



# ANÁLISE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL PARA OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM VEÍCULO BAJA SAE

## ARTIGO ORIGINAL

NASCIF, Gabriel Nobre Alves<sup>1</sup>, ESCALEIRA, Pedro Augusto Gama<sup>2</sup>

NASCIF, Gabriel Nobre Alves. ESCALEIRA, Pedro Augusto Gama. **Análise fluidodinâmica computacional para otimização do desempenho de um veículo Baja SAE.** Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 06, Ed. 06, Vol. 15, pp. 33-57. Junho de 2021. ISSN: 2448-0959, Link de acesso: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-mecanica/baja-sae>, DOI: 10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-mecanica/baja-sae

## RESUMO

Este trabalho trata-se de uma análise *CFD* (Fluidodinâmica Computacional) realizada no *ANSYS*, com o objetivo de quantificar as forças e coeficientes aerodinâmicos atuantes em um veículo *off-road* de competição estudantil Baja SAE, e, desta forma, possibilitar examinar a influência de diferentes formatos de carenagem na velocidade final do protótipo. O estudo aborda desde a parte inicial da modelagem da geometria em *CAD* (Desenho auxiliado por computador), a qual foi feita no software *SOLIDWORKS*, a simplificação do modelo para geração da malha, aplicação das devidas condições de contorno, e, finalmente, o pós-processamento da simulação fluidodinâmica, com análise dos gradientes de pressão e velocidades do fluxo de ar ao redor do veículo, a fim de justificar os valores de arrasto encontrados. Após a realização das análises computacionais, levou-se o veículo para teste em um dinamômetro de rolos para aferição de sua curva de potência por velocidade. Com isso, juntamente com os resultados adquiridos na simulação, foi possível a

---

<sup>1</sup> Graduando.

<sup>2</sup> Graduando.



comparação dos dados das potências resistivas dos diferentes modelos avaliados no software com a potência disponível do próprio protótipo, chegando assim, em velocidades finais distintas para cada geometria. Além disso, averiguar a partir de qual velocidade o arrasto se torna relevante. No desenvolvimento, dois formatos de parede corta-fogo (estrutura que separa o piloto do tanque de combustível) foram analisados, o primeiro, com a geometria fechada, e o segundo, com uma redução da área em comparação ao modelo anterior. Com os resultados obtidos, fica evidente a considerável influência que esta estrutura exerce no veículo, com uma redução de 38% no coeficiente de arrasto e 163% de diferença na força aerodinâmica para uma velocidade de 15 m/s.

Palavras-Chave: *CFD*, Baja SAE, Aerodinâmica, Arrasto, Velocidade Máxima.

## 1. INTRODUÇÃO

A análise *CFD* aborda, por meio de simulação numérica, estudos do comportamento dos fluidos, transferência de calor, combustão, entre outros (ESSS, 2016). É uma importante ferramenta para o desenvolvimento da fluidodinâmica computacional, a qual, muitas vezes, ajuda a reduzir custos e tempo de desenvolvimento de modelos de testes reais. Apesar disso, não se pode considerar o *CFD* como uma ferramenta oposta e concorrente às experimentações realizadas em campo, e sim, um complemento.

A simulação fluidodinâmica computacional consiste na discretização do volume analisado em pequenas partes. A partir dessa, são utilizados métodos numéricos para solucionar as equações de *Navier-Stokes* (descrevem o escoamento de fluidos), com isso, é possível determinar os esforços aerodinâmicos nos elementos do domínio fluido analisado (CASTEJON, 2011). A divisão deste domínio é realizada a partir do método dos volumes finitos, ferramenta poderosa utilizada comumente em simulações deste tipo.



Uma de suas aplicações mais utilizadas é na aerodinâmica veicular, a qual começou a ser estudada nos anos 1920, sendo que, até os dias de hoje, as forças resultantes da interação do ar com o veículo podem chegar a consumir 30% da potência do mesmo (NICOLAZZI *et al*, 2012).

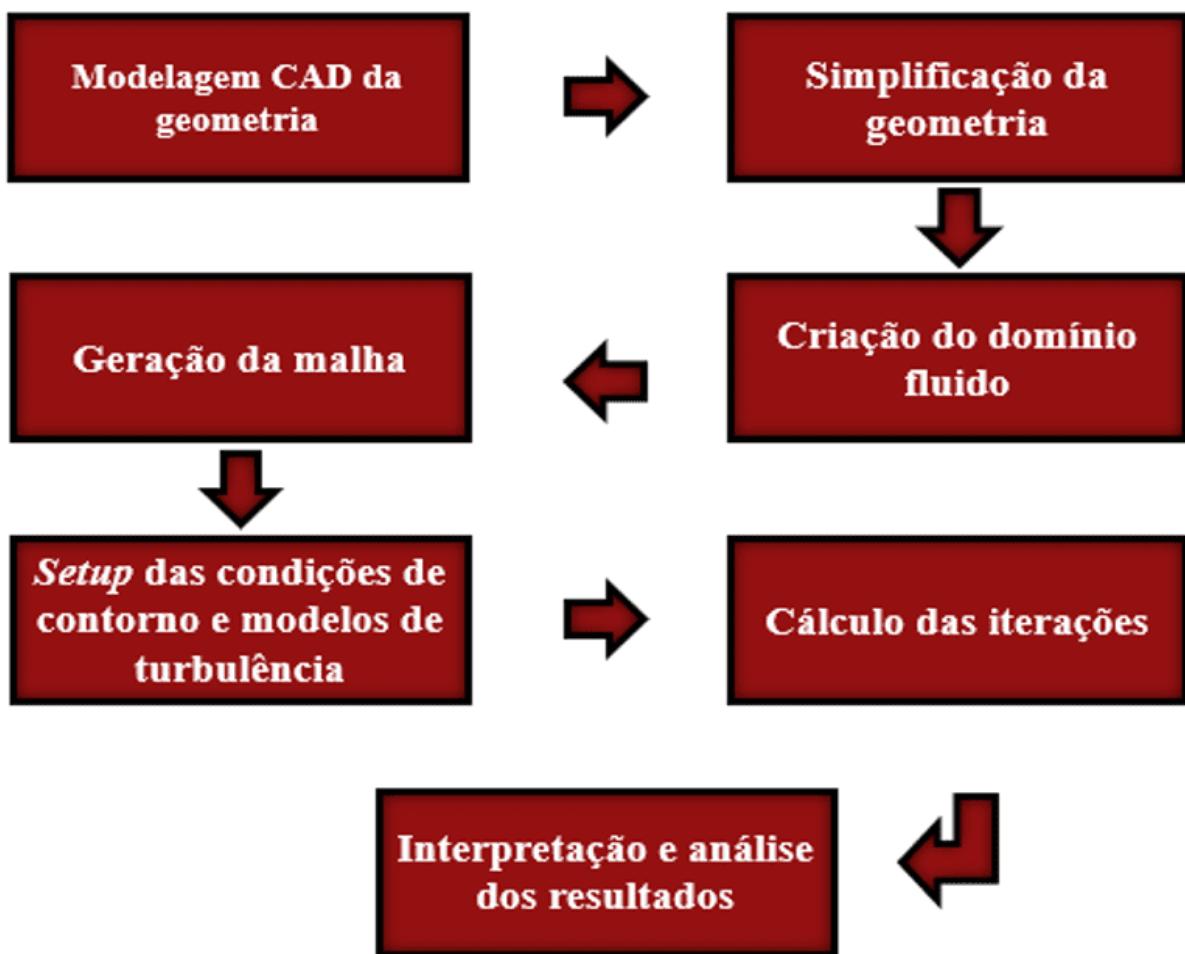
Em uma competição de alto nível como a Baja SAE Brasil, é importante que todos os parâmetros do veículo sejam analisados. Como todos os protótipos inscritos apresentam o mesmo modelo de motor, o qual é limitado pelo regulamento da competição para que este não seja amplamente modificado, é fundamental o desenvolvimento de outras competências que afetam o desempenho do veículo, como por exemplo, o arrasto causado pelas forças aerodinâmicas. Apesar dos carros presentes na competição não ultrapassarem velocidades acima de 60 km/h, a análise aerodinâmica dos mesmos pode resultar em melhorias nas provas dinâmicas.

## 2. METODOLOGIA

Objetivando alcançar uma melhoria no desempenho do protótipo desenvolvido pela equipe RAMPAGE BAJA, foram feitas geometrias simplificadas do protótipo (visando reduzir o custo computacional, sem perder a acurácia dos resultados) com diferentes configurações da parede corta-fogo (*firewall*) e da carenagem do veículo no software *SOLIDWORKS*. Após isso, foi utilizado o software *ANSYS SpaceClaim* para preparação da geometria para simulação, em sequência, foi gerada uma malha, e posteriormente, realizou-se a simulação no *ANSYS FLUENT*, juntamente com a análise dos resultados.

Abaixo, foi feito um fluxograma detalhando um passo a passo de um estudo *CFD*, exemplificando os passos descritos no parágrafo anterior:

Figura 1 - Fluxograma do estudo CFD.



Fonte: Autoria própria.

Esse, pode ser ainda dividido em três etapas macros. A primeira, pré-processamento, que engloba desde a concepção da geometria até a fase de definição das condições de contorno. A segunda é o cálculo das soluções, em que o software resolve as equações da fluidodinâmica. A última representa a etapa de pós-processamento, em que está presente a análise dos resultados, sendo esta, fundamental para garantir resultado aceitável, além disso, cabe inteiramente ao operador conhecer os conceitos teóricos sobre o assunto e interpretar os resultados, a fim de confirmar se o comportamento está coerente e dentro do esperado.

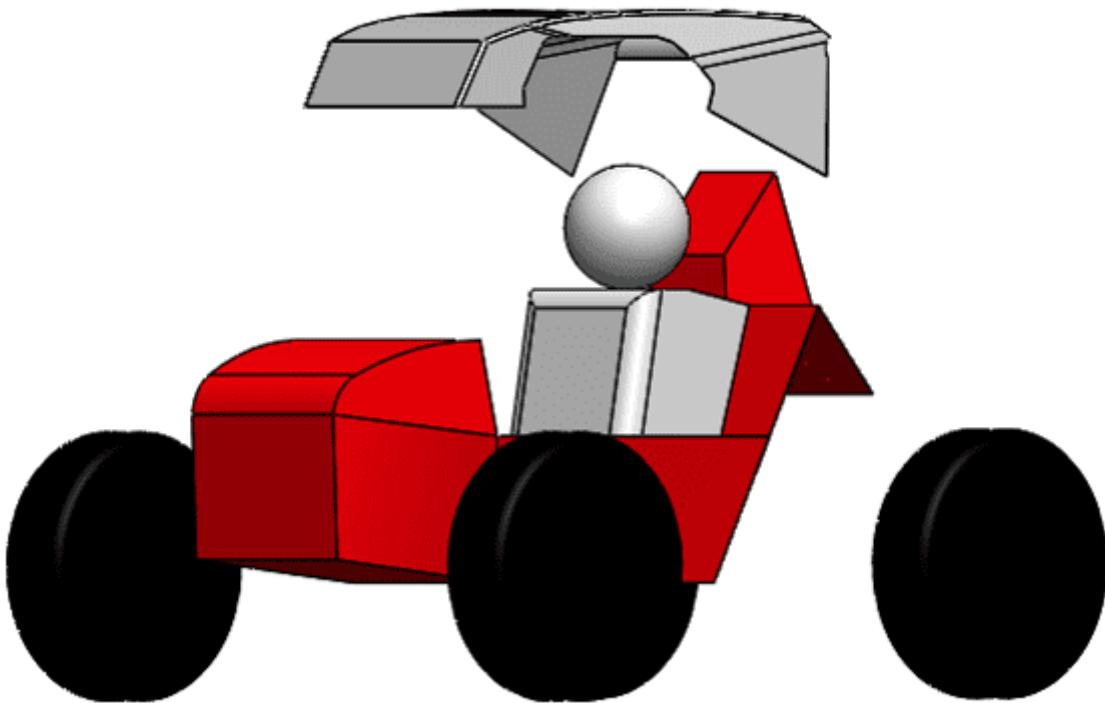


### 3. DESENVOLVIMENTO

#### 3.1 GEOMETRIA

A geometria do veículo foi desenvolvida em *SOLIDWORKS*, de uma forma simplificada, com o objetivo de reduzir o custo computacional, porém, mantendo as principais características do veículo que influenciam na obtenção dos resultados. Gómez *et al.* (2018) também desenvolveu um corpo simples de um protótipo Baja para ser utilizado na simulação *CFD*, a fim de evitar pequenas faces, ângulos estreitos e formas complexas.

Figura 2 - Geometria modelada no *SOLIDWORKS*:



Fonte: Autoria própria.

Além disso foi feito um maior processo de simplificação no *ANSYS SpaceClaim*, com ferramentas contidas na aba *Repair*, as quais são próprias para este tipo de processo.

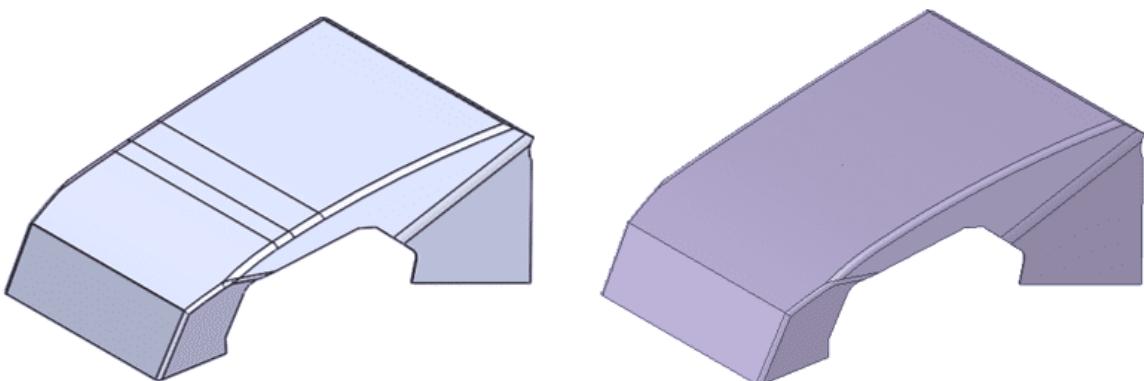
RC: 89586

Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-mecanica/baja-sae>



Um exemplo de peça que sofreu modificações no *SpaceClaim* foi o teto, o qual apresentava curvas que dificultariam a geração de malha, e foram simplificadas.

Figura 3 - À esquerda, teto modelado no *SOLIDWORKS*. À direita, teto simplificado no *SpaceClaim*:



Fonte: Autoria própria.

O *firewall* e o *splash shield* (compartimento do tanque, localizado atrás do *firewall*) do veículo, por serem geometrias simples, não sofreram necessárias grandes adaptações, ademais, é de suma importância que estas partes da geometria sejam semelhantes em relação a geometria real do veículo, sendo assim, essas mantiveram uma verossimilhança durante a análise.

O chassi tubular do veículo, devido a sua pouca influência no arrasto aerodinâmico, foi desconsiderado na modelagem, porém, as curvas do *cockpit* e do capô foram fielmente representadas no modelo, seguindo as curvas originais.

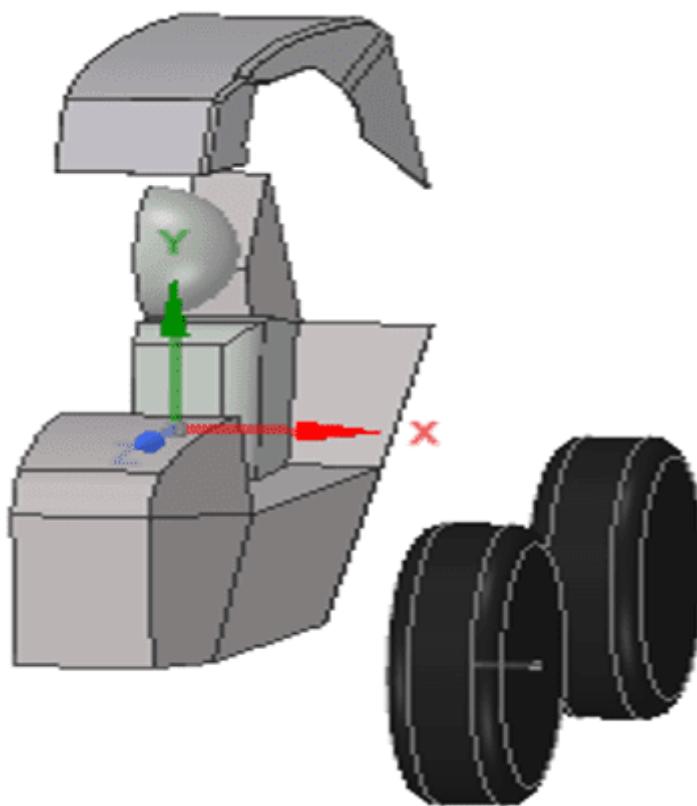
Os pneus foram modelados de uma forma sem que seus sulcos ficassem representados, mantendo um formato reduzido no quesito de detalhes, assim como as características do corpo do piloto, pois estes poderiam dificultar a geração de malha, como representado por Ma *et al.* (2018). Ainda, todo o veículo foi feito em escala 1:1, e, o modelo desenvolvido para análise é simétrico, logo, foi utilizado uma geometria de *half car model*, como representado na imagem abaixo.

RC: 89586

Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-mecanica/baja-sae>



Figura 4 - *Half car* com *firewall* reduzido



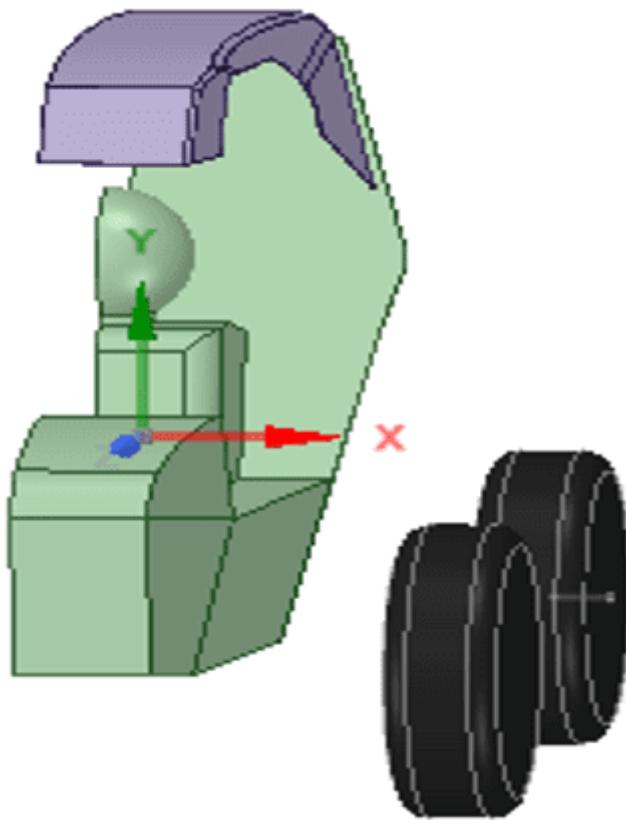
Fonte: Autoria própria.

As vantagens desta configuração, como descrito e exemplificado por Abo-Serie *et al.* (2010), além de ser fidedigna à original, apresenta uma diferença de resultados menor que 1% em relação ao modelo completo, consumindo 50% a menos de tempo de simulação.

As características descritas acima são do carro com a geometria de *firewall* reduzida. Foi feito também um modelo com esta peça completa, o que aumentou em 18,2% da área frontal do veículo, como mostrado na figura abaixo:



Figura 5: *Half car* com o *firewall* completo.



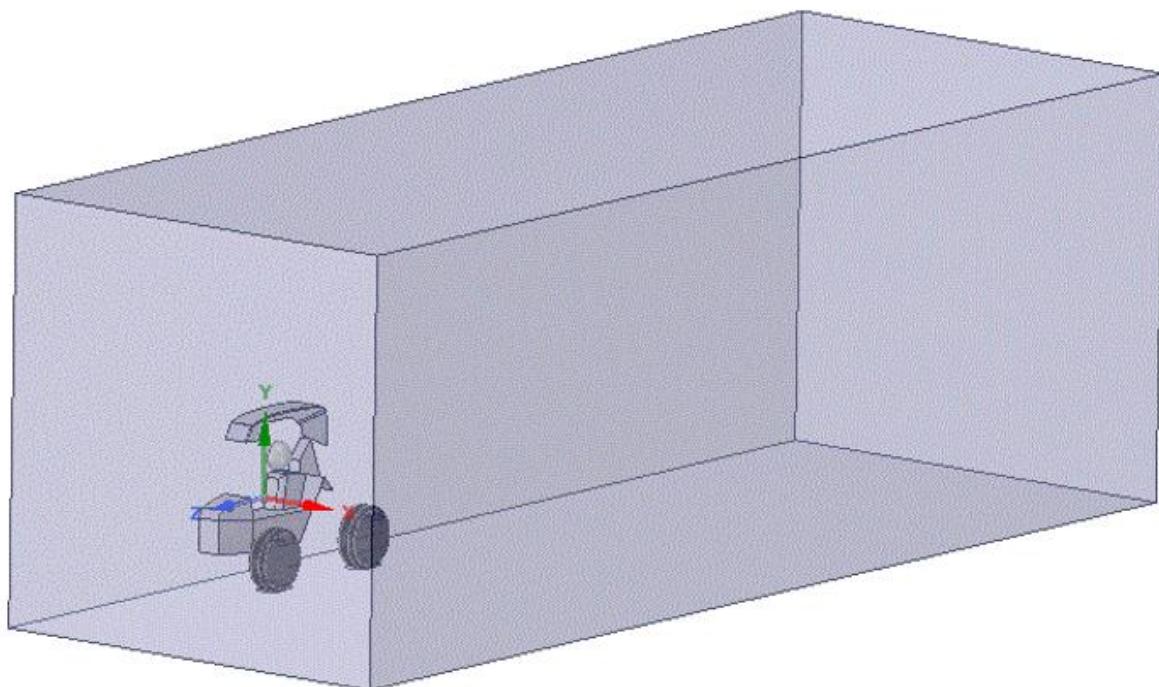
Fonte: Autoria própria.

A geometria também foi considerada simétrica, a qual, novamente, possibilitou o uso do *half car model*. As simplificações feitas no teto, *cockpit* e pneus foram as mesmas do modelo com a corta-fogo reduzida. Esta segunda modelagem nos permite avaliar se as diferentes geometrias do *firewall* exercem influência significativa na força de arrasto atuante no veículo.

Para a criação do domínio fluido, foi utilizado o recurso *Enclosure* do *SpaceClaim*, como mostra a figura abaixo (referente ao modelo com *firewall* reduzido):



Figura 6 - *Enclosure.*



Fonte: Autoria própria.

Estas medidas foram baseadas no trabalho de Huminic *et al.* (2008), o qual foi realizado uma análise fluidodinâmica em um veículo de Fórmula 1, visando obter os níveis de influência de cada componente estrutural no arrasto e sustentação do veículo. Portanto, as medidas utilizadas foram as seguintes, sendo todas baseadas no comprimento do carro (L):

- 2 L: A frente do carro.
- 5 L : Atrás do carro.
- 2,5 L: Lateral a partir do plano de simetria.
- 2 L: Para cima a partir do plano do chão.

Foi analisado, com isso, o *blockage ratio*, parâmetro o qual tem o intuito de avaliar se as dimensões do domínio fluido não afetariam na simulação, em que, de acordo com



a SAE STANDARDS J2071 (1994), esse deve ser menor que 5%, sendo calculado a partir da fórmula abaixo:

$$\frac{\text{área frontal do veículo}}{\text{área transversal do domínio fluido}} = \text{blockage ratio} \leq 5\%$$

Os valores encontrados para as configurações acima, de ambos os modelos, ficaram dentro da tolerância recomendada. Com isso, o domínio fluido criado está apto para ser utilizado na simulação.

### 3.2 MALHA

Para prever corretamente o fluxo de ar ao redor da geometria do carro, é necessário gerar uma malha com características adequadas, as quais devem ser mais refinadas em regiões da camada limite e do desprendimento dessa, na região conhecida como esteira (local passível de surgimento de vórtex de recirculação). Por ser uma malha com mais recursos, ela acaba consumindo um maior custo computacional, porém, combinada com o *setup* das corretas condições de contorno e da modelagem da turbulência, a acurácia dos resultados fica nítida.

Inicialmente, foi definido o *Element Size* (tamanho do elemento de malha) com tamanho de 250 mm, condizente com regiões mais afastadas da região do veículo, as quais não interferem consideravelmente nos cálculos dos resultados. O próprio software já prepara uma malha com traços voltados para estudos *CFD*, ademais, é possível escolher o solver de preferência, no caso deste trabalho, o *FLUENT*.

Visando a transição dos elementos de 250 mm para os menores na zona de interesse é necessário que haja uma passagem suavizada, para isso é utilizado o recurso *Growth Ratio*, com o valor de 1,2, isso significa que as bordas dos elementos crescem em 20% a cada camada, assim, assegurando uma transição menos brusca (ANSYS MESHING USER'S GUIDE, 2013).

RC: 89586

Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-mecanica/baja-sae>



Foi utilizada a função *Capture Curvature and Capture Proximity*, em que a primeira capta as curvaturas das faces, aumentando a densidade de elementos ao redor dessa, garantindo uma melhor qualidade de elementos na região. A segunda, captura a proximidade entre duas descontinuidades da geometria, e concentra um maior número de elementos nestas regiões. Ambas as funções de captura tiveram um *Min Size* (ferramenta para determinar o tamanho mínimo do elemento de malha) definido para 1,5 mm, sendo menores que as espessuras do teto e do *firewall*. Outra característica para melhorar a qualidade da malha é a *face sizing*, utilizada no *cockpit*, teto e pneus. Nos 3, foi considerado um valor de *Element Size* de aproximadamente 3% do comprimento total do veículo, assim como feito por Abo-Serie *et al.* (2010), o qual, com estes valores, obteve um resultado em sua simulação muito próximo do valor encontrado no teste experimental. A função *Capture Curvature and Capture Proximity* também foi utilizada em todas as *faces sizing* (ferramenta que permite alterar o tamanho dos elementos nas faces), mantendo o mesmo valor mínimo de 1,5 mm.

A ferramenta *Smoothing* tem a função de controlar a transição dos elementos. Essa, tem 3 opções de escolha (*Low*, *Medium* ou *High*). Foi escolhida a *High*, visando diminuir a velocidade de geração dos prismas, evitando assim, uma mudança abrupta entre a malha do veículo e do domínio.

Para prever corretamente o desprendimento da camada limite causada por variáveis gradientes de pressão, é fundamental a geração de uma camada de prismas, a partir da função *Inflation*. Nesse recurso, o *software* cria camadas de elementos prismáticos proporcionais, os quais crescem a partir da superfície do veículo, com características pré-determinadas pelo usuário.

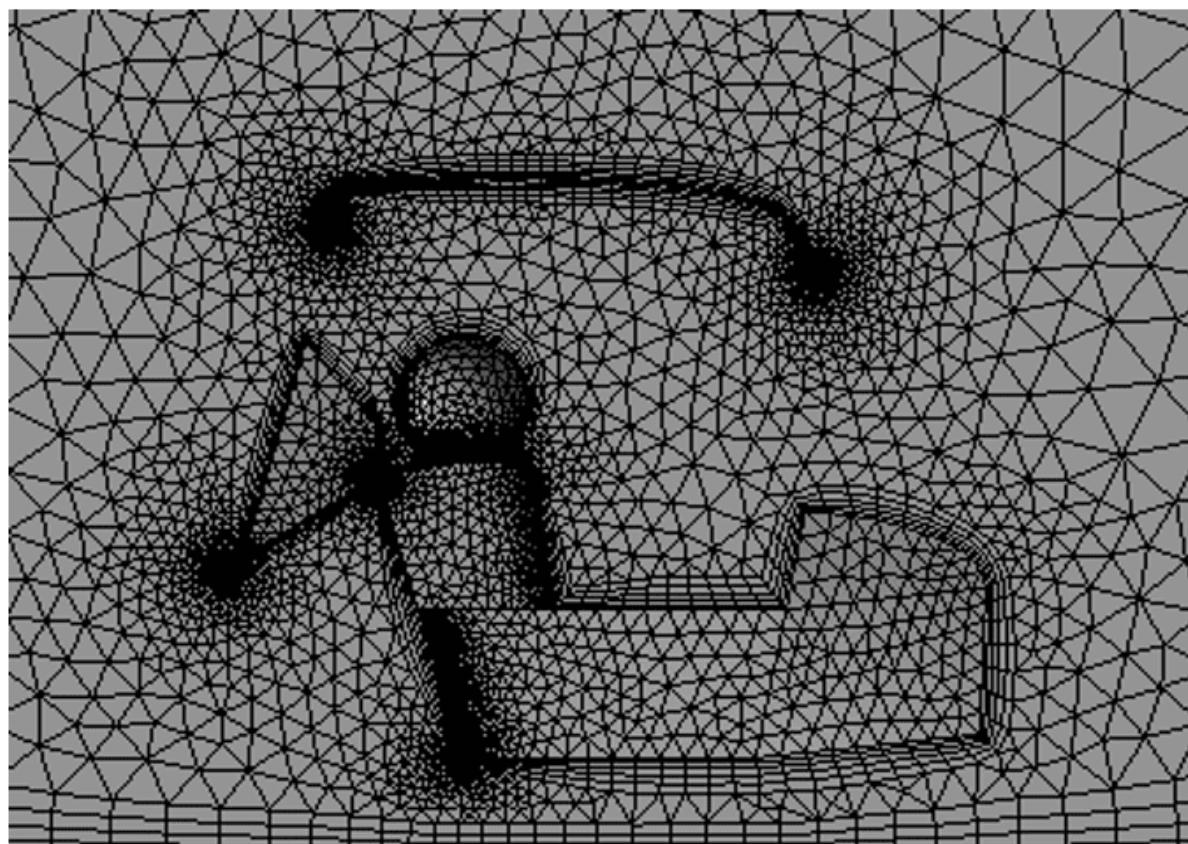
As três principais características do *inflation* a serem analisadas para que esse apresente uma boa qualidade, são as seguintes: *First Aspect Ratio*, *Growth Rate* e *Number of layers* (LANFRIT, 2005). Primeiramente, deve-se analisar o *First Aspect Ratio*, que é o recurso que controla a altura das camadas do *inflation*. Para ele, definiu-se o valor de 5, garantindo uma transição mais suave. O segundo, foi explicado



anteriormente e segue a mesmo raciocínio, inclusive, mantendo o mesmo valor de 1,2. Para o último, foi definido o número de camadas que será usada no *inflation*, o valor escolhido foi 5, baseado no trabalho de Lanfrit (2005).

Para o pós *Inflation*, foi utilizada a ferramenta de *Smoothing Iterations* e foi selecionado seu valor como 10, sendo que, esta, tem a função de determinar o número de *smooth iterations* que serão necessárias para melhorar a qualidade da malha após a geração da camada de prismas. Segue abaixo, uma imagem mostrando a característica da camada de prismas gerada:

Figura 7 - Camada de prismas gerada no modelo com firewall reduzido.



Fonte: Autoria própria.

Com a malha finalizada, é importante verificar a qualidade dessa, para isso, é muito comum se utilizar o indicador *skewness*, esse avalia o quanto deformado está um

RC: 89586

Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-mecanica/baja-sae>



elemento em relação a sua forma. Para isso são avaliados seus valores máximo e médio, os quais são críticos para uma análise de qualidade. Baseado no manual Ansys Meshing User's Guide 13.0 (2010), tem-se uma classificação quanto a qualidade dos elementos em uma escala de valores, como mostrado na tabela abaixo:

Figura 8 - Tabela de classificação dos valores de *skewness*:

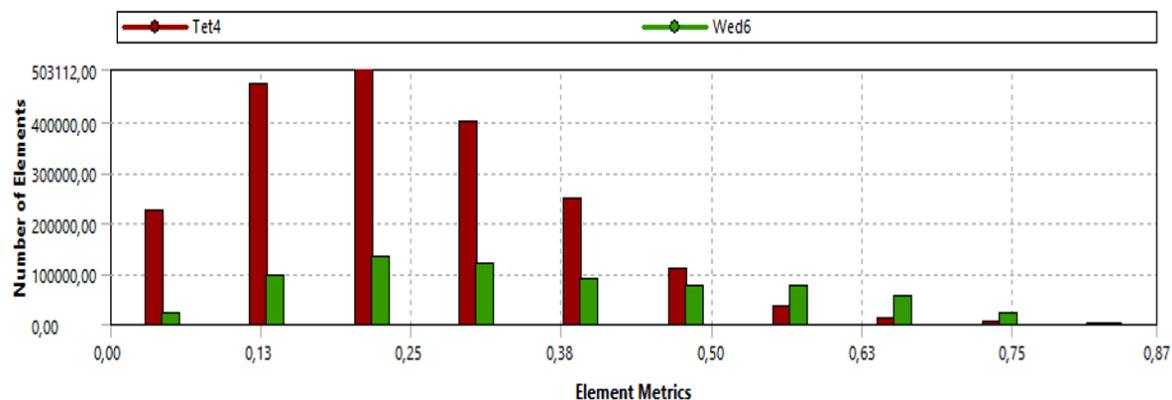
<b>Valor de <i>Skewness</i></b>	<b>Qualidade da célula</b>
1	<b>Corrompido</b>
0,9 - < 1	<b>Ruim</b>
0,75 - 0,9	<b>Pobre</b>
0,5 - 0,75	<b>Razoável</b>
0,25 - 0,5	<b>Bom</b>
> 0 - 0,25	<b>Excelente</b>
0	<b>Equilátero</b>

Fonte: Adaptado de ANSYS MESHING USER'S GUIDE, 2010.

Para a geometria de *firewall* reduzido, o valor máximo encontrado em nossa malha foi 0,869, um valor considerado pobre, porém, aceitável por ser o elemento de pior qualidade, afinal, o valor médio foi de 0,268, próximo ao intervalo considerado excelente. Já para o modelo de *firewall* cheio, os valores encontrados foram bem próximos do anterior, sendo o máximo de 0,899 e sua média 0,259, o que assegura uma malha apta para análise.



Figura 9 - Gráfico de divisão da qualidade dos elementos de acordo com seu *skewness*, referente ao modelo com o *firewall* reduzido.



Fonte: Autoria própria.

Com a malha pronta, para o modelo com *firewall* reduzido, obteve-se 710.119 nós e 2.673.131 elementos, já para a geometria com o *firewall* cheio, o valor foi de 855.948 nós e 3.188.259 elementos.

### 3.3 MODELOS DE TURBULÊNCIA

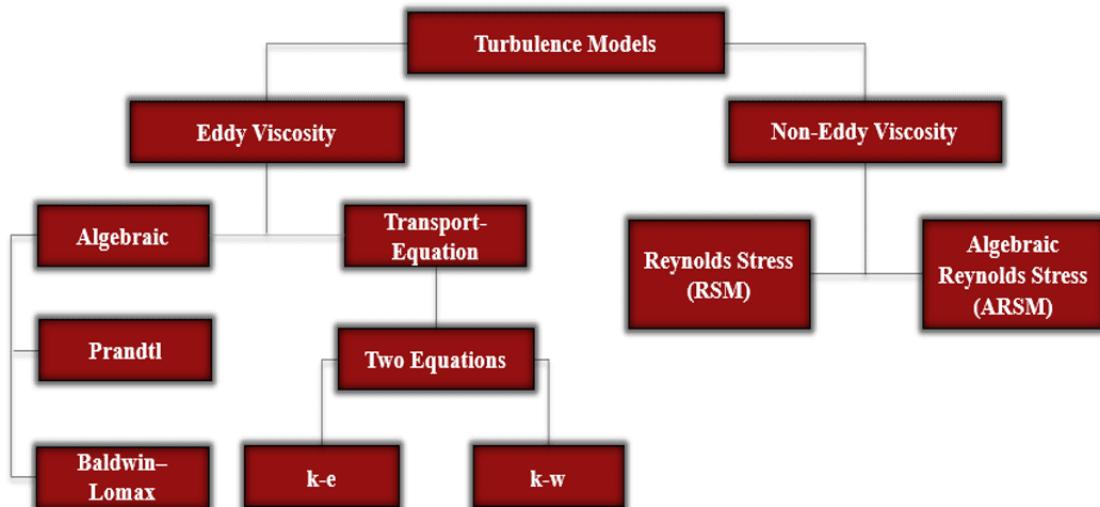
O escoamento do ar através do veículo Baja trata-se de um fluxo turbulento, o qual apresenta maior complexidade que um escoamento laminar. Devido ao fato de existirem diversos modelos para representar um problema desta forma, torna-se importante entender o funcionamento desses e fazer uso do mais adequado. Essas diferenças existem por conta da complexidade de uma análise desta natureza, assim, cada modelo é uma simplificação do comportamento real (CASTEJON, 2011).

A necessidade de se ter uma modelagem que representasse de forma mais fidedigna a realidade a qual os veículos são submetidos fez com que surgisse um modelo com base em uma solução média temporal das equações de *Navier-Stokes*, conhecido como RANS (*Reynolds Average Navier Stokes*) (CASTEJON, 2011). Esse é o método mais utilizado no *CFD*, e, aliado a poderosos modelos de turbulência, torna-se uma ferramenta robusta para solução dos problemas fluidodinâmicos.

RC: 89586

Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-mecanica/baja-sae>

Figura 10: Diferentes modelos de turbulência.



Fonte: Adaptado de Castejon (2011).

Castejon (2011, p. 27) descreve: “os modelos representados pela *Eddy Viscosity*, apresentam um aumento da viscosidade isotrópico, ou seja, de igual magnitude em qualquer direção”. Neste trabalho, optou-se por utilizar a equação de transporte  $k-\epsilon$  (em que “ $k$ ” representa a energia cinética, e “ $\epsilon$ ” representa a dissipação desta energia), o qual acrescenta mais 2 equações para o cálculo da formulação de *Navier-Stokes*. Dentro destas 2 equações de transporte, tem-se 3 subdivisões, as quais são: *standard*, *RNG* e *realizable*. Foi escolhido o modelo  $k-\epsilon$  *realizable*, pois este satisfaz certas limitações matemáticas das tensões de Reynolds, ideal para escoamentos turbulentos, além disso, estudos preliminares, de acordo com o guia Ansys Fluent Theory Guide (2013), mostraram que esta opção apresenta melhor performance em relação às outras duas, devido a maior precisão em prever regiões de separação do fluido.

Este modelo é muito utilizado na indústria automobilística, desta forma, foi o modelo escolhido para realização da análise por apresentar boa convergência, não necessitando de uma malha super refinada, ademais, demanda menor tempo e custo



computacional. De acordo com Lanfrit (2005), esse modelo apresenta erro de 2-5% comparado a testes práticos em túnel de vento, configurando uma excelente escolha.

Para evitar os modelos tradicionais das *wall-functions*, foram utilizados, juntamente com o modelo k-e *realizable*, a função *non-equilibrium wall functions* (NWF's), a qual é mais sensível aos diferentes efeitos dos gradientes de pressão, sendo de grande importância para o cálculo da simulação em um caso de aerodinâmica veicular (LANFRIT, 2005).

### 3.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Em qualquer problema envolvendo simulação computacional, uma das etapas mais fundamentais é definir corretamente as condições de contorno, para que a solução do problema seja calculada de forma precisa, portanto, definiu-se as seguintes condições para o problema analisado:

- *Inlet velocity*: Esta foi definida como a velocidade de entrada do ar no domínio fluido, com valor de 15 m/s, aproximadamente a velocidade máxima a qual o veículo alcança.
- *Outlet*: Representa o valor da pressão atmosférica na saída do domínio fluido, definido com o valor 0 Pa (*Gauge Pressure*).
- *Symmetry*: Definiu-se como a face que está colada no carro, pois este é simétrico.
- *Wall*: Foi selecionado como o topo do domínio fluido e a face paralela ao *Symmetry*, assim como toda a superfície do carro, com a característica de *No-slip wall*.
- *Moving wall*: Definiu-se o *ground* (chão) com esta característica, com a velocidade de 15 m/s, na mesma direção e sentido da entrada de ar, o que se aproxima mais da realidade, como se o carro estivesse em movimento, sendo assim, também evita o surgimento de arrasto indesejado no solo.



- *Interior:* Todo o interior do domínio fluido, exceto as partes constituintes do carro, foi definido como região de fluxo de ar.

Todas as simulações foram desenvolvidas sob as condições *steady-state*, com a opção de *pressure-based coupled* ativada, o qual pode reduzir em até 5 vezes o tempo total de convergência, como mostrado por Keating (2011), pois este modo resolve as equações de momento e continuidade de forma acoplada.

O arrasto aerodinâmico do veículo pode ser calculado pela fórmula abaixo:

$$F_{arrasto} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_a \cdot A \cdot v^2 \quad (1)$$

em que:

$F_{arrasto}$  = Força de arrasto;

$\rho$  = Densidade do fluido;

$C_a$  = Coeficiente aerodinâmico;

$A$  = Área frontal projetada;

$v$  = velocidade relativa entre o carro e o fluido;

Foram encontrados os seguintes valores de área frontal projetada do veículo, retirados do próprio *software*:

RC: 89586

Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-mecanica/baja-sae>



Figura 11 - Comparação área frontal

	<i>Firewall Reduzido</i>	<i>Firewall Completo</i>
<b>Área Frontal (m<sup>2</sup>)</b>	<b>1,08</b>	<b>1,32</b>

Fonte: Autoria própria.

Alguns valores são conhecidos, como velocidade, densidade e área frontal (que foi fornecida pelo próprio ANSYS), já o coeficiente e a força de arrasto são determinados após a simulação numérica.

Para a inicializar as iterações, o método de *Hybrid Initialization* foi escolhido, realizando 10 cálculos rápidos com as equações do modelo laminar, preenchendo o modelo com distribuições realísticas de pressão e velocidade, o que ajuda a melhorar a robustez da convergência na solução final, reduzindo em até metade o número de iterações, caso comparado ao método *standard initialization* (KEATING, 2011).

Ao total, foram realizadas 500 iterações para o cálculo da solução, 100 com as equações de turbulência com a opção de *First order*, e 400 com as equações de na opção *Second Order*, o que fornece uma maior precisão no resultado (ANSYS FLUENT THEORY GUIDE, 2013).

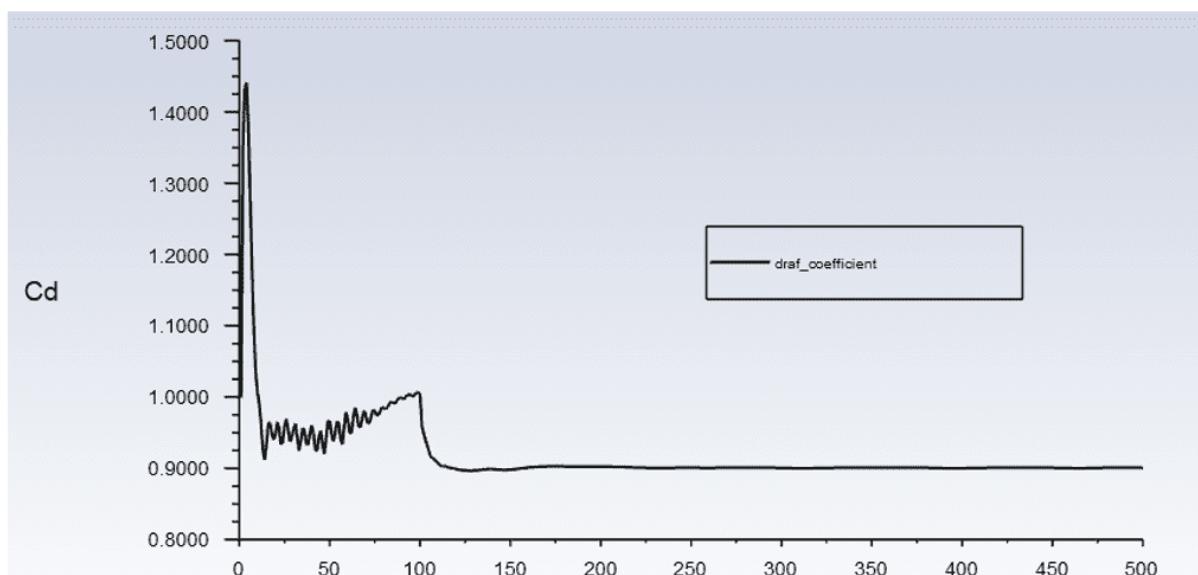
### 3.5 RESULTADOS

Finalizadas as etapas descritas acima, partiu-se para a análise dos resultados no *FLUENT*, o qual nos oferece ótimas ferramentas para interpretá-los, contando com diversos recursos gráficos a partir de contornos bem intuitivos e uma grande quantidade de resultados a disposição.



Abaixo, seguem os gráficos de convergência para ambos os modelos, os quais, a partir da iteração 200, mostraram um equilíbrio consistente, apresentando um comportamento dentro do esperado:

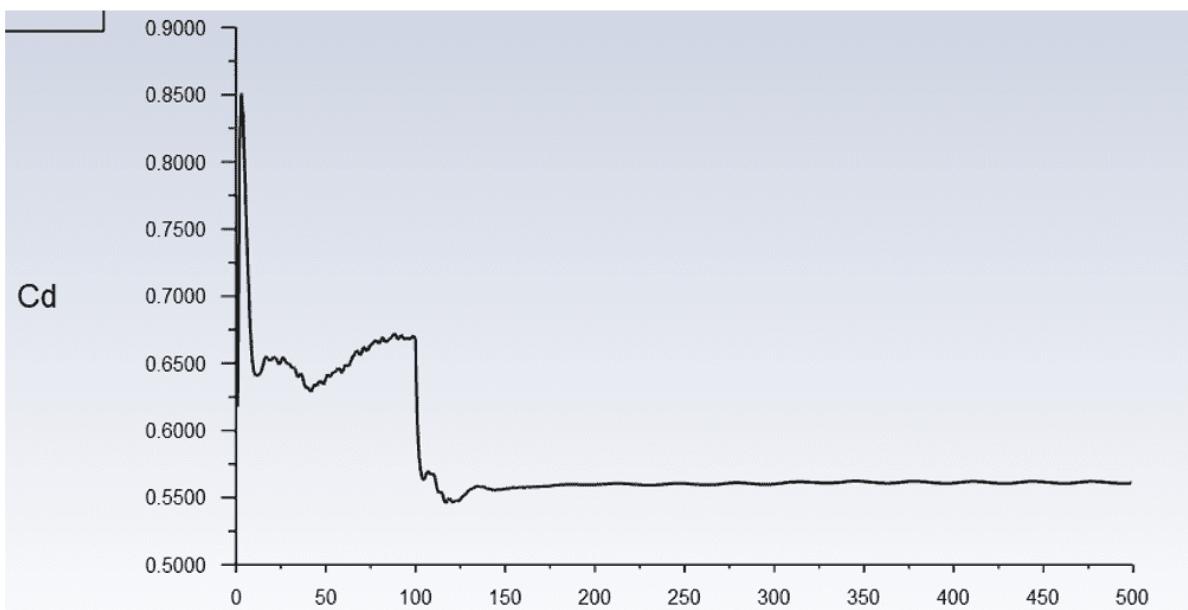
Figura 12 - Coeficiente de arrasto (eixo vertical) e número de iterações (eixo horizontal) para o modelo com corta-fogo completa.



Fonte: Autoria própria.



Figura 13 - Coeficiente de arrasto (eixo vertical) e número de iterações (eixo horizontal) para o modelo com corta-fogo reduzida.



Fonte: Autoria própria.

Em ambos os gráficos, é perceptível a queda no valor a partir da centésima iteração, pela mudança da ordem das equações, o que nos permite uma maior acurácia nos valores, pois este tipo de mudança é adequado para malha com elementos tetraédricos, especialmente em locais de região de fluxos complexos do ar (ANSYS FLUENT USER'S GUIDE, 2013).

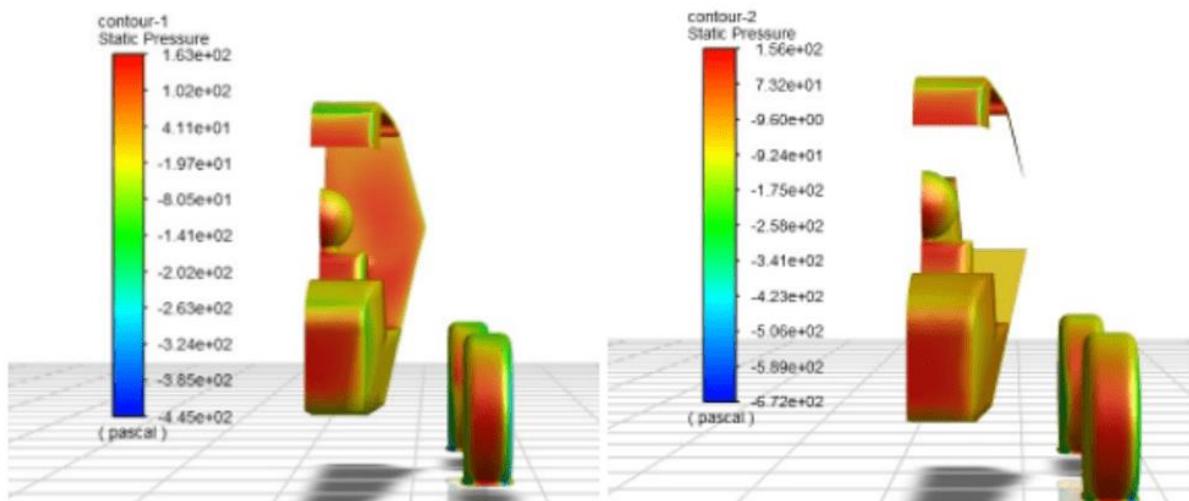
Antes de comparar os valores, vale analisar os campos de pressão e linhas de velocidade do fluido que se formaram ao redor de ambos os modelos, e, a partir disso, é possível verificar os locais de recirculação do ar e de maior queda de pressão na região do mesmo.

Abaixo, são comparados os gradientes de pressão, a partir da geometria de *firewall* reduzido e de *firewall* completo. Pela análise dos valores, a com menor área frontal conta com um menor gradiente de pressão, com isso, sendo menos suscetível a formação de vórtices de maior intensidade, o que gera uma menor perda de energia de separação da camada limite, justificando o menor coeficiente de arrasto.

RC: 89586



Figura 14 - À esquerda, vista frontal do gradiente de pressão com *firewall* completo, e à direita, vista frontal do gradiente de pressão com *firewall* reduzido.

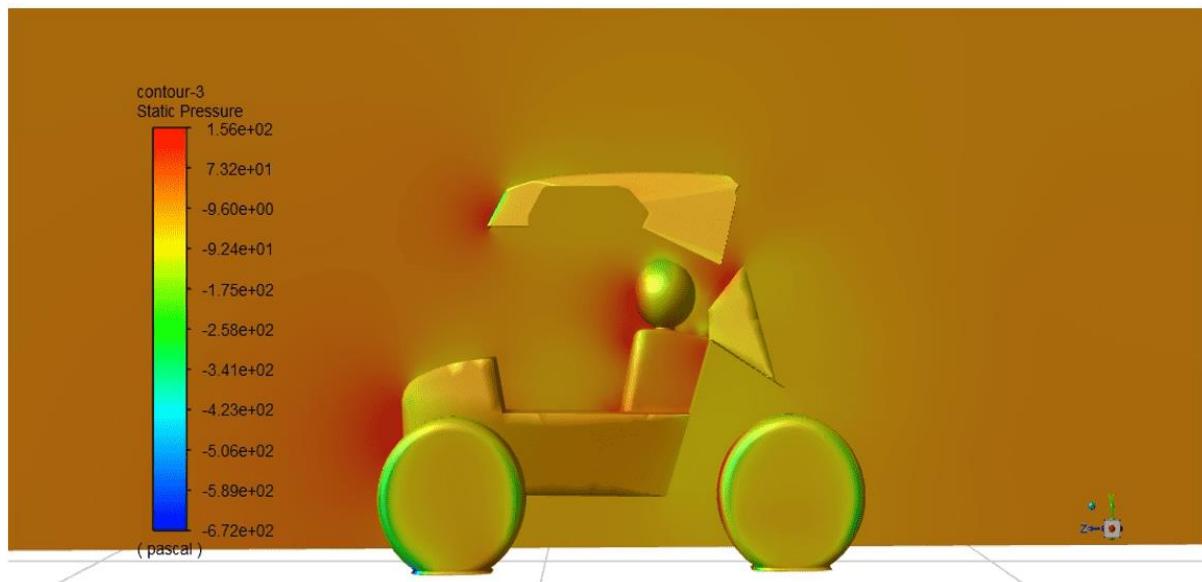


Fonte: Autoria própria.

Como pode-se perceber nas figuras, há uma maior região avermelhada no modelo com a parede corta-fogo completa, além do valor numérico mostrado na escala em cores, exemplificando a afirmação supracitada. As imagens laterais das zonas de pressão são mostradas abaixo, mostrando ainda mais a diferença de um modelo para o outro.

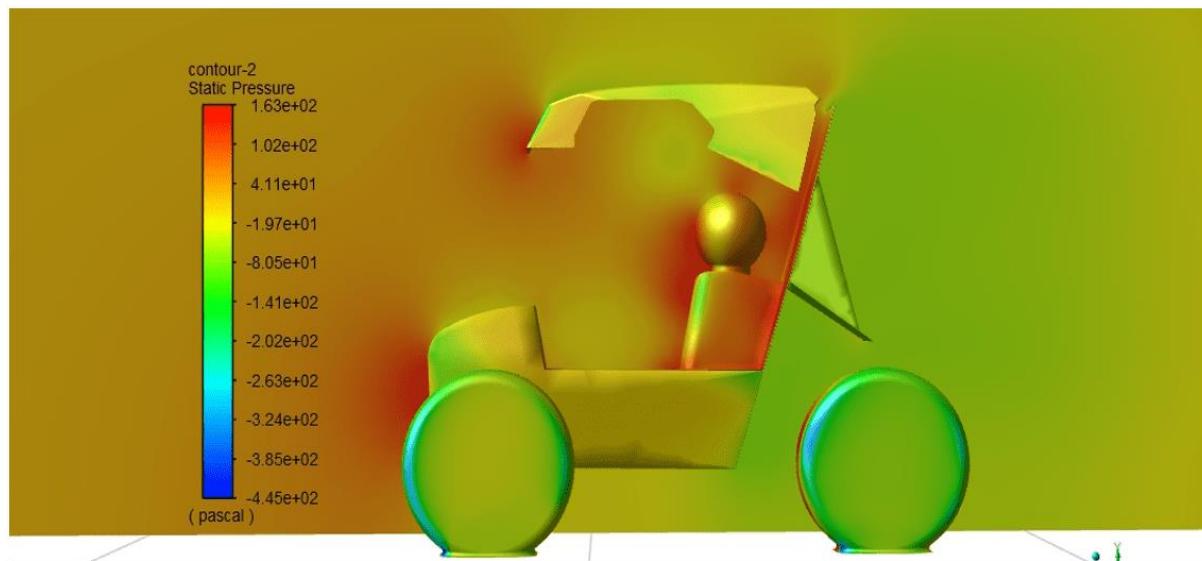


Figura 15 - Vista lateral gradiente de pressão firewall reduzido.



Fonte: Autoria própria.

Figura 16 - Vista lateral gradiente de pressão *firewall* completo.



Fonte: Autoria própria.

Analisando as figuras 15 e 16, é possível perceber um maior gradiente de pressão na segunda, o qual gera uma perda de energia mais elevada quando o ar passa para a parte de trás do veículo, consequentemente, ocorre uma maior queda de pressão

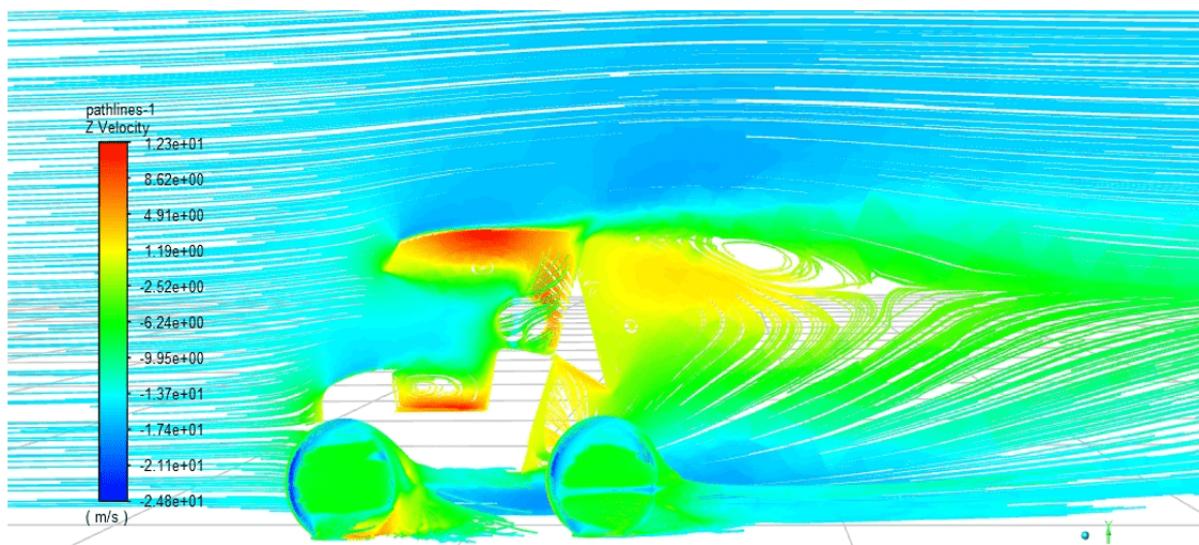
RC: 89586



nesta região, representada pela área mais esverdeada da segunda figura. Isso se deve ao fato da segunda geometria limitar em maior quantidade o fluxo de ar na região entre o piloto e o tanque de combustível.

O segundo parâmetro a ser analisado são as linhas de velocidade do fluido e seu comportamento ao redor do veículo. Como visto anteriormente, o *firewall* completo apresenta maiores gradientes de pressão em relação ao reduzido, consequentemente, gera uma maior queda de pressão na região traseira do carro, e com isso, os vórtices formados apresentam maior intensidade e maior área de atuação, como mostrado na figura abaixo:

Figura 17 - Fluxo de ar ao redor do modelo com *firewall* completo.



Fonte: Autoria própria.

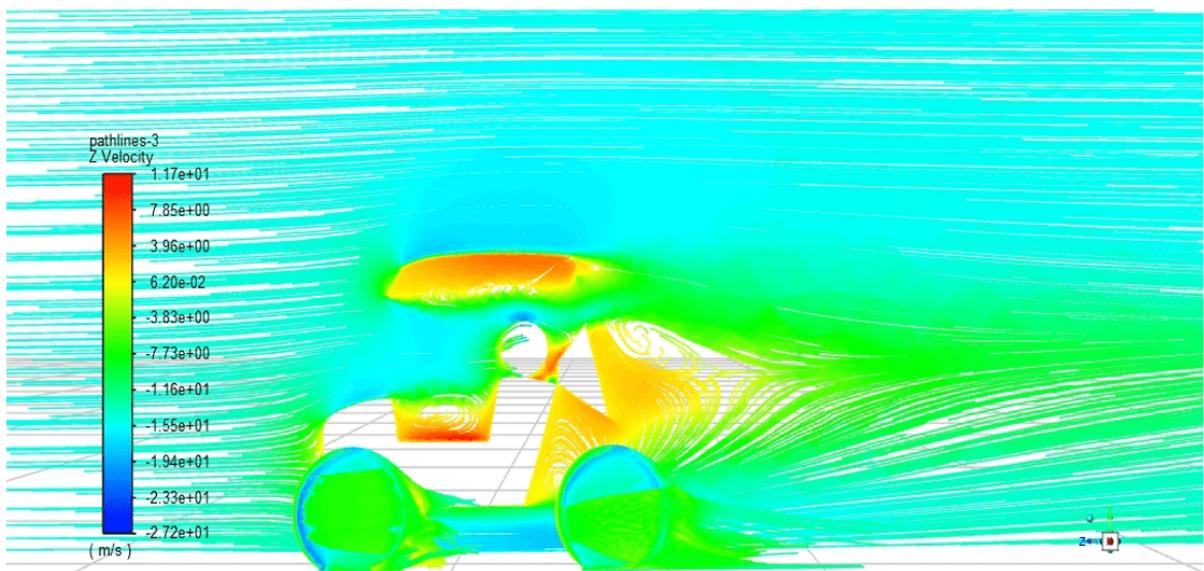
Além disso, a região de passagem de ar entre o teto e o *firewall* no modelo acima é menor, portanto, o fluido ganha uma maior velocidade neste local, o que influencia no aumento da região de esteira do protótipo.

Em ambos os casos, há regiões de refluxo de ar logo atrás do local de posicionamento do tanque de combustível e do habitáculo do motor, como mostrado na figura a seguir com o modelo com área frontal menor.

RC: 89586



Figura 18 - Fluxo de ar ao redor do modelo com *firewall* reduzido.



Fonte: Autoria própria.

Após o entendimento dos contornos e dados acima, é fundamental analisar os resultados numéricos dos coeficientes e das forças de arrasto, que serão demonstrados a seguir por intermédio de tabelas e gráficos.

Primeiramente, será feita uma comparação dos valores dos coeficientes de arrasto encontrados para ambos os casos, como exibido na tabela abaixo:

RC: 89586

Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-mecanica/baja-sae>



Figura 19 - Coeficiente de arrasto e comparação de resultados.

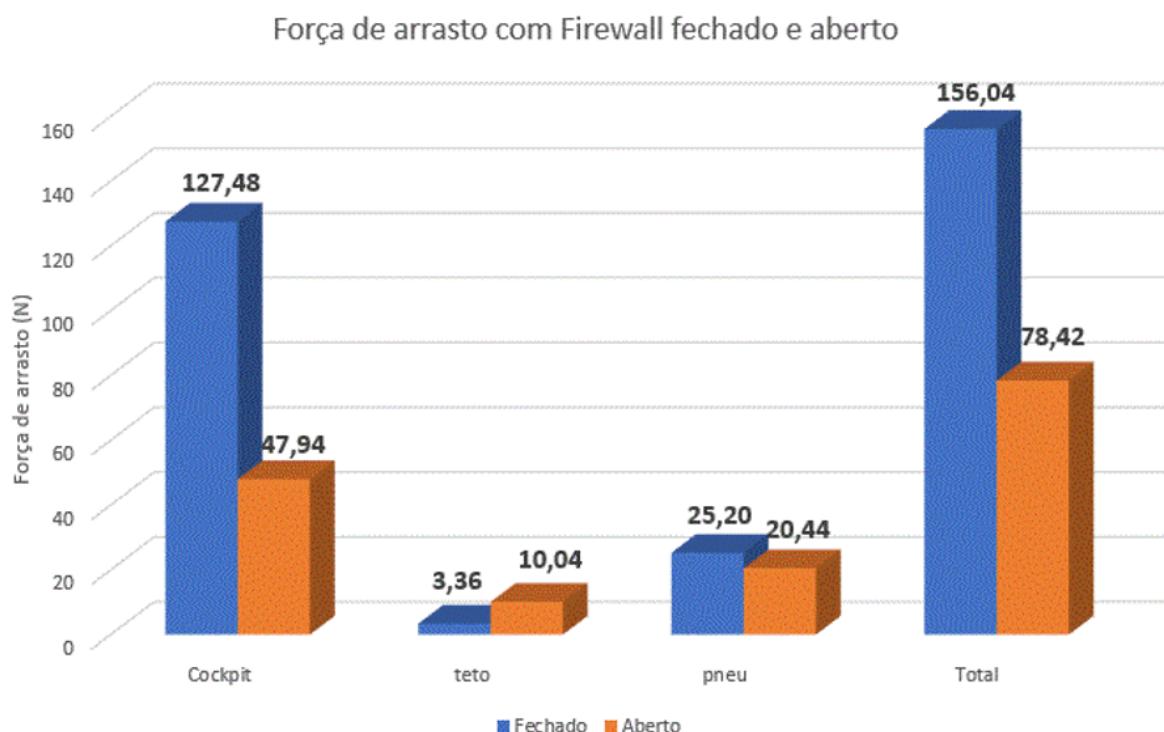
	Coeficiente de arrasto	Redução
<b><i>Firewall</i> completo</b>	0,901	<b>37,7%</b>
<b><i>Firewall</i> reduzido</b>	0,561	

Fonte: Autoria própria.

Através da leitura da tabela, fica evidente a considerável influência que a parede corta-fogo exerce no coeficiente de arrasto do veículo, com uma diferença de 37,7% entre as diferentes geometrias. Essa, pode ser entendida com base nos estudos teóricos já mencionados neste texto e pela análise dos contornos das figuras representadas pelos contornos de pressão e velocidade.

O solver também nos fornece como resultado a influência de cada componente do veículo no coeficiente de arrasto do carro. Seguindo a análise proposta por Jawad *et al.* (2001), gerou-se um gráfico comparando cada um dos componentes e avaliando a parcela de atuação desses na força de arrasto total. O *firewall* faz parte do *cockpit*, e, ao comparar este componente, fica claro a tamanha diferença gerada pela geometria com ele completo, gerando 163% a mais de força de resistência que o modelo reduzido. Ao total, a geometria com *firewall* completo apresenta o dobro da força de arrasto se comparado ao modelo reduzido, o que pode gerar um aumento no consumo de combustível e uma maior limitação na velocidade máxima do veículo. O gráfico de barras abaixo mostra os valores encontrados:

Figura 20 - Influência de cada componente dos 2 modelos na força de arrasto do veículo.



Fonte: Autoria própria.

### 3.6 TESTE EM DINAMÔMETRO

Com o intuito de verificar uma possível diferença de velocidade máxima entre as duas geometrias analisadas, foi realizado um teste em dinamômetro de rolos com o veículo, objetivando encontrar sua curva de potência disponível nas rodas e, a partir dela, encontrar a velocidade máxima do carro para as diferentes geometrias.



Figura 21 - Teste no dinamômetro inercial:



Fonte: Autoria própria.

A análise de dados do dinamômetro foi realizada no software *SportDyno.v38*, e posteriormente, os dados foram exportados para uma planilha eletrônica, visando gerar as curvas de potência disponível e resistivas do veículo.

Tem-se que, a fórmula de potência disponível na velocidade máxima é a seguinte, adaptada de Nicolazzi *et al.* (2012):

RC: 89586

Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-mecanica/baja-sae>



$$P_{disponível} = P_{arrasto} + P_{rolamento} \quad (2)$$

$$P_{disponível} = \frac{\rho \cdot A \cdot C_a \cdot v^3}{2} + W \cdot C_r \cdot v \quad (3)$$

em que:

$P_{disponível}$  = Potência disponível nas rodas do veículo;

$P_{arrasto}$  = Potência perdida pelo arrasto;

$P_{rolamento}$  = Potência perdida pela resistência ao rolamento dos pneus;

$W$  = Peso do Veículo;

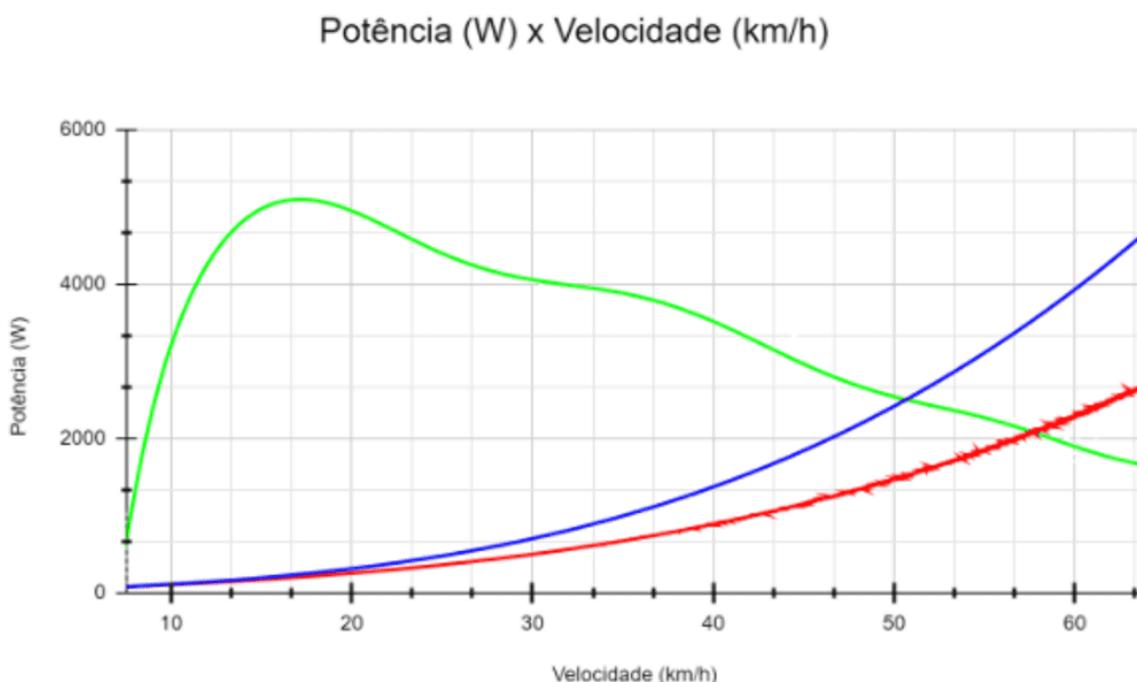
$C_r$  = Coeficiente de Resistência ao Rolamento;

O mesmo peso foi considerado para ambos os modelos. Ademais, os parâmetros da equação (3) não citados acima são os mesmos da equação (1). A resistência inercial já está incluída nos valores da potência disponível no dinamômetro. Para o valor do coeficiente de resistência ao rolamento, utilizou-se o indicado por Nicolazzi *et al.* (2012) para asfalto liso, sendo este 0,015.

Sendo assim, foi gerado o gráfico de potência por velocidade de saída, com a curva de potência disponível e a curva de potências resistivas para as duas geometrias, o qual obteve-se o seguinte resultado:



Figura 22 - Curvas de potência representadas de acordo com a velocidade do veículo.



Fonte: Autoria própria.

A curva verde representa a potência disponível do veículo, a vermelha a potência resistiva do modelo com *firewall* reduzido e a azul do completo.

Interpretando o gráfico, percebe-se um descolamento das potências resistivas a partir de 30 km/h, isso pode ser bem justificado pois a força de arrasto aerodinâmico é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade, portanto, com o aumento dessa, sua influência se torna mais presente.

A partir dos pontos de interseção entre as curvas do gráfico, é possível encontrar a velocidade máxima do protótipo no asfalto, como é explicado na equação (3), pois são os pontos em que as potências se igualam. Os valores encontrados foram aproximadamente 51,2 km/h para a parede corta-fogo completa e 57,8 km/h para o modelo otimizado, um aumento de 11,5%.



## 4. CONCLUSÃO

Com esses resultados, é perceptível a importância do estudo de arrasto aerodinâmico do veículo para a evolução da equipe, visto que as diferentes geometrias apresentaram uma considerável variação nos valores na força de resistência do ar.

O simples fato de reduzir a parede corta-fogo representou uma redução da força de arrasto pela metade, um resultado consistente que interfere de forma relevante na velocidade final do veículo.

Como sugestão de trabalhos futuros, é válido realizar o teste prático do *coast down*, visando adquirir experimentalmente o coeficiente de arrasto do veículo juntamente com o coeficiente de resistência ao rolamento. Além disso, mensurar o efeito no consumo de combustível a partir da alteração dos valores de resistência aerodinâmica do protótipo é de suma relevância, sendo que a redução desse pode representar um diferencial na prova de Enduro da competição Baja SAE, além de reduzir o impacto ambiental.

## REFERÊNCIAS

ANSYS 2020 R2. Ansys SpaceClaim. Ansys Meshing. Ansys Fluent.

ABO-SERIE, Essam; AHMAD, Nor Elyana; GAYLARD, Adrian. **“Mesh optimization for ground vehicles aerodynamics.”** Mechanical and Automotive Engineering Department, Faculty of Engineering and Computing, Coventry University, UK. 2010.

BLOG. **ESSS.** Disponível em: <https://www.esss.co/blog/fluidodinamica-computacional-o-que-e/>. 2016. Acesso em: 14 fev. 2021.

CASTEJON, Danilo V. **“Métodos de redução do arrasto e seus impactos sobre a estabilidade veicular”.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) -

RC: 89586

Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-mecanica/baja-sae>



Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2011.

GÓMEZ, Sergio; LÁZARO, Jessica; VILLEGAS, Helio. **“Aerodynamics Analysis for optimization the design of a baja SAE chassis.”** IMECE2018, Pittsburgh, USA. 2018.

GUIA. **Ansys Fluent Theory Guide 15.0.** Disponível em:  
<http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/notasmodelosgrad/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide%2015.pdf>. ANSYS Inc, USA. 2013. Acesso em 8 mar. 2021.

GUIA. **Ansys Fluent User´s Guide.** Disponível em:  
<http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/notasmodelosgrad/ANSYS%20Fluent%20Users%20Guide.pdf>. ANSYS Inc, USA. 2013. Acesso em: 5 mar. 2021.

GUIA. **Ansys Meshing User´s Guide 13.0.** ANSYS Inc, USA. 2010.

HUMINIC, Angel; HUMINIC, Gabriela. **“On the Aerodynamics of Racing Cars.”** SAE Technical Paper 2008-01-0099. 2008. DOI:10.4271/2008-01-0099.

JAWAD, Badih A.; LONGNECKER, Maria M.; TIMMER, Johanna S. **“The Impact of Aerodynamics on Vehicle Performance in a Formula SAE Racing Style Vehicle”.** SAE Technical Paper 2001-01-2744. 2001. DOI: 10.4271/2001-01-2744.

KEATING, Mark. **“Accelerating CFD solutions”.** ANSYS advantage, v. 5, p. 49. 2011.

LANFRIT, Marco. **“Best practice guidelines for handling Automotive External Aerodynamics with FLUENT”.** Fluent Deutschland GmbH. 2005.

MA, Ji; CHEN, Xiaoyu; DUAN, Yupeng; ZHANG, Yunqing. **“FSAE Race Car Dynamics and Trajectory Optimization Considering Aerodynamic Effects.”** SAE Technical Paper 2018-01-0821. 2018. DOI:10.4271/2018-01-0821.



MULTIDISCIPLINARY SCIENTIFIC JOURNAL

**NÚCLEO DO  
CONHECIMENTO**

REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR NÚCLEO DO

CONHECIMENTO ISSN: 2448-0959

<https://www.nucleodoconhecimento.com.br>

NICOLAZZI, Lauro C.; ROSA, Edison; LEAL, Longuinho C. M. “**Uma introdução à modelagem quase-estática de veículos automotores**”. Florianópolis: Publicação interna do GRANTE – Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, p. 12, 54, 138. Disponível em: [http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC078/Bibliografia/2012\\_Uma\\_introducao\\_a\\_modelagem\\_quase\\_estatica\\_de\\_automoveis\\_NICOLAZZI\\_APOSTILA.pdf](http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC078/Bibliografia/2012_Uma_introducao_a_modelagem_quase_estatica_de_automoveis_NICOLAZZI_APOSTILA.pdf). 2012. Acesso em: 10 de mar. 2021.

SAE STANDARDS J2071. “**Aerodynamics testing of road vehicles - open throat wind tunnel adjustment**.” SAE International 1994-06-01. 1994.

SOLIDWORKS 2020. *Student Edition*.

SPORTDYN v.38.

Enviado: Março, 2021.

Aprovado: Junho, 2021.

RC: 89586

Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-mecanica/baja-sae>