

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DAS FORÇAS AERODINÂMICAS SOBRE UM VEÍCULO DE COMPETIÇÃO  
EMPREGANDO CFD

por

Flávio Luçardo Duarte

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2015





Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Departamento de Engenharia Mecânica

ANÁLISE DAS FORÇAS AERODINÂMICAS SOBRE UM VEÍCULO DE COMPETIÇÃO  
EMPREGANDO CFD

por

Flávio Luçardo Duarte

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Thamy Cristina Hayashi  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Ciências Térmicas**

Orientador: Prof. Adriane Prisco Petry

Comissão de Avaliação:

Prof. Horácio A. Vielmo

Prof. Alexandre Vagtinski de Paula

Prof. Thamy Hayashi

Porto Alegre, 17 de novembro de 2015.

A todos que fizeram parte de minha formação moral e profissional;

Aos meus pais, José e Maria Duarte, por servirem de exemplo para mim e pelo carinho e apoio dado ao longo de todos os meus projetos de vida.

A minha irmã, por ter sido sempre uma grande amiga.

A minha namorada Gabriela, pelos mais de 5 anos de toda esta graduação com todas as adversidades que fizeram parte dela, sempre ao meu lado me apoiando.

Ao projeto Fórmula SAE desenvolvido dentro a faculdade onde aprendi e evolui muito.

Aos professores, por disporem seu tempo e conhecimento em prol da educação, especialmente aos professores com quem desenvolvi projetos, inclusive meu TCC junto à professora Adriane Petry que sempre se mostrou disposta a ajudar.

A todos o meu muito obrigado.

Duarte, F. L. **Análise Das Forças Aerodinâmicas Sobre Um Veículo De Competição Empregando CFD**. 2015. 14 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015

## **RESUMO**

Sendo as competições automobilísticas uma fonte para tecnologias que serão aplicadas a veículos comerciais, o desenvolvimento de uma metodologia de análise aerodinâmica orientada a este mercado justifica-se. O trabalho trata da análise aerodinâmica completa de um veículo de competição, o qual conta com validação numérica da solução do problema. Foi feita também utilização de uma técnica numérica de avaliação da qualidade dos resultados chamada índice de convergência de malha (GCI), a qual se justifica quando não se possui o modelo que está sendo analisado para fazer uma validação por dados experimentais. Os resultados dos coeficientes aerodinâmicos encontrados ( $C_l = -1,26$  e  $C_d = 0,45$ ) foram, conforme esperado, inferiores aos típicos para este tipo de veículo devido a sua geometria conservadora. Os valores obtidos para o GCI são compatíveis com a literatura.

**PALAVRAS-CHAVE:** Aerodinâmica, CFD, Modelagem de veículo de competição.

DUARTE, F. L. **CFD Analysis of Aerodynamic Forces in a Race car**. 2015. 14 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

## **ABSTRACT**

Being the motor racing a source for technologies that will be applied to commercial vehicles, the development of a methodology for aerodynamic analysis oriented to this market is justified. The paper treats the complete aerodynamic analysis of a competition vehicle, which has numerical validation of the solution. It was also made use of a numerical technique for evaluating the quality of the results called grid convergence index (GCI), which is justified when you do not have the model being analyzed to make a validation by experimental data. The results of aerodynamic coefficients found ( $C_l = -1.26$  and  $C_d = 0.45$ ) were, as expected, lower than typical for this kind of vehicle because of their conservative geometry. The values obtained for the GCI are compatible with the literature.

**KEYWORDS:** Aerodynamics, CFD, Race car modeling.

## ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO .....	1
2 OBJETIVOS .....	1
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
3.1 Aerodinâmica De Veículos.....	1
4 METODOLOGIA .....	4
4.1 Dinâmica dos Fluidos Computacional.....	4
4.2 Domínio, Geometria e Discretização.....	6
4.3 Condições De Contorno.....	8
4.4 Solução.....	9
4.5 Método GCI.....	9
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	10
5.1 Resultados GCI.....	10
5.2 Variação $C_l$ e $C_d$ Com a Velocidade.....	12
5.3 Análise Da Geometria Sem Simplificação.....	13
6. CONCLUSÃO .....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	15
Anexo I .....	16

## 1. INTRODUÇÃO

O mercado automobilístico exerce uma grande influência na sociedade e meio ambiente. Por esta razão, inúmeros são os esforços e investidas em desenvolver tecnologias que possam se tornar viáveis para uma linha de produção e para as ruas, onde tem maior efeito e podem viabilizar estas tecnologias com sua produção em larga escala.

“Nos últimos 30 anos, a indústria de carros de competição vem sendo líder em inovação tecnológica, um campo de treinamento para engenheiros altamente qualificados nas diferentes disciplinas de todo o mundo, uma parte integrante da indústria de engenharia de alta tecnologia. A natureza desta indústria é tal que existe uma necessidade constante de melhoria de desempenho. Entre os vários fatores que influenciam o desempenho de um carro, como trem de força, piloto, peso, pneus e aerodinâmica, a aerodinâmica representa a área maior que um construtor pode investir, e melhorar a performance do carro” [Mouffouk, 2014].

Obviamente os requisitos de um veículo de competição nem sempre são os mesmos de um veículo de rua. No caso do aspecto analisado, por exemplo, o conjunto aerodinâmico que compõe a carenagem do veículo como um todo, possui inúmeras funções que vão desde oferecer uma barreira física entre peças em altas temperaturas e o ocupante a até mesmo direcionar o escoamento sobre as superfícies aerodinâmicas. Dessa forma os estudos aqui realizados, tornam-se aplicáveis de certa forma a veículos de rua dados os diferentes enfoques a cada um dos mercados.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo do trabalho é a análise do escoamento sobre o conjunto carenagem como um todo (*full body*) de um veículo de competição utilizando um código comercial de dinâmica dos fluidos computacional (Ansys Fluent®13). É também analisada a influência da discretização espacial (malha) nos resultados dos coeficientes de sustentação e arrasto aerodinâmico, através da técnica de índice de convergência de malha (GCI).

Simulações com diferentes velocidades são analisadas a fim de avaliar seu efeito sobre os coeficientes aerodinâmicos, pois variações bruscas nestes resultam em uma grande variação das forças aerodinâmicas sobre o veículo. Finalizando o trabalho é feita uma simulação do escoamento sobre o modelo sem uma simplificação geométrica que havia sido feita por questões de custo computacional, para verificar seu efeito sobre os coeficientes aerodinâmicos.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 Aerodinâmica de veículos

“Quando em estado não-inercial, automóveis são submetidos a três conjuntos de forças distintas: uma força de campo (gravitacional terrestre), responsável por fazer surgir uma força na direção vertical descendente em todos os elementos do veículo; uma força de contato, reagindo à força peso através do contato dos pneus com o solo, podendo também ter componentes no plano dependendo da ação do veículo; uma força aerodinâmica, distribuída sob a forma de pressão ao redor de todo o veículo, agindo nas três direções, crescente com a diferença de velocidade entre o veículo e o fluido que o circunda” [Milliken e Milliken, 1994].

A ação desta força aerodinâmica é interessante do ponto de vista dinâmico, pois não soma massa ao conjunto ao adicionar uma força que aumenta a força normal entre os pneus e o solo. Dessa forma, não se sofre o efeito da inércia e permite aumentar a capacidade de suportar acelerações laterais e/ ou longitudinais sem aumentar a inércia do conjunto.

O efeito das forças aerodinâmicas na capacidade de suportar acelerações laterais ao longo dos anos pode ser verificado na Figura 3.1.

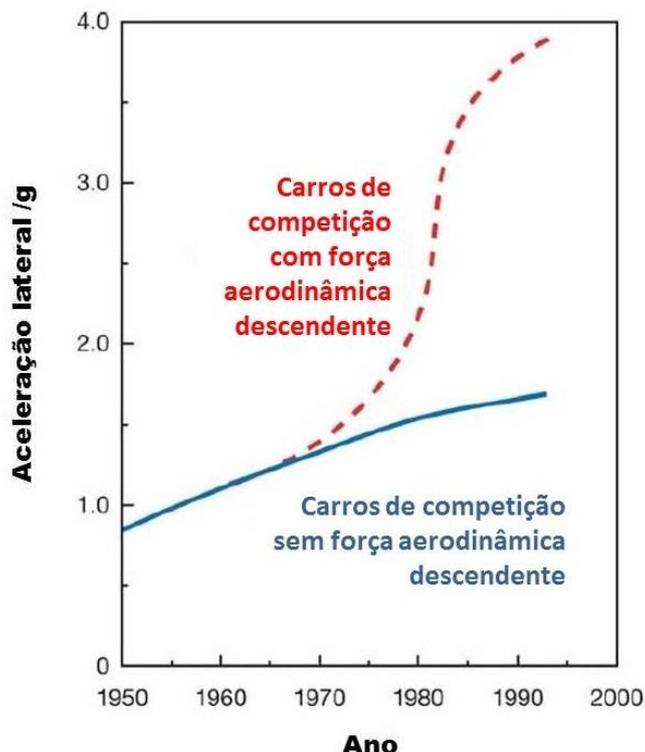


Figura 3.1: Aceleração lateral em função do ano. Adaptado de Katz, 2006.

Segundo Milliken e Milliken, 1994 os principais problemas a serem resolvidos por aerodinamicistas de carros de competição são:

- Reduzir o arrasto aerodinâmico pelo controle da geometria, escoamento externo e desenho eficiente dos dutos para escoamento interno.
- Gerar tanta carga aerodinâmica descendente quanto for possível, com a limitação de manter o arrasto aerodinâmico proporcional a potência disponível.
- Acoplamento entre aerodinâmica e chassis e seus efeitos devido à altura do veículo em relação ao solo em superfícies com efeito-solo.

Para conseguir lidar com todos estes desafios, cada vez mais os veículos de competição adquirem geometrias complexas que servem de alguma forma para orientar o escoamento que os envolve.

Uma metodologia usual de abordar um projeto aerodinâmico é dividi-lo em partes. Katz, 1995 subdivide os veículos de competição nas seguintes partes:

- Aerofólios
- Corpo do veículo
- Assoalho e difusores
- Escoamentos internos
- *Spoilers, splitters, strakes*

O posicionamento destas estruturas, e sua geometria em si, é capaz de distribuir as cargas aerodinâmicas. Não basta possuir uma grande carga, esta deve estar bem distribuída para ser transmitida pelo sistema de suspensão para o solo.

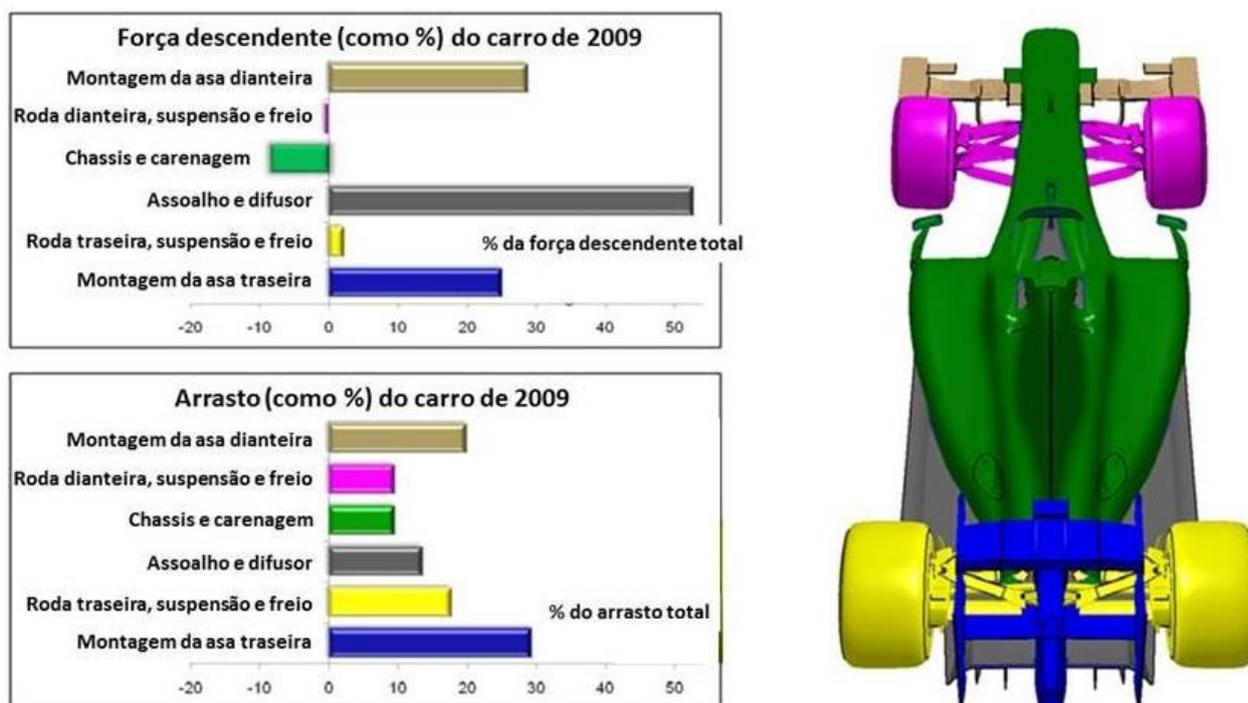


Figura 3.4: Efeito aerodinâmico de cada uma das partes do veículo. Adaptado de Racecar Engineering, 2015 ].

Segundo apresentado na Figura 3.4 pode-se observar que a parte com maior eficiência aerodinâmica (maior relação sustentação/arrasto) é o conjunto assoalho e difusor. Esta peça opera acelerando a ar na região inferior central do veículo para criar pressão manométrica negativa. Para aumentar sua efetividade o escoamento deve entrar sob o veículo e percorrer todo o assoalho e difusor, não se espalhando para os lados. Inúmeros esforços em confinar o escoamento sob o veículo são feitos, dentre eles, barreiras físicas foram empregadas durante os anos 70 nas mais variadas categorias de veículos de competição. Hoje tais medidas são proibidas por regulamento, então a tecnologia empregada para tal função é a utilização de uma cortina de vórtices que confina o escoamento sob o veículo.

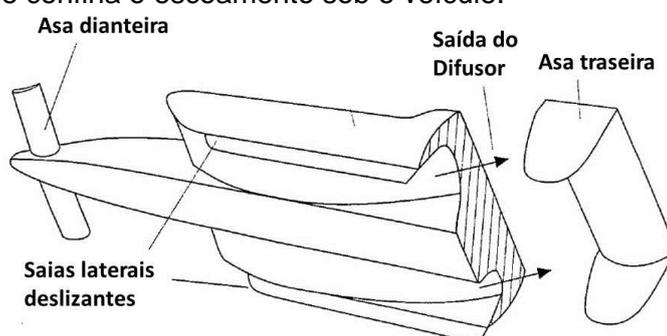


Figura 3.5: Geometria típica de um carro de Fórmula 1 nos anos 70. Adaptado de Milliken and Milliken, 1995.



Figura 3.6: Esteira de vórtices visível devido a alta umidade do ar em um veículo de Fórmula 1 durante o GP do Brasil de 2014. [Racecar Engineering, 2015]

Os aparatos utilizados para gerar estas cortinas de vórtices são das mais variadas geometrias. Abaixo uma comparação dos geradores de vórtice dos protótipos do campeonato mundial de endurance na principal etapa da categoria (24 horas de Le Mans).



Figura 3.7: Geradores de vórtices de protótipos do campeonato mundial de endurance na etapa das 24 horas de Le Mans. [Mulsannes Corner, 2015]

Além de garantir uma maior eficiência do assolho e difusor em si evitando a saída de ar pelas laterais do veículo, os geradores de vórtices também podem colaborar para minimizar as variações nas cargas aerodinâmicas com a alteração da altura do veículo em relação ao solo, fator muito importante na estabilidade dinâmica dos veículos de competição, dado o caráter amplificador que a carga aerodinâmica toma com as oscilações em altura do veículo.

O uso de medições experimentais é comum no meio automobilístico devido as complexas condições de contorno e os recursos de prototipagem disponíveis, mas cada vez mais o uso de recursos computacionais vêm se tornando a parte principal do trabalho dos engenheiros aerodinamicistas, devido a possibilidade de conhecer os campos de pressão e velocidade no escoamento estudado.

Os trabalhos de Mouffouk, 2014 ; Lanfrit ,2005; Abramchuk, 2014; Peddie *et al*, 2009; e Epsilon Euskadi, 2011, são algumas referências citadas que tratam exclusivamente do uso de CFD para abordar análises aerodinâmicas.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1 Dinâmica dos Fluidos Computacional

A metodologia empregada na análise deste problema é a simulação computacional fluido dinâmica, a qual resolve conjunto de equações diferenciais não lineares através de técnicas numéricas iterativas a fim de aproximar-se do resultado de um escoamento real. O conjunto de equações que descreve o escoamento de um fluido são as chamadas equações de Navier Stokes e conservação de massa, o código comercial utilizado para a solução das equações foi o Ansys Fluent®13.

As equações a serem resolvidas pelo código utilizado são a equação de conservação do momento (Equação 4.1) na direção x e a equação de conservação da massa (Equação 4.2), ambas em coordenadas cartesianas.

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g x - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left[ \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] = 0 \quad (4.2)$$

Sendo  $\rho$  a massa específica,  $t$  o tempo,  $x, y$  e  $z$  as coordenadas cartesianas dimensionais,  $P$  a pressão,  $\tau_{ij}$  as forças viscosas normais ao plano  $ij$  e  $u, v$  e  $w$  as velocidades do fluido nas direções  $x, y$  e  $z$  respectivamente.

O escoamento em questão é considerado turbulento, pois o número de Reynolds baseado no comprimento do veículo varia de  $Re=10.099.474$  até  $Re=20.198.949$ .

A metodologia abordada neste trabalho é a de resolução das equações médias de Reynolds (RANS) (Wilcox, 1988). A utilização desta metodologia torna necessária a utilização de um modelo de turbulência, pois com torna-se possível modelar o escoamento sem a necessidade de discretizar o domínio ao nível das menores escalas. Uma série de modelos de turbulência está à disposição para uso no programa, sua escolha deve ser tomada em função das características do escoamento que deve ser resolvido, e do recurso computacional disponível (Ansys Fluent User's Guide, 2011).

Os modelos de turbulência empregados na literatura para este tipo de caso são:

#### **K- $\epsilon$ :**

- Modelo de duas equações
- Modelo de turbulencia padrão para uso industrial
- Tratamento pobre de gradientes adversos de pressão, particularmente adiantando a previsão de separação da camada limite.
- Mais robusto
- Utilizado por Abramchuk, 2014 e Peddie *et al*, 2009.

#### **K- $\omega$ :**

- Modelo de duas equações
- Excelente tratamento de camadas limite, especialmente para gradientes adversos de pressão.
- Excelente para escoamentos externos.
- Utilizado por Abramchuk, 2014 e Mouffouk, 2014.

#### **K- $\omega$ SST:**

- Modelo de duas equações
- Utiliza o equacionamento do modelo K- Omega nas regiões de grande gradiente e o equacionamento robusto do modelo K-epsilon nas demais regiões.
- Robusto e opera bem com gradientes de pressão adversa.
- Utilizado por Abramchuk, 2014 e Mouffouk, 2014.

O modelo escolhido para a solução do caso em questão é o K- $\omega$  SST pois devido a geometria existem grandes gradientes adversos de pressão.

O equacionamento do modelo K- $\omega$  é ilustrado nas equações 4.3 e 4.4.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (4.4)$$

Onde  $G_k$  representa a produção de energia cinética turbulenta,  $G_\omega$  representa a geração de  $\omega$ ,  $\Gamma_k$  e  $\Gamma_\omega$  representam a difusividade efetiva de  $k$  e  $\omega$ ,  $Y_k$  e  $Y_\omega$  representam a dissipação de  $k$  e  $\omega$  relativa à turbulência,  $D_\omega$  representa o termo de difusão cruzada e  $S_k$  e  $S_\omega$  são termos fonte definidos pelo usuário.

Algumas hipóteses assumidas simplificam o equacionamento do problema, como é o caso da hipótese de incompressibilidade do fluido e de regime permanente, as quais anulam os termos de derivada em relação ao tempo e tornam unitárias as derivadas da massa específica.

#### 4.2 Domínio, geometria e discretização

Outra importante parte da solução deste problema é a discretização espacial da geometria envolvida. Neste problema utilizaram-se elementos tetraédricos com camadas superficiais prismáticas, ou seja, uma malha híbrida. Uma discretização pobre em detalhes pode ocasionar instabilidade e erros na solução, por outro lado uma discretização muito detalhada pode tornar inviável sua solução devido ao custo computacional elevado. Para avaliar a qualidade desta discretização utilizou-se a técnica de índice de convergência de malha (GCI), a qual será descrita no capítulo a seguir.

Uma das regiões mais críticas para a malha é a região próxima da parede devido aos elevados gradientes de velocidade, para isso deve-se manter a espessura da primeira célula a partir da parede ( $y^+$ ) dentro de um valor compatível com as características do escoamento e com um crescimento controlado. Neste trabalho, seguindo valores apresentados por Abramchuk, 2014 e a metodologia descrita pelo mesmo, foram criadas camadas superficiais prismáticas com razão de crescimento constante para melhor discretização desta região. A metodologia para determinação do número e espessura das camadas prismáticas encontra-se no anexo 1. Como resultado tivemos uma altura inicial de 0,8 mm na primeira célula e um total de 14 camadas a uma razão de crescimento de 1,2 para a discretização da camada limite.

Outra região que teve atenção especial no trabalho foi a região da esteira aerodinâmica. Para isto foi criando um corpo de influência que estende-se ao redor do veículo e para trás do mesmo, o tamanho de aresta das células foi limitado nesta região garantindo assim o refinamento necessário. Este corpo estende-se por duas vezes o comprimento do veículo em cada direção e 4 vezes seu comprimento no sentido do escoamento.

A geometria do veículo utilizada segue na Figura 4.1:

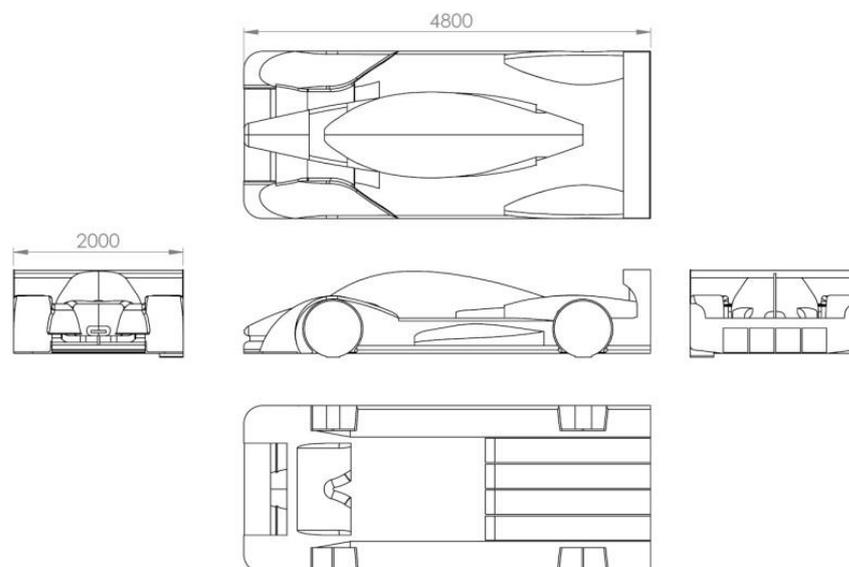


Figura 4.1: Vistas do veículo, unidades em milímetros.

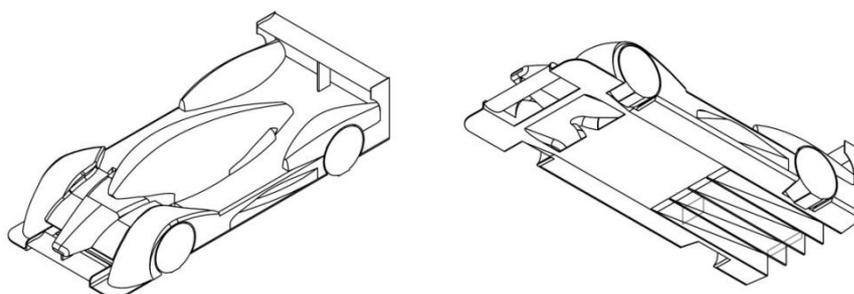


Figura 4.2: Vistas isométricas do veículo.

A escolha da seção transversal do domínio leva em consideração o efeito de bloqueio, sendo então a área frontal do veículo equivalente a 1,36% da seção do domínio, indicado ser abaixo de 1,5% por Lanfrit, 2005. O escoamento a montante com 5 comprimentos do veículo, e a jusante com aproximadamente 10 (9,62) comprimentos do veículo a fim de desenvolver a esteira aerodinâmica e recuperar a pressão, cumprindo com recomendações de Lanfrit, 2005.



Figura 4.3: Dimensões do domínio virtual com simetria espelhada na vista frontal.

Três malhas foram geradas para esta mesma geometria com o intuito de aplicar o método GCI. A primeira (mais grosseira) com 5.760.059 elementos, a segunda com 7.810.935 elementos e a mais refinada com 10.592.027 elementos.

Apesar de possuírem diferença na quantidade de elementos, a estrutura das malhas é a mesma, nas Figuras 4.4 e 4.5 pode-se verificar esta estrutura.

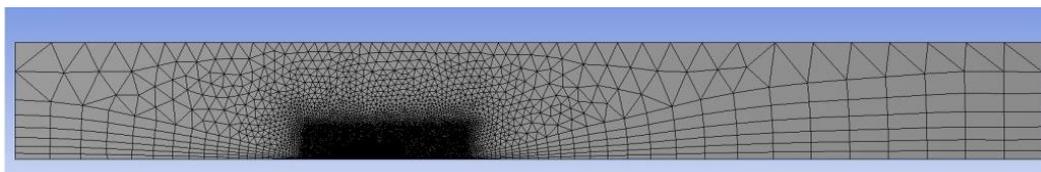


Figura 4.4: Malha do domínio numérico.

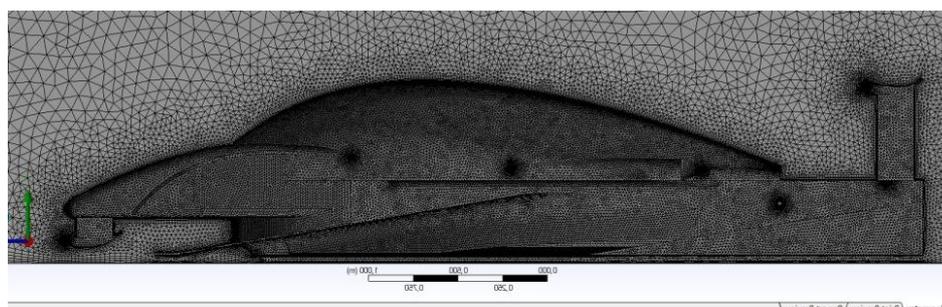


Figura 4.5: Malha na região próxima ao veículo com camadas prismáticas sobre a superfície.

Na geração das camadas prismáticas superficiais, para adequar-se à geometria, foi utilizado o recurso de compressão de camada quando a mesma está confinada entre duas superfícies, como pode ser visto na Figura 4.6.

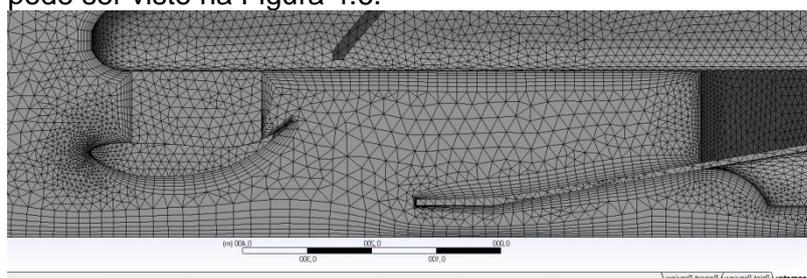


Figura 4.6: Detalhe das camadas prismáticas superficiais

A geração da malha foi feita com a condição de simetria, sendo simulada apenas metade do veículo, diminuindo assim o custo computacional.

### 4.3 Condições de Contorno

A seleção das condições de contorno é uma etapa crucial na representação do fenômeno físico o qual está sendo modelado. As condições aqui utilizadas e concordantes com a literatura [Abramchuk, 2014; Mouffouk, 2014] são:

- Uma entrada de velocidade a frente do veículo, com intensidade de turbulência de 1% e razão de viscosidade turbulenta igual a 10.
- Uma saída de pressão manométrica 0 Pa e intensidade de turbulência de 5% e razão de viscosidade turbulenta igual a 10.
- Piso com condição de não escorregamento e translação na mesma velocidade, sentido e magnitude da entrada de velocidade.
- Plano de simetria com condição de simetria.
- Superfície da carenagem do veículo e rodas com condição de não deslizamento.
- Limite lateral e superior do domínio com condição de deslizamento e impermeabilidade.

As propriedades do fluido (ar) são viscosidade dinâmica de  $1,7894 \times 10^{-5}$  kg/(m.s) e massa específica constante de  $1,225$  kg/m<sup>3</sup>.

Nas simulações feitas para aplicar a técnica GCI foi utilizada a velocidade de entrada e translação do solo de 40m/s, a qual representa uma velocidade média característica deste tipo de veículo em autódromos. Para as demais simulações, a fim de avaliar o efeito da velocidade nos coeficientes aerodinâmicos, os valores de velocidade de entrada e translação do solo foram de 30, 40, 50 e 60m/s. Para a simulação do veículo sem a simplificação geométrica do duto de arrefecimento fechado (Figura 4.7) foi utilizada também a velocidade de 40m/s.

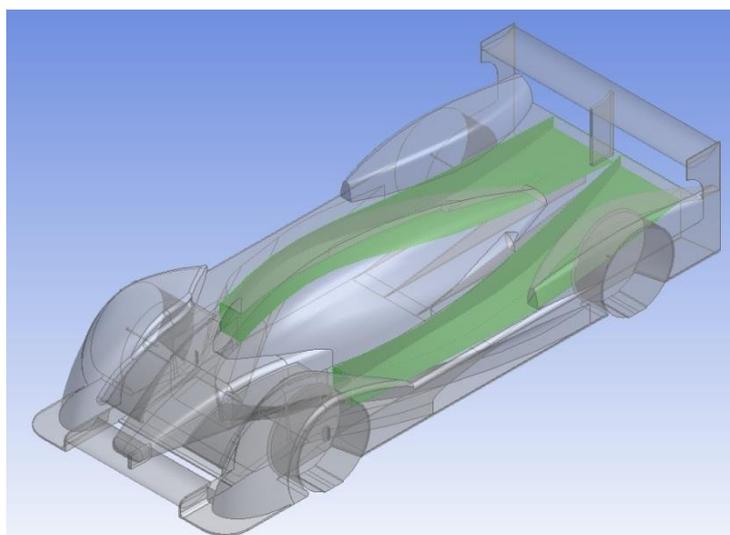


Figura 4.7: Veículo com o duto de arrefecimento retirado em simplificação geométrica evidenciado.

#### 4.4 Solução

Como avaliação de convergência foi utilizado o critério de resíduos de  $K$ ,  $w$ , velocidade e continuidade inferiores a  $1 \times 10^{-5}$ , assim como também foram monitorados os coeficientes de arrasto e sustentação aerodinâmica ao longo das iterações. O regime de solução foi assumido como permanente e para facilitar a convergência, cada caso foi rodado inicialmente em primeira ordem por até 250 iterações, para inicializar a solução de segunda ordem. O algoritmo utilizado foi COUPLED no acoplamento pressão-velocidade, este algoritmo de acoplamento completamente implícito é alcançado através de uma discretização implícita dos termos do gradiente de pressão nas equações de conservação de momento e uma discretização implícita do fluxo massico na face, incluindo os termos de dissipação da pressão de Rhie-Chow (Ansys Fluent Theory Guide, 2011).

#### 4.5 Método GCI

O índice de convergência de malha (GCI) é estabelecido como uma porcentagem de erro e fornece uma estimativa do quanto a solução numérica está convergindo para a solução exata. O método pode ser usado com um mínimo de duas malhas, mas fornece uma melhor estimativa de erro quando usado com três soluções de malha [Schwer, 2008].

Abramchuk, 2014 utiliza o método GCI na predição do arrasto aerodinâmico de um veículo de transporte de passageiros.

As malhas devem respeitar uma razão de refino  $r$  constante, neste trabalho 1,356.

O método GCI consiste na aplicação da extrapolação de Richardson dos resultados obtidos e pode ser calculado a partir da Equação 4.1.

$$P = \frac{\ln\left(\frac{f_2 - f_1}{f_1 - f_2}\right)}{\ln(r)} \quad (4.1)$$

Sendo  $f_x$  o resultado numérico relativo a solução (malha) de índice  $x$ , e  $r$  a razão de refino. Pode-se agora calcular a extrapolação para o valor exato da função  $f$  através da Equação 4.2.

$$f_{exata} \cong f_1 + \frac{f_1 - f_2}{r^p - 1} \quad (4.2)$$

Calcula-se o erro relativo ( $\epsilon$ ) entre duas malhas pela Equação 4.3.

$$\epsilon = \frac{f_2 - f_1}{f_1} \quad (4.3)$$

Temos então o GCI para a malha fina definido pela Equação 4.4 como:

$$GCI_{fina} = \frac{F_{Seg} |\epsilon|}{r^p - 1} \quad (4.4)$$

Sendo  $F_{Seg}$  um fator de segurança que multiplica o erro relativo, segundo Abramchuk, 2014, o valor  $F_{Seg} = 1,25$  é um bom valor para este tipo de problema.

Ficando, então, o resultado contido no intervalo  $f_1 \pm GCI_{fina}$ .

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Resultados GCI

Após a convergência dos resultados, foram obtidos os coeficientes de arrasto aerodinâmico e coeficiente de sustentação de cada um dos casos. A convergência do coeficiente de sustentação para um dos casos é ilustrada na Figura 5.1.

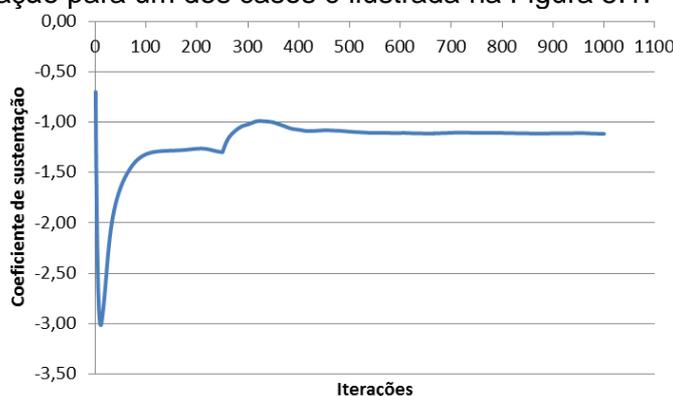


Figura 5.1: Convergência do coeficiente de sustentação para um dos casos.

Os resultados mostraram-se convergentes com o refino da malha como pode ser observado na tabela 5.1 onde a diferença entre malhas consecutivas diminui.

Tabela 5.1: Resultados dos coeficientes aerodinâmicos por refinamento de malha.

Número de elementos	Coeficiente de Sustentação ( $C_l$ )	Coeficiente de Arrasto ( $C_d$ )
5.760.059	-1,117	0,475
7.810.935	-1,077	0,467
10.592.027	-1,048	0,462

Uma vez de posse dos resultados foi possível analisar seu intervalo provável, segundo método GCI, conforme apresentado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Intervalo provável dos resultados dos coeficientes aerodinâmicos.

Coeficiente de Sustentação ( $C_L$ )	Coeficiente de Arrasto ( $C_D$ )
$-1,183 < C_L < -0,913$	$0,445 < C_D < 0,479$

O erro percentual (GCI) do coeficiente de sustentação ficou igual a 12,8% enquanto o de arrasto ficou igual a 3,7%. A discretização espacial de um veículo com geometria tão complexa deve ser mais refinada afim de obter resultados com menor intervalo provável, assim como o domínio deveria ter proporções maiores afim de afetar o mínimo possível a recuperação na região da esteira aerodinâmica. Porém os resultados aqui apresentados ainda possuem validade qualitativa em suas tendências e campos de velocidade e pressão, sendo úteis na otimização ou identificação de zonas críticas.

O resultado de coeficiente de sustentação aerodinâmica ficou abaixo do que se espera para este tipo de veículo. Segundo Katz, 1995 os valores típicos de coeficientes aerodinâmicos baseados em área frontal são expressos na Figura 5.2.

		$C_L$	$C_D$
7	Prototype race car	-3.00	0.75

Figura 5.2: Coeficientes aerodinâmicos típicos para diversas geometrias [Katz, 1995].

Com base nestes resultados foi feita uma análise qualitativa do campo de distribuição de pressões ao longo da superfície do modelo, Figura 5.3.

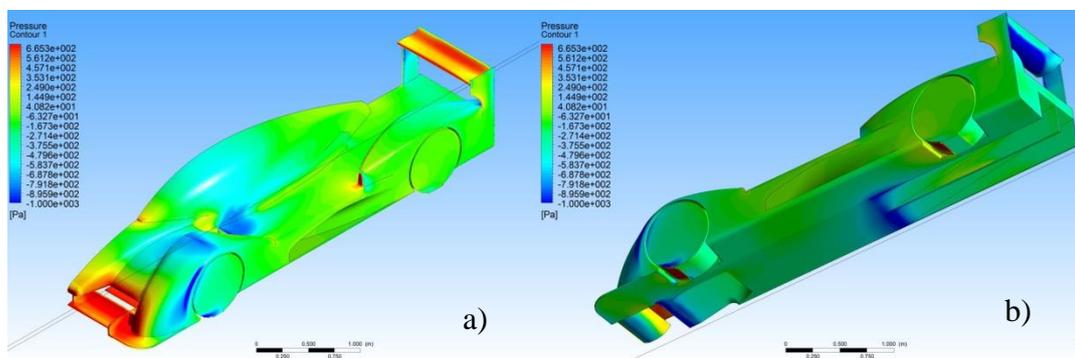


Figura 5.3: Distribuição de pressão na superfície do modelo, a) vista isométrica da parte superior e b) vista isométrica da parte inferior.

O campo de pressões apresentado na Figura 5.3 indica inicialmente o correto funcionamento dos aerofólios e do assoalho, gerando uma força descendente. Com pressões manométricas negativas em superfícies com a normal voltada para baixo e pressões manométricas positivas em superfícies com normal voltada para cima.

Porém verifica-se uma grande zona de estagnação na região frontal do veículo, ocasionada pela simplificação geométrica de fechamento do duto de arrefecimento. Esta mesma simplificação provoca também o descolamento e respectiva zona de baixa pressão logo atrás da roda dianteira, e uma diminuição da velocidade experimentada pela asa dianteira. Isto pode ser melhor verificado na Figura 5.4. Outras zonas críticas são o topo do teto do veículo, onde o ar é acelerado gerando uma zona de baixa pressão voltada para cima e a parte superior do paralamas dianteiro que gera o mesmo efeito.

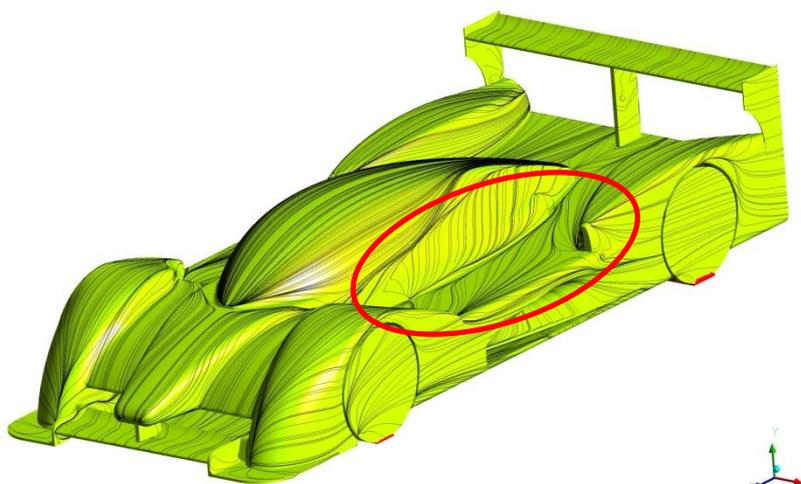


Figura 5.4: Visualização de tensão cisalhante na superfície, descolamento após o local onde deveria haver a entrada do duto de arrefecimento.

## 5.2 Variação $C_l$ e $C_d$ com a velocidade

Ainda utilizando esta geometria simplificada foi estudado o efeito da velocidade sobre os coeficientes aerodinâmicos com a malha mais refinada. Os resultados são apresentados a seguir, lembrando que todos os resultados são com a aplicação de um plano de simetria, e os valores das forças para o veículo como um todo devem ser multiplicados por 2.

Tabela 5.3: Resultados de coeficientes aerodinâmicos para diferentes velocidades.

Velocidade (m/s)	Força de arrasto (N)	$C_d$	Força de sustentação (N)	$C_l$
30	225	0,468	-501	-1,046
40	398	0,467	-918	-1,048
50	618	0,464	-1455	-1,092
60	895	0,467	-2196	-1,145

Os resultados dos coeficientes aerodinâmicos foram graficados com sua respectiva barra de incerteza para avaliar a constância da carga aerodinâmica com a velocidade.

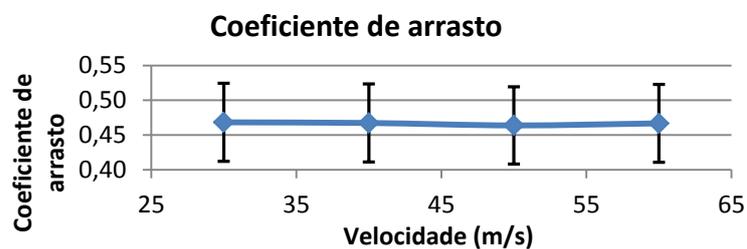


Gráfico 5.3: Coeficiente de arrasto aerodinâmico.

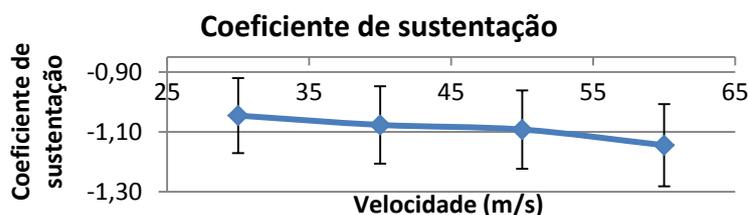


Gráfico 5.4: Coeficiente de sustentação aerodinâmica.

Percebe-se uma tendência a aumentar em magnitude no coeficiente de sustentação, porem seu aumento ainda é inferior ao erro associado, portanto não são possíveis conclusões a seu respeito, já no caso do coeficiente de arrasto, o mesmo manteve-se estavel em toda a faixa de velocidade simulada.

### 5.3 Análise da geometria sem simplificação

Uma vez verificada a estabilidade dos coeficientes com a velocidade, foi feita uma simulação sem a simplificação geométrica de exclusão do duto de arrefecimento, a fim de avaliar seu impacto no modelo. A malha utiliza as mesmas configurações da malha mais fina, obtendo aproximadamente 12,5 milhões de elementos.

Os campos de pressão sobre a superfície do veículo se modificaram, não há agora a zona de baixa pressão provocada pelo descolamento do ar após sua saída logo atrás da roda traseira, o que pode ser verificado de forma qualitativa ao observar o campo de pressão apresentado na Figura 5.6.

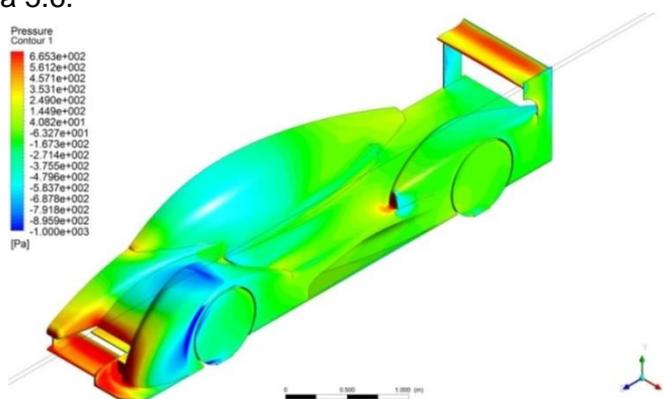


Figura 5.6: Pressão total manométrica sobre a superfície do veículo.

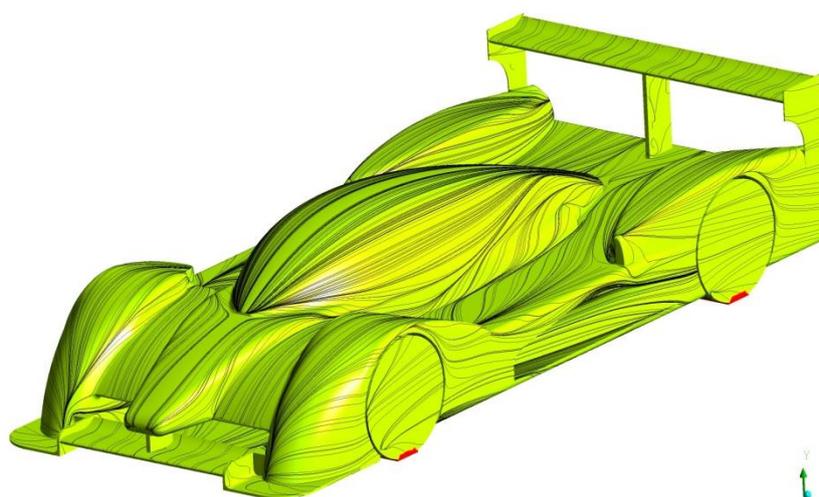


Figura 5.7: A tensão cisalhante sobre a superfície do veículo agora apresenta-se mais paralela ao escoamento.

Os resultados dos coeficientes aerodinâmicos do modelo que conta com duto de arrefecimento seguem na tabela abaixo. Considerando que foram utilizadas as mesmas características de malha, tais como  $Y^+$ , tamanho de aresta sobre superfície, razão de crescimento, e os gradientes de velocidade e pressão possuem igual ou menor grandeza. Para

estimar a variação dos resultados em torno do valor obtido foram utilizados os mesmos valores de erro percentual (GCI) para os coeficientes aerodinâmicos.

Tabela 5.4: Resultados dos coeficientes e forças aerodinâmicas para o modelo com o duto fechado.

Coeficiente de Sustentação ( $C_l$ )	Coeficiente de Arrasto ( $C_d$ )	força sustentação (N)	Força arrasta (N)
$-1,26 \pm 0,151$	$0,448 \pm 0,054$	$-1074 \pm 129$	$382 \pm 46$

## 6. CONCLUSÃO

A partir dos resultados tem-se que a metodologia empregada mostra-se efetiva na avaliação das características aerodinâmicas de veículos em geral. Do ponto de vista da avaliação da geometria proposta, os resultados da geometria não simplificada permitem verificar que o modelo apresenta pouco arrasto aerodinâmico quando comparado a valores típicos de veículos desta categoria ( $C_l = -3,0$  e  $C_d = 0,75$  conforme Figura 5.2). Logo, uma geometria com ângulos mais agressivos nos aerofólios e difusores pode ser aplicada, aumentando assim a magnitude dos dois coeficientes analisados. Uma atenção especial deve ser dada às superfícies com normal voltada para cima, como o teto e os paralamas dianteiros, pois estas superfícies estão gerando sustentação, a qual diminui a eficiência aerodinâmica (para downforce) do veículo como um todo. Além disso o resultado de variação dos coeficientes aerodinâmicos com a velocidade mostrou-se bastante estável, o que é o ideal para a dinâmica do carro. Assim como a verificação da geometria não simplificada apresentou resultados ainda melhores (maior magnitude de  $C_l$  e menor magnitude de  $C_d$ ). Os resultados deste trabalho possuem maior validade qualitativa do que quantitativa pois a incerteza associada a simulação ficou na ordem de  $\pm 12\%$ , mas o fato de se conhecer os campos de pressão e velocidade permite otimizar o modelo mesmo que sem quantificar com precisão sua performance.

Para trabalhos futuros, malhas mais refinadas e uma geometria modificada e com maiores detalhes, como geradores de vortices e aerofólios de perfis múltiplos pode ser empregada. Do ponto de vista da análise dinâmica dos fluidos computacional, pode ser aplicada uma metodologia de simulação de largas escalas (LES) como feito por Krajnovic, 2002, a fim de obter informações sobre transientes e picos instantâneos de pressão e velocidade. Simulações com diferentes alturas e ângulos do veículo em relação ao solo também devem ser feitas para avaliar as variações de carga aerodinâmica do veículo nas condições dinâmicas na qual ele é empregado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMCHUK, Vagner. “**Estudo da força de arrasto sobre veículos de transporte de pessoas empregando CFD**”. Dissertação de mestrado em engenharia mecânica, UFRGS, 2014.

Ansys Fluent. “Ansys Fluent User’s Guide”. Versão 13, 2011.

Ansys Fluent. “Ansys Fluent Theory Guide”. Versão 13, 2011.

Epsilon Euskadi. “**Formula One Rear Wing Optimization**” Formula 1 technical report, 2011.

KATZ, Joseph. “**Aerodynamics of race cars**”. The annual review of fluid mechanics, 2006.

KATZ, Joseph. “**Racecar Aerodynamics: Designing for speed**”. Bentley publishers, 1995.

Krajnovic S.; Davidson L.” **Development Of Large-Eddy Simulation For Vehicle Aerodynamics**”. IMECE, 2002.

LANFRIT, Marco. “**Best practice guidelines for handling automotive external aerodynamics in FLUENT**”. Fluent Deutschland GmbH, Version 1.2, 2005.

MOUFFOUK, Mouhamed A. “**Aerodynamic development of the seguracing F1-R01 prototype using CFD**”. Undergraduate thesis, University H.L of Batna, 2014.

Milliken, W. F; Milliken, D. L, “**Racecar Vehicle Dynamics**”. SAE, 1994.

Mulsannes corner, “**Le Mans 2015**”, Mulsannescorner.com , acessado em 28/10/2015.

Peddie, K. M.; Gonzalez, L. F. “**CFD Study on Difuser of Formula 3 Racecar**”, University of Sydney, 2009.

Race Car Engineering, “**Aerodynamics of Formula One**”, Racecarengineering.com , acessado em 28/10/2015.

Schwer, I. E. “**Is your mesh refined enough? Estimating discretization error using GCI**”. LS- Dyna, 2008.

Wilcox, D. C., "Reassessment of the Scale-Determining Equation for Advanced Turbulence Models," **AIAA Journal**, Vol. 26, No. 11, 1988.

## ANEXO 1 - Metodologia para estimar a espessura da camada limite (Abramchuk, 2014)

A geração da malha é uma das etapas mais importante para obter resultados satisfatórios na simulação computacional. Ela definirá quais são as principais regiões de interesse do domínio e principalmente a região próxima à parede, denominada de camada limite. Com base na revisão bibliográfica sobre estudos da camada limite, desenvolveu-se uma planilha de cálculos, modelo no apêndice A-1. O objetivo desta planilha é estimar, independente do problema a ser estudado, a espessura da primeira camada de elementos sobre a parede, seguido da quantidade de elementos necessários e a espessura da camada limite total, de maneira a respeitar os limites de aplicação da modelagem empregada. Abaixo está descrita a sequência de passos empregados para a estimativa da camada limite utilizando a planilha desenvolvida:

I. O usuário define na janela de entrada, Tabela 4.1, a densidade da espessura da primeira camada de elementos, onde o escoamento junto a paredes apresenta elevados gradientes das variáveis de interesse, de modo que é fundamental garantir uma quantidade suficiente de malhas que permita a capturar o fenômeno físico desta região. Em escoamentos turbulentos, é possível identificar a proximidade do primeiro nó da malha, a partir da parede, através do ( $Y^+$ ), que é a distância adimensional à parede. Seguido das propriedades principais do fluido, da velocidade característica do escoamento e o comprimento característico do problema.

Tabela 4.1 – Dados de entrada estimativa da camada limite, planilha

densidade espessura primeira camada elementos	$\nu^+$
viscosidade dinâmica do fluido (kg/m.s)	$\mu$
densidade do fluido (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho$
velocidade característica (m/s)	$u$
comprimento característico do modelo (m)	$L$
viscosidade cinemática do fluido (m <sup>2</sup> /s)	$\nu$

II. Com estes dados o número de Reynolds é estimado possibilitando identificar se o escoamento é laminar ou turbulento. O coeficiente de fricção superficial local é dependente do número de Reynolds e é estimado conforme Tabela 4.2 para o escoamento laminar, C.L.T 1 indica os valores obtidos a partir da “lei de potência 1/7” e C.L.T 2 utiliza além da referida lei, sendo que suas características principais apresentadas no seção 3.2.3

Tabela 4.2 – Cálculo do coeficiente de fricção superficial local

símbolo	laminar	C.L.T 1	C.L.T 2
$C_{f,x}$	$0,664 / \sqrt{Re_x}$	$0,027 / \sqrt{Re_x}$	$0,059 / \sqrt{Re_x}$

III. A tensão de cisalhamento na parede  $w$  é dependente de  $C_{f,x}$  e é calculada pela Equação 3.4, que possui como variáveis a velocidade característica do escoamento e a massa específica do fluido, ambas já definidas nos dados de entrada.

IV. Desta maneira a velocidade de fricção dada pela Equação 3.15, dependente da massa específica do fluido e a  $w$  são apresentadas.

V. Com o valor da velocidade de fricção automaticamente define-se a espessura da primeira camada de elementos ou variáveis da lei da parede com a Equação 3.19, já apresentada anteriormente.

VI. A espessura total da camada limite é dependente do número de Reynolds, que sendo laminar, C.L.T 1 e C.L.T 2 segue a tabela 4.3. Seus conceitos foram apresentados na seção 3.2.3

Tabela 4.3 – Espessura total da camada limite

<b>símbolo</b>	<b>laminar</b>	<b>C.L.T 1</b>	<b>C.L.T 1</b>
$\delta/x$	$4,91/\sqrt[2]{\text{Re}_x}$	$0,160/\sqrt[3]{\text{Re}_x}$	$0,380/\sqrt[5]{\text{Re}_x}$

VII. A quantidade de elementos da camada limite é o último passo a ser determinado. A Equação 4.12 é dependente dos dois passos anteriores, espessura da primeira camada de elementos e da espessura total da camada limite.

$$n = \frac{\log \left[ \frac{\delta \times (q - 1)}{y} + 1 \right]}{\log(q)} \quad (4.12)$$

Para o caso da simulação de escoamento de fluidos sobre a esfera, o modelo em escala reduzida e ônibus em escala real é utilizado a sequência de cálculos apresentados nesta seção para estimativa da espessura da camada limite.