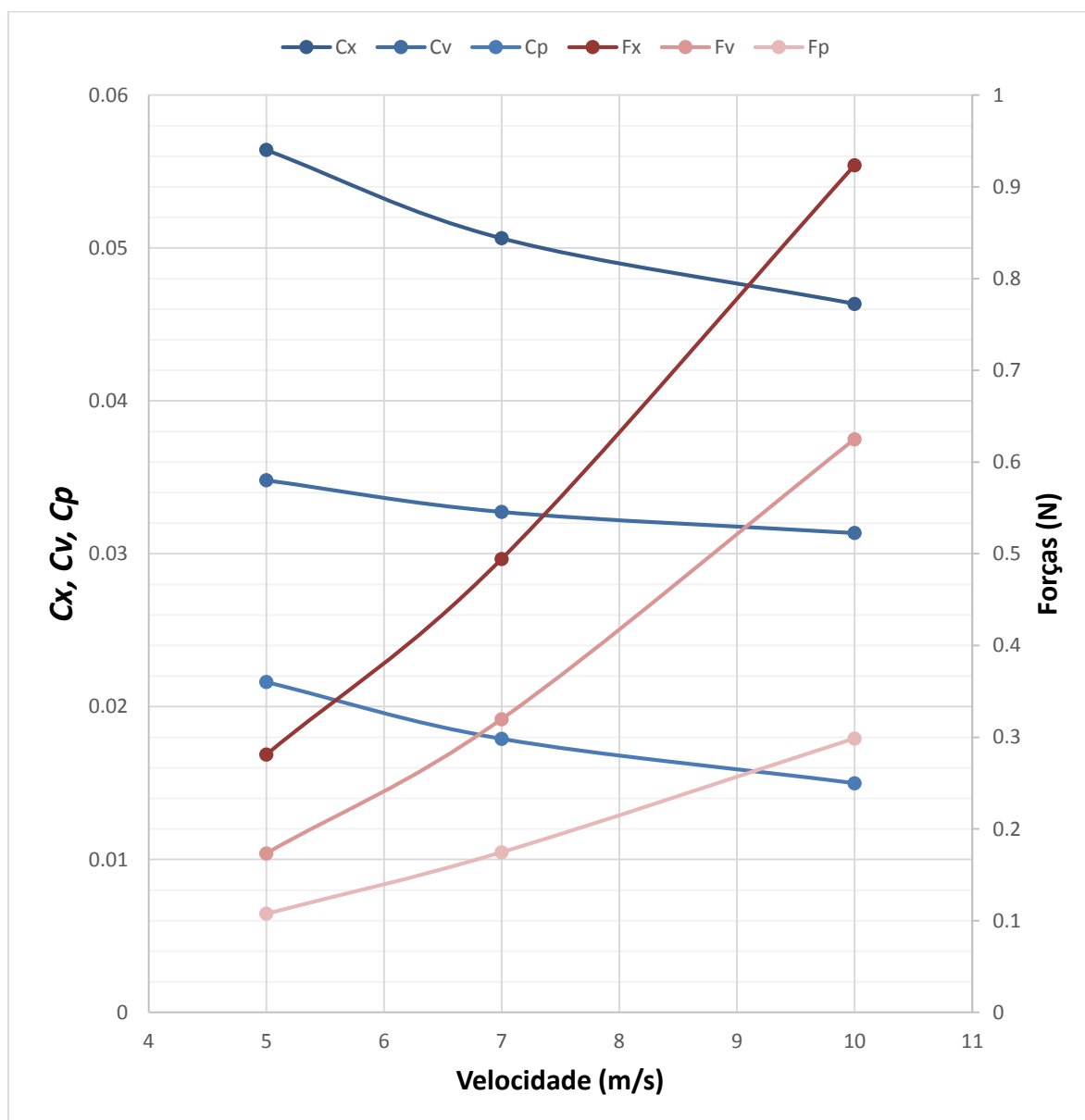


Figura 202 - Cx, Cp, Cv e forças em função da velocidade

Nas Tabelas 5 e 6 são comparadas as características do último modelo simulado deste projecto com as do último Eco Veículo construído e o veículo PAC-CAR II apresentado em Santin et al. (2007). É possível verificar que o projecto actual possui uma área frontal superior à dos outros veículos, devido à alteração nas regras que impõe em 2014 um raio de viragem mínimo de 10 m em relação ao regulamento para o qual o PAC-CAR II e o Eco Veículo XC20i foram construídos que impunha um raio de viragem

mínimo de 25 m. Para um mesmo valor de Reynolds o projecto actual é o que apresenta melhor resultado de simulação.

Veículo	A_f (m ²)	C_x (simulação)	C_x (experimental)	Re
XC20i	0,260	0,0976	0,121	1,60E6
Projecto Actual	0,336	0,0464	-	1,60E6
PAC-CAR II	0,254	0,070	0,075	1,60E6

Tabela 5 - Comparação de C_x e A_f entre diferentes veículos

Veículo	$C_x \times A_f$ (simulação) (m ²)	$C_x \times A_f$ (experimental) (m ²)	Re
XC20i	0,0254	0,0315	1,60E6
Projecto Actual	0,0156	-	1,60E6
PAC-CAR II	0,0178	0,0191	1,60E6

Tabela 6 - Comparação de $C_x \times A_f$ entre diferentes veículos

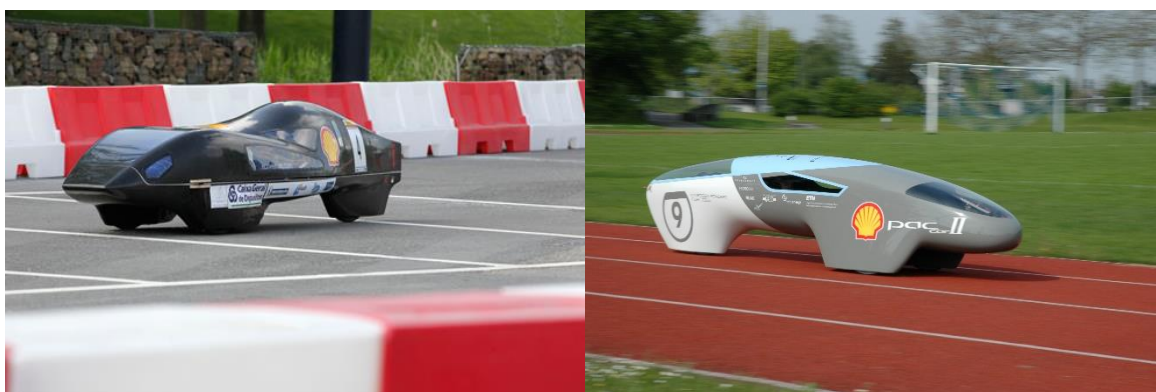


Figura 23 – Eco Veículo XC20i e PAC-CAR II

6. CONCLUSÕES

Das quinze geometrias simuladas com quatro valores diferentes de camber máximo e seis valores de altura do nariz, a que apresentou melhores resultados de simulação foi a geometria com camber nulo e nariz a 217 mm. Estes resultados, quando comparados com os dados de simulação de outros veículos do mesmo tipo, para um mesmo número de Reynolds, apresentam um valor de $C_x \times A_f$ inferior, com a condicionante dos parâmetros de simulação poderem ter sido distintos. Estes resultados deixam prever que seja possível à equipa lutar pela vitória na Shell Eco-Marathon. O *software* de simulação numérica é uma ferramenta bastante útil porque permite prever o comportamento de várias geometrias com um custo muito inferior e num intervalo de tempo que não era possível com outros métodos. No futuro estes resultados terão de ser comprovados com medições experimentais na configuração da carroçaria com melhores resultados ou num modelo à escala. Este *software* mostra algumas limitações na geração de malha, que tornaram frustrante a segunda fase do processo.

A geometria final, devido a ter uma linha média recta, facilita também o processo de fabrico do molde, o que é uma mais-valia em termos de construção do veículo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbot, I. H. e von Doenhoff, A. E. (1959), "Theory of Wing Sections", Dover Publications
- Câmara, R. M. O. (2010), "Estudo Aerodinâmico da Carroçaria de um Veículo Automóvel Utilitário Cidadino", Tese de Mestrado em Engenharia Automóvel, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Hoerner, S. F. (1965), "Résistance à l'Avancement Dans Les Fluides", Gauthier-Villars editeurs.
- Katz, J. (1995), "Race Car Aerodynamics", Bentley Publishers.
- Milliken, W. F. e Milliken, D.L. (1995), "Race Car Vehicle Dynamics", Society of Automotive Engineers, Inc.
- Oliveira, J. (2013), "Optimização aerodinâmica da forma da carroçaria de um veículo automóvel protótipo para competir na Shell Eco-Marathon Europe 2014", Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Santin, J. J., Onder, C.H., Bernard, J., Isler, D., Kobler, P., Kolb, F., Weidmann, N. e Guzella, L. (2007), "The World's Most Fuel Efficient Vehicle, Design and Development of Pac-Car II", vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.
- Schlichting, H. (2004), "Boundary Layer Theory", 8ª Ed., Springer-Verlag.
- Stinton, D. (1983), "The Design of the Airplane", BSP Professional Books, Oxford
- Torenbeek, E. (1982), "Synthesis of Subsonic Airplane Design", Kluwer Academic Publishers.
- White, F. M. (1998), "Fluid Mechanics", 4ª Ed., McGraw-Hill.

ANEXO A – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE GEOMETRIA

Todas as velocidades são de 7,0 m/s e todas as massas volúmicas 1,185 kg/m³.
As áreas frontais são correspondentes a apenas metade do veículo.

Camber	Nariz	A_f (m²)	C_x	C_v	C_p
0,033	272	0.170487551	0.056417791	0.035137626	0.021280164
0,033	252	0.170487551	0.052280149	0.032527356	0.019752591
0,033	232	0.170487551	0.052314495	0.032802122	0.019514192
0,033	212	0.171358782	0.051933941	0.032991128	0.018943818
0,0165	272	0.166418272	0.054504378	0.034883299	0.019621079
0,0165	252	0.166696391	0.054403111	0.034829231	0.019572639
0,0165	232	0.168332359	0.052196501	0.033316219	0.018878645
0,0165	212	0.170294155	0.053743225	0.034487815	0.019254803
0,0495	252	0.176055973	0.055961787	0.035904444	0.020057343
0,0495	232	0.176238201	0.055905877	0.035259498	0.020644425
0	272	0.166455688	0.05298156	0.033596649	0.019386359
0	252	0.166139051	0.052016904	0.03239602	0.019621299
0	232	0.169515422	0.051383163	0.032910989	0.018471158
0	222	0.1674945	0.051330677	0.032791915	0.018539997
0	217	0.16813108	0.05113428	0.032729217	0.018403219

Tabela 7 - Resultados dos ensaios de geometria

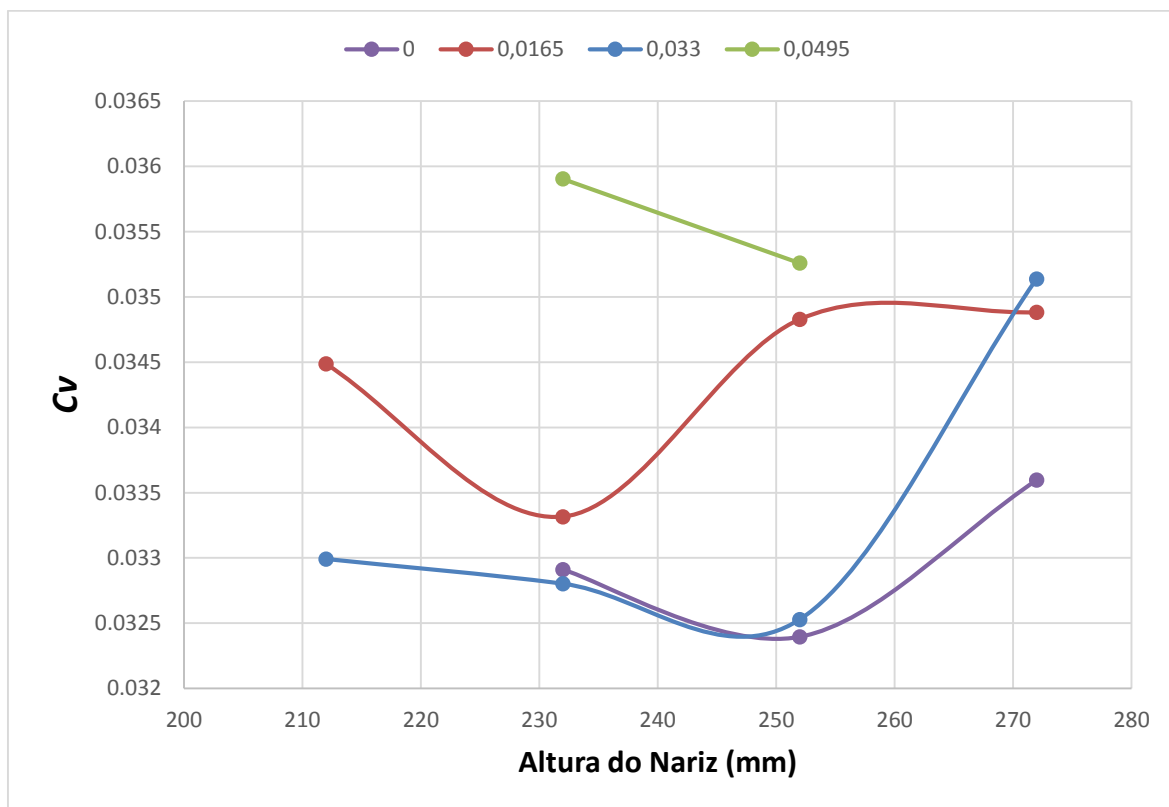


Figura 214 - Cv em função da altura do nariz para valores de camber diferentes

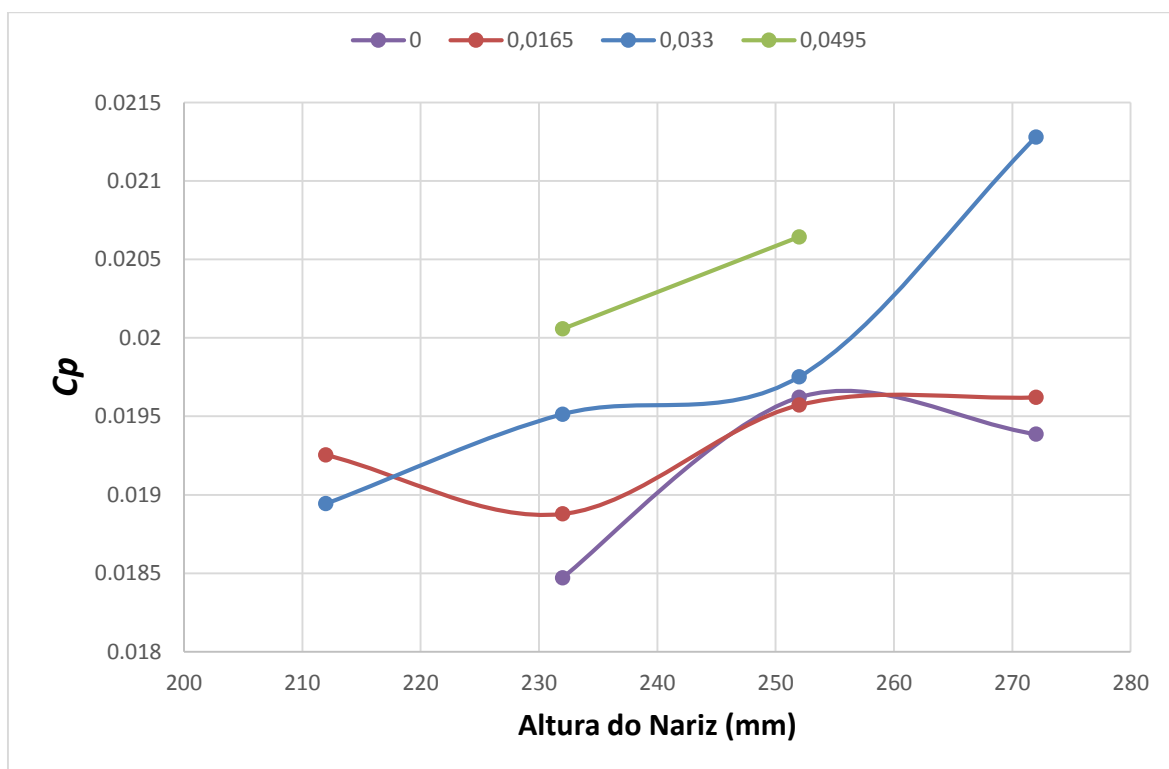


Figura 225 - Cp em função da altura do nariz para valores de camber diferentes

ANEXO B – GEOMETRIAS DO VEÍCULO PARA DIFERENTES VALORES DE CAMBER MÁXIMO

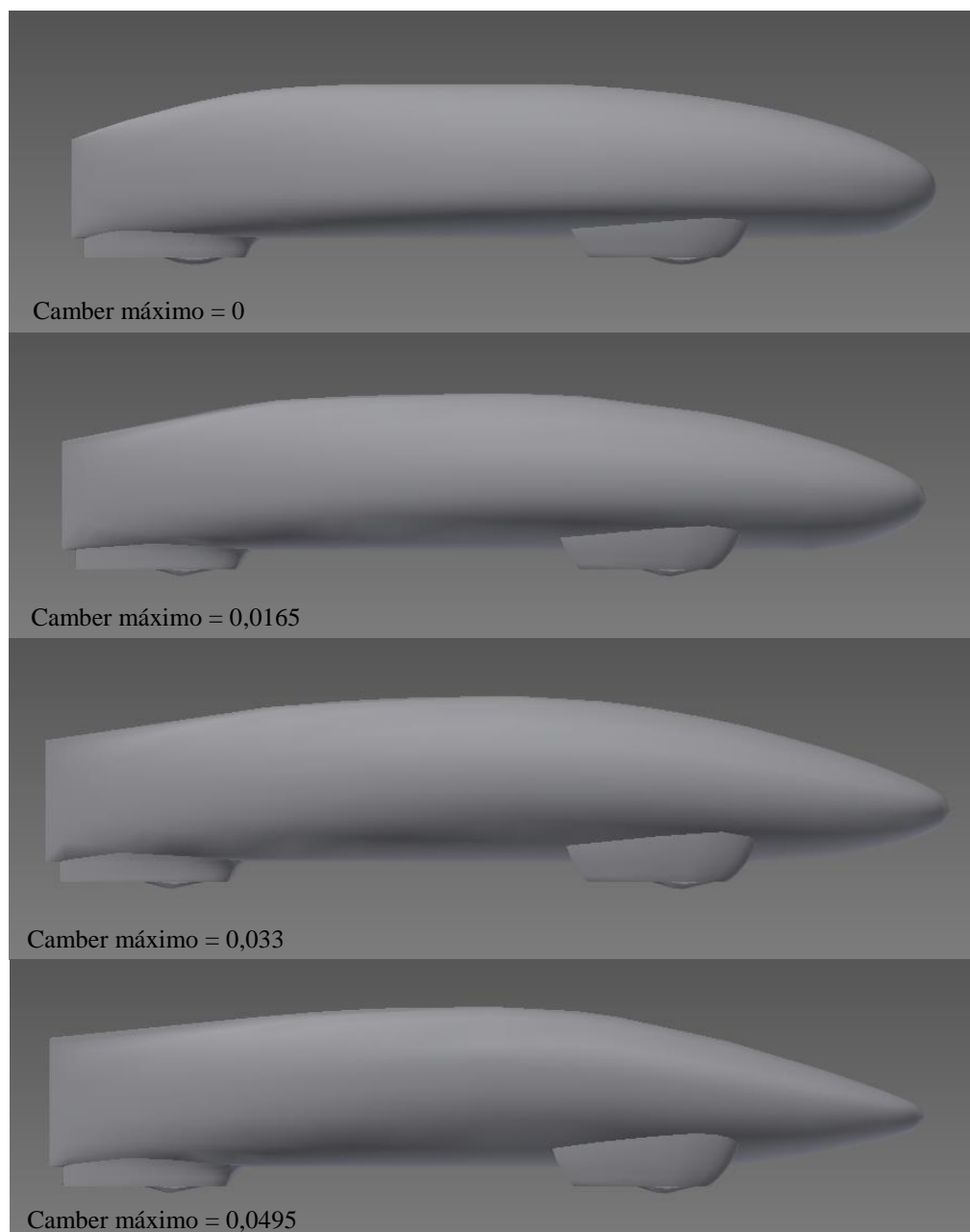


Figura 26 - Vista de perfil das geometrias para valores de camber diferentes e altura do nariz de 252 mm

ANEXO C – INPUTS NO CFX-PRE

LIBRARY:

MATERIAL: Air Ideal Gas

Material Description = Air Ideal Gas (constant Cp)

Material Group = Air Data, Calorically Perfect Ideal Gases

Option = Pure Substance

Thermodynamic State = Gas

PROPERTIES:

Option = General Material

EQUATION OF STATE:

Molar Mass = 28.96 [kg kmol⁻¹]

Option = Ideal Gas

END

SPECIFIC HEAT CAPACITY:

Option = Value

Specific Heat Capacity = 1.0044E+03 [J kg⁻¹ K⁻¹]

Specific Heat Type = Constant Pressure

END

REFERENCE STATE:

Option = Specified Point

Reference Pressure = 1 [atm]

Reference Specific Enthalpy = 0. [J/kg]

Reference Specific Entropy = 0. [J/kg/K]

Reference Temperature = 25 [C]

END

DYNAMIC VISCOSITY:

Dynamic Viscosity = 1.831E-05 [kg m⁻¹ s⁻¹]

Option = Value
END
THERMAL CONDUCTIVITY:
Option = Value
Thermal Conductivity = 2.61E-2 [W m⁻¹ K⁻¹]
END
ABSORPTION COEFFICIENT:
Absorption Coefficient = 0.01 [m⁻¹]
Option = Value
END
SCATTERING COEFFICIENT:
Option = Value
Scattering Coefficient = 0.0 [m⁻¹]
END
REFRACTIVE INDEX:
Option = Value
Refractive Index = 1.0 [m m⁻¹]
END
END
END
MATERIAL: Air at 25 C
Material Description = Air at 25 C and 1 atm (dry)
Material Group = Air Data, Constant Property Gases
Option = Pure Substance
Thermodynamic State = Gas
PROPERTIES:
Option = General Material
EQUATION OF STATE:
Density = 1.185 [kg m⁻³]
Molar Mass = 28.96 [kg kmol⁻¹]
Option = Value
END

SPECIFIC HEAT CAPACITY:

Option = Value

Specific Heat Capacity = 1.0044E+03 [J kg⁻¹ K⁻¹]

Specific Heat Type = Constant Pressure

END

REFERENCE STATE:

Option = Specified Point

Reference Pressure = 1 [atm]

Reference Specific Enthalpy = 0. [J/kg]

Reference Specific Entropy = 0. [J/kg/K]

Reference Temperature = 25 [C]

END

DYNAMIC VISCOSITY:

Dynamic Viscosity = 1.831E-05 [kg m⁻¹ s⁻¹]

Option = Value

END

THERMAL CONDUCTIVITY:

Option = Value

Thermal Conductivity = 2.61E-02 [W m⁻¹ K⁻¹]

END

ABSORPTION COEFFICIENT:

Absorption Coefficient = 0.01 [m⁻¹]

Option = Value

END

SCATTERING COEFFICIENT:

Option = Value

Scattering Coefficient = 0.0 [m⁻¹]

END

REFRACTIVE INDEX:

Option = Value

Refractive Index = 1.0 [m m⁻¹]

END

THERMAL EXPANSIVITY:

Option = Value

Thermal Expansivity = 0.003356 [K⁻¹]

END

END

END

MATERIAL: Aluminium

Material Group = CHT Solids, Particle Solids

Option = Pure Substance

Thermodynamic State = Solid

PROPERTIES:

Option = General Material

EQUATION OF STATE:

Density = 2702 [kg m⁻³]

Molar Mass = 26.98 [kg kmol⁻¹]

Option = Value

END

SPECIFIC HEAT CAPACITY:

Option = Value

Specific Heat Capacity = 9.03E+02 [J kg⁻¹ K⁻¹]

END

REFERENCE STATE:

Option = Specified Point

Reference Specific Enthalpy = 0 [J/kg]

Reference Specific Entropy = 0 [J/kg/K]

Reference Temperature = 25 [C]

END

THERMAL CONDUCTIVITY:

Option = Value

Thermal Conductivity = 237 [W m⁻¹ K⁻¹]

END

END

END

MATERIAL: Copper

Material Group = CHT Solids, Particle Solids

Option = Pure Substance

Thermodynamic State = Solid

PROPERTIES:

Option = General Material

EQUATION OF STATE:

Density = 8933 [kg m⁻³]

Molar Mass = 63.55 [kg kmol⁻¹]

Option = Value

END

SPECIFIC HEAT CAPACITY:

Option = Value

Specific Heat Capacity = 3.85E+02 [J kg⁻¹ K⁻¹]

END

REFERENCE STATE:

Option = Specified Point

Reference Specific Enthalpy = 0 [J/kg]

Reference Specific Entropy = 0 [J/kg/K]

Reference Temperature = 25 [C]

END

THERMAL CONDUCTIVITY:

Option = Value

Thermal Conductivity = 401.0 [W m⁻¹ K⁻¹]

END

END

END

MATERIAL: Soot

Material Group = Soot

Option = Pure Substance

Thermodynamic State = Solid

PROPERTIES:

Option = General Material

EQUATION OF STATE:

Density = 2000 [kg m⁻³]

Molar Mass = 12 [kg kmol⁻¹]

Option = Value

END

REFERENCE STATE:

Option = Automatic

END

ABSORPTION COEFFICIENT:

Absorption Coefficient = 0 [m⁻¹]

Option = Value

END

END

END

MATERIAL: Steel

Material Group = CHT Solids, Particle Solids

Option = Pure Substance

Thermodynamic State = Solid

PROPERTIES:

Option = General Material

EQUATION OF STATE:

Density = 7854 [kg m⁻³]

Molar Mass = 55.85 [kg kmol⁻¹]

Option = Value

END

SPECIFIC HEAT CAPACITY:

Option = Value

Specific Heat Capacity = 4.34E+02 [J kg⁻¹ K⁻¹]

END

REFERENCE STATE:

Option = Specified Point
Reference Specific Enthalpy = 0 [J/kg]
Reference Specific Entropy = 0 [J/kg/K]
Reference Temperature = 25 [C]
END
THERMAL CONDUCTIVITY:
Option = Value
Thermal Conductivity = 60.5 [W m⁻¹ K⁻¹]
END
END
END
MATERIAL: Water
Material Description = Water (liquid)
Material Group = Water Data, Constant Property Liquids
Option = Pure Substance
Thermodynamic State = Liquid
PROPERTIES:
Option = General Material
EQUATION OF STATE:
Density = 997.0 [kg m⁻³]
Molar Mass = 18.02 [kg kmol⁻¹]
Option = Value
END
SPECIFIC HEAT CAPACITY:
Option = Value
Specific Heat Capacity = 4181.7 [J kg⁻¹ K⁻¹]
Specific Heat Type = Constant Pressure
END
REFERENCE STATE:
Option = Specified Point
Reference Pressure = 1 [atm]
Reference Specific Enthalpy = 0.0 [J/kg]

Reference Specific Entropy = 0.0 [J/kg/K]

Reference Temperature = 25 [C]

END

DYNAMIC VISCOSITY:

Dynamic Viscosity = 8.899E-4 [kg m⁻¹ s⁻¹]

Option = Value

END

THERMAL CONDUCTIVITY:

Option = Value

Thermal Conductivity = 0.6069 [W m⁻¹ K⁻¹]

END

ABSORPTION COEFFICIENT:

Absorption Coefficient = 1.0 [m⁻¹]

Option = Value

END

SCATTERING COEFFICIENT:

Option = Value

Scattering Coefficient = 0.0 [m⁻¹]

END

REFRACTIVE INDEX:

Option = Value

Refractive Index = 1.0 [m m⁻¹]

END

THERMAL EXPANSIVITY:

Option = Value

Thermal Expansivity = 2.57E-04 [K⁻¹]

END

END

END

MATERIAL: Water Ideal Gas

Material Description = Water Vapour Ideal Gas (100 C and 1 atm)

Material Group = Calorically Perfect Ideal Gases, Water Data

Option = Pure Substance

Thermodynamic State = Gas

PROPERTIES:

Option = General Material

EQUATION OF STATE:

Molar Mass = 18.02 [kg kmol⁻¹]

Option = Ideal Gas

END

SPECIFIC HEAT CAPACITY:

Option = Value

Specific Heat Capacity = 2080.1 [J kg⁻¹ K⁻¹]

Specific Heat Type = Constant Pressure

END

REFERENCE STATE:

Option = Specified Point

Reference Pressure = 1.014 [bar]

Reference Specific Enthalpy = 0. [J/kg]

Reference Specific Entropy = 0. [J/kg/K]

Reference Temperature = 100 [C]

END

DYNAMIC VISCOSITY:

Dynamic Viscosity = 9.4E-06 [kg m⁻¹ s⁻¹]

Option = Value

END

THERMAL CONDUCTIVITY:

Option = Value

Thermal Conductivity = 193E-04 [W m⁻¹ K⁻¹]

END

ABSORPTION COEFFICIENT:

Absorption Coefficient = 1.0 [m⁻¹]

Option = Value

END

SCATTERING COEFFICIENT:

Option = Value

Scattering Coefficient = 0.0 [m⁻¹]

END

REFRACTIVE INDEX:

Option = Value

Refractive Index = 1.0 [m m⁻¹]

END

END

END

END

FLOW: Flow Analysis 1

SOLUTION UNITS:

Angle Units = [rad]

Length Units = [m]

Mass Units = [kg]

Solid Angle Units = [sr]

Temperature Units = [K]

Time Units = [s]

END

ANALYSIS TYPE:

Option = Steady State

EXTERNAL SOLVER COUPLING:

Option = None

END

END

DOMAIN: Default Domain

Coord Frame = Coord 0

Domain Type = Fluid

Location = B193

BOUNDARY: Body

Boundary Type = WALL

```
Location = Body,Wheels
BOUNDARY CONDITIONS:
  MASS AND MOMENTUM:
    Option = No Slip Wall
  END
  WALL ROUGHNESS:
    Option = Smooth Wall
  END
END
BOUNDARY: Default Domain Default
  Boundary Type = WALL
  Location = F112.193,F311.193
  BOUNDARY CONDITIONS:
    MASS AND MOMENTUM:
      Option = No Slip Wall
    END
    WALL ROUGHNESS:
      Option = Smooth Wall
    END
  END
END
BOUNDARY: Inlet
  Boundary Type = INLET
  Location = Inlet
  BOUNDARY CONDITIONS:
    FLOW REGIME:
      Option = Subsonic
    END
    MASS AND MOMENTUM:
      Normal Speed = 7 [m s^-1]
      Option = Normal Speed
```

```
END
TURBULENCE:
  Option = Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
END
END
END
BOUNDARY: Outlet
  Boundary Type = OUTLET
  Location = Outlet
BOUNDARY CONDITIONS:
  FLOW REGIME:
    Option = Subsonic
  END
  MASS AND MOMENTUM:
    Option = Average Static Pressure
    Pressure Profile Blend = 0.05
    Relative Pressure = 0 [Pa]
  END
  PRESSURE AVERAGING:
    Option = Average Over Whole Outlet
  END
END
END
BOUNDARY: Paredes
  Boundary Type = WALL
  Location = Right,Road,Top
BOUNDARY CONDITIONS:
  MASS AND MOMENTUM:
    Option = Free Slip Wall
  END
END
END
```

BOUNDARY: Simetria
Boundary Type = SYMMETRY
Location = Left
END
DOMAIN MODELS:
BUOYANCY MODEL:
Option = Non Buoyant
END
DOMAIN MOTION:
Option = Stationary
END
MESH DEFORMATION:
Option = None
END
REFERENCE PRESSURE:
Reference Pressure = 1 [atm]
END
END
FLUID DEFINITION: Fluid 1
Material = Air Ideal Gas
Option = Material Library
MORPHOLOGY:
Option = Continuous Fluid
END
END
FLUID MODELS:
COMBUSTION MODEL:
Option = None
END
HEAT TRANSFER MODEL:
Fluid Temperature = 288 [K]
Option = Isothermal

END

THERMAL RADIATION MODEL:

Option = None

END

TURBULENCE MODEL:

Option = SST

TRANSITIONAL TURBULENCE:

Option = Gamma Theta Model

TRANSITION ONSET CORRELATION:

Option = Langtry Menter

END

END

END

TURBULENT WALL FUNCTIONS:

Option = Automatic

END

END

INITIALISATION:

Option = Automatic

INITIAL CONDITIONS:

Velocity Type = Cartesian

CARTESIAN VELOCITY COMPONENTS:

Option = Automatic with Value

$U = 7 \text{ [m s}^{-1}\text{]}$

$V = 0 \text{ [m s}^{-1}\text{]}$

$W = 0 \text{ [m s}^{-1}\text{]}$

END

STATIC PRESSURE:

Option = Automatic

END

TURBULENCE INITIAL CONDITIONS:

Option = k and Epsilon

```
    EPSILON:  
Option = Automatic  
    END  
    K:  
    Option = Automatic  
    END  
    END  
    END  
    END  
    END  
    END  
    END  
OUTPUT CONTROL:  
    RESULTS:  
    File CompressionLevel = Default  
    Option = Standard  
    END  
    END  
    SOLVER CONTROL:  
    Turbulence Numerics = High Resolution  
ADVECTION SCHEME:  
    Option = High Resolution  
    END  
    CONVERGENCE CONTROL:  
    Length Scale Option = Conservative  
    Maximum Number of Iterations = 100  
    Minimum Number of Iterations = 1  
    Timescale Control = Auto Timescale  
    Timescale Factor = 1.0  
    END  
    CONVERGENCE CRITERIA:  
    Residual Target = 0.00001  
    Residual Type = RMS  
    END
```

DYNAMIC MODEL CONTROL:

Global Dynamic Model Control = On

END

END

END

COMMAND FILE:

Version = 15.0

END