

DOUGLAS MALVAR RIBAS

PROJETO AERODINÂMICO DE UM VEÍCULO PARA COMPETIÇÕES
DE RALI *CROSS COUNTRY*

Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Mestre Profissional
em Engenharia Automotiva

São Paulo
2008

DOUGLAS MALVAR RIBAS

PROJETO AERODINÂMICO DE UM VEÍCULO PARA COMPETIÇÕES
DE RALI *CROSS COUNTRY*

Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Mestre Profissional
em Engenharia Automotiva

Área de concentração:
Engenharia Automotiva

Orientador: Prof. Dr.
Fábio Saltara

São Paulo
2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Ribas, Douglas Malvar

Projeto aerodinâmico de um veículo para competições de rali cross country / D.M. Ribas. -- São Paulo, 2008.

132p.

Trabalho de conclusão de curso (Mestrado Profissional em Engenharia Automotiva) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

**1. Engenharia automotiva 2. Aerodinâmica 3. Simulação
4. Dinâmica dos fluidos I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica II.t.**

Pela paciência, à minha esposa,
Mariana, que acabou se tornando uma
conhecedora de aerodinâmica veicular
e mecânica dos fluidos computacional

AGRADECIMENTOS

Ao professor Fábio Saltara, pelo crédito que deu ao trabalho, pela liberdade em sua condução e pela atenção despendida sempre que necessário.

Ao Arnaud, pela disponibilização de material e ajuda na coleta de dados práticos.

Ao Ivan Korkischko, pelo fornecimento de informações importantes que permitiram a evolução do trabalho.

Aos amigos e demais pessoas que acompanharam o trabalho e direta ou indiretamente colaboraram com sua execução.

RESUMO

Este trabalho trata do projeto aerodinâmico de um veículo para competições de rali *cross country*. Ao contrário dos veículos encontrados nessa categoria no Brasil, que são em geral adaptações de plataformas comerciais, o veículo em questão tem um projeto totalmente específico, dedicado à característica da competição, com isso parte das soluções aerodinâmicas adotadas fogem às regras comumente utilizadas nos veículos comerciais. Tratando-se ainda de um veículo *off-road*, várias limitações foram encontradas na aplicação de soluções utilizadas em veículos de pista de alto desempenho, tornando ainda mais complicada a obtenção de bons resultados. Um desenho inicial foi criado atendendo diferentes sugestões teóricas para um bom projeto aerodinâmico, sempre respeitando as premissas impostas pelo projeto mecânico, e para avaliar a eficiência dessas soluções utilizou-se o recurso de simulações computacionais CFD. Após a revisão de alguns trabalhos e a realização de diversas simulações, encontrou-se um ponto ideal de modelagem, o que trouxe certo nível de confiança aos valores obtidos. Com essa modelagem estabelecida, inúmeras variações do desenho da carroceria do veículo foram simuladas, até que se obteve a melhor relação entre os valores dos coeficientes de arrasto e sustentação. O resultado obtido foi um desenho de carroceria otimizado que apresentou significativo ganho nos valores dos coeficientes quando comparado com o desenho inicial, além de apresentar nítida superioridade sobre os veículos que atualmente competem na categoria proposta. Concluiu-se que pela característica do veículo alguns pontos específicos de sua carroceria possuem forte influência no seu desempenho aerodinâmico, sendo assim especial atenção teve que ser dada a esses pontos. A ferramenta CFD se mostrou bastante eficiente sob ponto de vista qualitativo, provendo resultados muito sensatos e satisfatórios dentro da proposta do trabalho.

Palavras-chave: Engenharia automotiva. Aerodinâmica. Simulação. Dinâmica dos fluidos.

ABSTRACT

This study concerns about the aerodynamic project of a vehicle for competition in cross country rally. Opposed to the vehicles found in this category in Brazil, that are in general adaptations from commercial platforms, this vehicle has a totally specific project, dedicated to the category's characteristic, then, part of the aerodynamic solutions adopted diverges from the rules usually followed by the projects of commercial vehicles. Furthermore, dealing about an off-road vehicle, several limitations were found in applying solutions used in high performance track vehicles, what makes even harder to obtain good results. An initial drawing was created attending to different theoretical suggestions for a good aerodynamic project, always respecting the premises imposed by the mechanical project, and to evaluate the efficiency of these solutions it was used the method of CFD simulations. After reviewing some studies and performing several simulations, an ideal template was achieved, which brought certain confidence level to the values found. With this template defined, several variations of the vehicle's body drawing were simulated, until the best relation between the drag and lift coefficients was obtained. The result achieved was an optimized body drawing which presented expressive advantage in the coefficients compared with the initial drawing, beyond presenting clear superiority over the vehicles that compete nowadays in the referred category. It was concluded that, because of the vehicle's characteristic, some specific spots in its body present strong influence on its aerodynamic performance, therefore special attention had to be given to these spots. The CFD tool has been shown to be very efficient under qualitative point of view, providing very sensible and satisfactory results within the purpose of the study.

Keywords: Automotive engineering. Aerodynamics. Simulation. Fluid dynamics.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos: geral e específicos	2
1.2 Justificativa.....	4
1.3 Comparação por valores estimados.....	8
2 REVISÃO TEÓRICA.....	13
2.1 Mecânica de fluidos e aerodinâmica veicular.....	13
2.1.1 Atrito viscoso	13
2.1.2 Distribuição de pressão	19
2.2 Método numérico e ferramentas de simulação	26
2.2.1 Modelagem da turbulência	27
3 OBJETO DE ESTUDO	31
3.1 Premissas de projeto	31
4 PROJETO	36
4.1 Soluções exploradas.....	36
4.1.1 Área frontal.....	37
4.1.2 Dianteira	38
4.1.3 Pára-brisas e coluna A	40
4.1.4 Teto	41
4.1.5 Traseira	43
4.1.6 Laterais.....	47
4.1.7 Assoalho.....	49
4.1.8 Rodas e caixas de rodas.....	50

4.1.9 Anexos.....	53
4.2 Desenho da carroceria.....	54
4.2.1 Área frontal.....	55
4.2.2 Dianteira.....	59
4.2.3 Pára-brisas e colunas A.....	64
4.2.4 Teto.....	69
4.2.5 Traseira.....	70
4.2.6 Laterais.....	80
4.2.7 Assoalho.....	82
4.2.8 Rodas e caixas de rodas.....	82
4.2.9 Anexos.....	86
4.2.10 Desenho obtido.....	87
4.3 Geração de malhas e condições de contorno.....	89
4.3.1 Definição e geração das malhas.....	89
4.3.2 Condições de contorno.....	99
4.4 Simulação.....	101
5 RESULTADOS.....	103
6 CONCLUSÃO E SUGESTÃO PARA TRABALHOS POSTERIORES	127
REFERÊNCIAS.....	132

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho trata do projeto aerodinâmico completo de um veículo, um protótipo dedicado a competições *off-road*, mais especificamente na categoria de rali *cross country*. Como resultado espera-se obter as análises aerodinâmicas do referido veículo, seu desenho de carroceria otimizado por consequência das análises e a apresentação ao final dos números obtidos nas diversas variáveis trabalhadas.

Analisando o panorama da categoria de rali *cross country* hoje no Brasil observa-se que a grande maioria dos veículos considerados de ponta é baseada em plataformas comerciais, em geral pouco apropriadas à necessidade da competição. Pela necessidade de uma plataforma robusta, em geral equipes optam pela utilização de veículos utilitários, caminhonetes de porte leve. Essas são projetadas para trabalhar com carga e sob condições severas, muito providencial à característica do rali. Porém essa categoria de veículos, obviamente pouco orientada a aplicações esportivas, pouco se preocupa com características fundamentais em aplicações de competição, dentre elas eficiência aerodinâmica.

Mesmo sem fazer uso de teorias de aerodinâmica veicular já pode se observar que existem diversos fatores que contribuem para a eficiência de um veículo, e da mesma forma observa-se uma série de variáveis de saída para as quais se almeja um determinado resultado. Porém diversas dessas variáveis de saída, resultados que se pretende obter, podem requerer diferentes soluções de projeto contraditórias entre si, e se torna necessário optar qual rumo seguir, qual objetivo terá que ser abandonado em detrimento de outros. Expandindo esse conceito para fora do ambiente aerodinâmico, é possível também enumerar uma série de outros pontos, de diversos outros sistemas do veículo, que se tornam fatores limitantes para a aplicação de soluções aerodinâmicas eficientes, nos colocando novamente na posição de optar entre soluções, mesmo que de sistemas diferentes. Nesse mundo de inúmeras variáveis, deve um bom projeto ter muito bem definidos os objetivos que se deseja alcançar, para que se possa selecionar quais

são as variáveis de entrada, os fatores que serão trabalhados e quais serão descartados.

No caso desse estudo em específico, para se obter um bom resultado, um veículo com superioridade de desempenho, é preciso descobrir os pontos do projeto do veículo mais relevantes dentro da necessidade da aplicação; verificar dentre esses pontos aqueles que são pouco relevados nas plataformas comerciais e aproveitá-los de maneira adequada, e, da mesma forma, abrir mão dos pontos limitantes que nas plataformas comerciais são fundamentais, mas que em uma aplicação de competição podem ser deixados de lado.

1.1 Objetivos: geral e específicos

O objetivo geral desse trabalho é realizar um estudo sobre aerodinâmica veicular, descobrindo quais são os pontos mais significativos e como trabalhá-los em um veículo de aplicação específica para competição *off-road*. Espera-se obter um projeto aerodinâmico do referido veículo que proporcione alta eficiência nos diversos quesitos aerodinâmicos, mas sem perder o compromisso com a aplicação *off-road*. Dentre esses quesitos pode-se dizer que a principal necessidade está em conseguir valores baixos para os coeficientes de arrasto e de sustentação, seguida, em prioridade, de obter boa captação de ar para alimentação e arrefecimento dos diversos sistemas do veículo. Não é intenção do trabalho determinar essas captções de ar mas, ao final da análise do desenho de carroceria, ter informações suficientes para sugerir opções a serem analisadas.

Para se conseguir esses resultados o projeto passa por diversas fases de aquisição de conhecimento e tomadas de decisões, as quais podem ser dispostas em alguns blocos de estudo e trabalho que definem os objetivos específicos:

Teorias envolvidas com aerodinâmica veicular: estudo e conhecimento dos princípios básicos de mecânica de fluidos, verificação de suas aplicações em

aerodinâmica veicular. Conhecimento de modelos matemáticos e métodos numéricos utilizados para a obtenção de resultados.

Premissas do projeto: ter definidas as premissas do projeto do veículo como um todo. Saber de uma forma geral qual a configuração adotada, quais os tipos de subsistemas, limitações, enfim, que tipo de veículo se espera projetar. Essas são características básicas iniciais do projeto que ditam o início da concepção aerodinâmica.

Soluções exploradas: conhecendo os conceitos básicos de aerodinâmica e tendo claras as premissas do projeto do veículo como um todo, verifica-se quais são os pontos principais que poderão ser trabalhados no projeto aerodinâmico desse veículo específico e como proceder. Quais são os fatores mais significativos, quais são os principais conceitos aerodinâmicos a serem explorados, como trabalhar as necessidades, tudo dentro das limitações impostas pela característica desse projeto.

Desenho da carroceria: com a concepção mecânica do veículo já pré-definida e com o conhecimento das necessidades aerodinâmicas, já será possível desenvolver um esboço da carroceria do veículo.

Ferramentas de simulação: para permitir os cálculos e a obtenção dos resultados, conhecer e estudar as ferramentas de software disponíveis para simulação de projetos aerodinâmicos dessa proporção. Nesse ponto é possível verificar se o esboço da carroceria concebido conceitualmente atende aos objetivos almejados. Modificações nas formas, redesenhando pontos da carroceria, vão ser feitas a fim de aperfeiçoar os resultados, até mesmo modificando algumas premissas originais que por ventura venham a se mostrar como fatores impeditivos para a obtenção de valores mais significativos. Ao final das análises e modificações se espera provar por números que o projeto alcançou o objetivo geral descrito acima, demonstrando também com esses números nítida superioridade teórica sobre os veículos da categoria.

1.2 Justificativa

Um consumidor que busca um veículo para sua utilização, particular ou comercial, se baseia em alguns fatores fundamentais para definição de sua compra. Fatores esses como segurança, conforto, desempenho, consumo de combustível, facilidade de manutenção, design, robustez, durabilidade e, entre muitos outros, um dos mais importantes: preço. Logicamente, a indústria automotiva conhece muito bem as características dos seus clientes, a necessidade do consumidor, sua exigência, a aplicação que vê para o veículo que busca e, entre outras coisas, sua capacidade financeira. Com isso a indústria consegue ponderar esses fatores e criar diversos modelos de veículos que vão atender a todas essas diferentes características de seus clientes. Conforme citado por Puhn (1981), não existe um veículo perfeito, que seja adequado a qualquer tipo de aplicação. Ganha-se de um lado, perde-se de outro. Priorizando os fatores errados é muito possível que sua compra lhe traga resultados insatisfatórios. É conhecendo bem as necessidades e os fatores de maior influência sobre elas é que se consegue ponderar entre eles e obter o melhor resultado possível para a aplicação desejada.

O trabalho em questão se trata de um estudo sobre aerodinâmica, mas a discussão versa sobre diversos outros pontos do veículo e até então não citou-se nada diretamente sobre o tema principal. Por quê? É muito difícil falar sobre um sistema individualmente sem analisar os outros sistemas a ele relacionados. Pode-se a primeira vista não perceber, mas a grande maioria dos fatores citados acima está de certa forma relacionada com características aerodinâmicas do veículo. Sem se preocupar nesse momento em justificar as teorias, alguns exemplos da relação entre esses fatores e o tema aerodinâmica podem ser descritos: um veículo com balanceamento do coeficiente de sustentação muito discrepante entre os eixos dianteiro e traseiro, em altas velocidades, pode ter sérios problemas de dirigibilidade, comprometendo a segurança dos ocupantes. Se a carroceria possui linhas pouco adequadas, o escoamento do ar pode provocar grandes ruídos no interior do veículo à medida que o veículo atinge velocidades mais elevadas, o que gera grande desconforto para os ocupantes. Linhas pouco adequadas também podem gerar

grande arrasto aerodinâmico, o que prejudica o desempenho do veículo em velocidades mais altas. Por consequência também desse elevado coeficiente de arrasto o consumo de combustível em velocidades altas será seriamente comprometido. Design também é um fator complicado, muitas vezes uma solução aerodinâmica eficiente não é agradável aos olhos do consumidor, logo por questões comerciais não é adotada. Enfim, é possível seguir fazendo análises e obtendo relações diretas e indiretas da maioria dos fatores ponderados em um veículo e seu projeto aerodinâmico, inclusive, pra não deixar de citar, preço: uma solução aerodinâmica eficiente pode não ser atrativa com relação a custos.

Relembrando o objetivo geral desse trabalho, que é desenvolver um projeto aerodinâmico eficiente para um veículo *off-road* de competição, deve-se observar: quais dentre os inúmeros fatores são realmente importantes e quais podem ser ignorados? Pensando em um ambiente de competição, desempenho é fundamental. Segurança é algo que também não pode de maneira alguma ser deixado de lado. Porém será que design é uma prioridade? Seria conforto algo muito relevante? E custo, até que ponto é um fator limitante? Agora, observando o panorama geral da categoria de rali *cross country* no país, são os veículos participantes adequados às necessidades? Como se pode classificá-los com relação aos diversos quesitos? Uma análise detalhada é muito cabível nesse ponto, porém de maneira breve algo já pode ser observado: conforme informações retiradas de www.webventure.com.br (2008) e do site oficial da organização do Rally do Sertões www.dunas.com.br (2008), que é a principal prova de rali *cross country* do Brasil, os atuais veículos na categoria, incluindo os considerados de ponta, são em sua grande maioria baseados em plataformas comerciais, em geral, utilitários ou caminhonetes de porte médio., como exemplificado na figura 1.1.

Porém conforme descrito por Puhn (1981) e Katz (2006) essas categorias de veículos não possuem vocação para aplicações de competição, exigindo que extensas modificações sejam feitas e ainda assim ainda apresentam limitações diante de aplicação de competição. Porque então não são escolhidas plataformas mais adequadas? Porque na soma dos fatores essas são as plataformas comerciais mais adequadas! Tirando algumas raras exceções, não há disponíveis hoje no Brasil modelos comerciais que tenham tido seu conceito e projeto destinado a aplicações como esse tipo de competição. Nesse caso, segundo Puhn (1981), para se ter uma

plataforma realmente adequada, é preferível que se inicie um projeto do zero, desde o princípio o direcionando para a necessidade da competição. Isso inclui todos os sistemas do veículo e conseqüentemente soluções aerodinâmicas correspondentes a cada modelo de sistema adotado. Soluções gerais pouco convencionais exigirão também soluções aerodinâmicas pouco convencionais.



Figura 1.1: Exemplos de veículos de rali *cross country* no Brasil
(www.webventure.com.br, 2008).

Observando no site oficial do Rally dos Sertões www.dunas.com.br (2008) e em www.webventure.com.br (2008) é possível encontrar algumas tentativas de desenvolvimento de protótipos específicos para esse tipo de competição, conforme demonstrado na figura 1.2, mas segundo dados das mesmas fontes nenhum deles obteve resultados muito expressivos.



Figura 1.2: Exemplos de protótipos desenvolvidos no Brasil
(www.webventure.com.br, 2008).

Essa situação porém não se reflete fora do país. Pode-se observar em competições de âmbito mundial diversos protótipos dedicados a cada tipo de competição, apresentando superioridade de desempenho sobre os concorrentes comerciais e, conquistando resultados expressivos nas provas que participam. www.dakar.com (2005 a 2008), www.mitsubishi-motors.com (2005 a 2008), www.volkswagen-motorsport.com (2005 a 2008), www.schlessor-aventures.org (2005 a 2008). Alguns exemplos são dados na figura 1.3. Nesses veículos é possível observar que a questão da aerodinâmica é tratada de maneira bem criteriosa, explorando soluções bastante específicas. Não é proposta desse trabalho copiar uma solução de fora do país, mas essas soluções são sim ótimas referências. Serão analisadas e consideradas, mas, mais uma vez, cada competição tem sua necessidade e não necessariamente esses exemplos de sucesso são os mais adequados à nossa. Em suma, esse será um trabalho dedicado e específico, buscará focar a real necessidade, adotando soluções dedicadas em cada sistema e conseqüente solução aerodinâmica correspondente.



Figura 1.3: Exemplos de protótipos em competições mundiais (em ordem: www.raidlive.com, 2006; www.volkswagen-motorsport.com, 2006; www.mitsubishi-motors.com, 2006; www.schlesser-aventures.org, 2006).

1.3 Comparação por valores estimados

Conforme citado acima, os veículos utilizados hoje em competições de rali *cross country* no país são baseados em plataformas comerciais, em geral caminhonetes de porte médio, nos quais pela orientação de aplicação não há grande preocupação em seus projetos com grande eficiência aerodinâmica. O protótipo em questão visa obter superioridade de desempenho sobre esses veículos utilizando-se de um projeto aerodinâmico bem elaborado, porém quão significativo seria esse ganho? Segundo www.chevrolet.com.br (2008), www.gmnoticias.com.br (2008),

www.mistubishi-motors.com.br (2008) e outras fontes, os melhores e mais modernos modelos de caminhonetes desse porte possui coeficiente de arrasto próximo a 0,45 e área frontal de aproximadamente 2,4 m². Há dados de alguns modelos mais antigos onde o coeficiente chega a 0,58. Deve se ressaltar que esses dados são referentes ao veículo original, o qual é bastante diferente das versões utilizadas na competição, de qualquer forma, apenas para efeito comparativo nesse instante, será utilizada essa informação. Do outro lado há o protótipo em estudo, para o qual por uma estimativa pessimista, que poderá ser comprovada nos capítulos adiante, especificou-se como valores de referência o coeficiente de arrasto de 0,42 e a área frontal de 2,1 m².

Para o cálculo do rendimento energético do veículo são consideradas, de um lado, a potência do motor, que após as perdas na transmissão resulta em uma potência na roda, e de outro lado, as forças contrárias ao movimento, que são basicamente a resistência ao rolamento dos pneus e o arrasto aerodinâmico. Utilizando valores apontados por Puhn (1981) para a resistência de rolamento dos pneus, e sabendo que o arrasto aerodinâmico do veículo é dado pela equação 2.6, apontada por Katz (2006), é possível obter os valores de potência na roda do veículo necessários para levá-lo a determinada velocidade. A tabela 1.1 mostra para os valores dados para os veículos acima os valores de potência necessários para atingir diferentes faixas de velocidade, considerando para ambos os mesmos valores de resistência ao rolamento dos pneus.

Pode-se observar pelos valores acima que para velocidades mais baixas há pequena influência do arrasto aerodinâmico na resistência total ao movimento, e a diferença de potência necessária entre o veículo e o protótipo é pouco significativa. Por outro lado, quando são consideradas velocidades mais altas, por exemplo, a partir de 100 Km/h, essa diferença já se torna significativa, ao redor de 15%. Já observando um valor de velocidade mais próximo ao limite que esses veículos seriam capazes de atingir, próximo a 200Km/h, essa diferença se mostra acima de 20%.

Veículo	Caminhonete original	Protótipo na pior condição	
Cd	0,45	0,42	
Área frontal (m ²)	2,4	2,1	
Velocidade (Km/h)	Potência na roda (KW)		Diferença de potência (%)
25	1,96	1,92	2,11%
50	5,24	4,91	6,59%
75	11,17	10,07	10,84%
100	21,06	18,48	14,01%
125	36,26	31,20	16,20%
150	58,07	49,34	17,71%
175	87,83	73,96	18,76%
200	126,85	106,14	19,51%
225	176,46	146,98	20,06%

Tabela 1.1: Potência necessária na roda em função da velocidade na condição de menor discrepância entre os veículos.

Porém ao tomar como exemplo veículos da figura 1.4, e outros tantos apresentados em www.dunas.com.br (2008) e www.webventure.com.br (2008), se vê que esses, para participação na competição, sofrem extensas modificações que influenciam tanto no coeficiente de arrasto quanto na área frontal. Modificações comuns são: aumento da altura livre do solo com a elevação da suspensão, uso de pneus de dimensões maiores que os originais, alargadores de pára-lamas para abrigar os grandes pneus, retirada ou modificação do pára-choques frontal e adição de acessórios como captações de ar, antenas, filtros externos, pneus sobressalentes e outros componentes mecânicos e ferramentas diversas. De maneira geral, se pode dizer que todas essas modificações influenciam negativamente no coeficiente de arrasto do veículo bem como promovem significativo aumento da área frontal.



Figura 1.4: Veículos modificados para a competição (www.webventure.com.br 2008).

Dessa forma, para uma nova condição de comparação procurando se aproximar mais da realidade da competição, foi feita de maneira conservadora uma estimativa da alteração da área frontal e do coeficiente de arrasto sobre esses veículos de ponta da competição. Hucho (1998) apresenta alguns critérios para estimar a contribuição no coeficiente de arrasto devido a modificações na forma do veículo e a presença de adendos, com isso estimou-se para esses veículos um aumento médio no coeficiente de arrasto da ordem de 0,07, bem como, por um cálculo de proporções de área, um conservador aumento da área frontal em $0,1 \text{ m}^2$. Sendo assim, o veículo médio para comparação deve ter coeficiente de arrasto próximo a 0,52 e área frontal de $2,5 \text{ m}^2$. Do lado do protótipo, a comparação anterior utilizou uma condição pessimista dos resultados de arrasto e área frontal, basicamente o considerando com a maior altura livre de solo possível (370 mm), o que não só aumenta a área frontal, mas também contribui significativamente no arrasto. Se da mesma forma forem utilizados valores do protótipo em uma condição média de uso, com altura livre do solo média (250 mm), os valores do coeficiente de arrasto e área frontal podem ser estimados em respectivamente 0,39 e $2,0 \text{ m}^2$. Nessa condição a diferença de potência observada passa a ser gritante, da ordem de 40% a meros 100 Km/h e mais de 55% em velocidades acima de 200Km/h, conforme observado na tabela 1.2.

Veículo	Caminhonete modificada para competição	Protótipo em condição média de uso	
Cd	0,52	0,39	
Área frontal (m ²)	2,5	2,0	
Velocidade (Km/h)	Potência na roda (KW)		Diferença de potência (%)
25	2,00	1,90	5,60%
50	5,60	4,75	17,90%
75	12,38	9,51	30,16%
100	23,94	17,14	39,66%
125	41,88	28,60	46,43%
150	67,78	44,84	51,18%
175	103,24	66,81	54,54%
200	149,86	95,47	56,97%
225	209,23	131,79	58,76%

Tabela 1.2: Potência necessária na roda em função da velocidade na condição média de uso.

Segundo dados extraídos de www2.uol.com.br/rallydossertoos e www.zone.com.br, as velocidades médias em uma prova, para os veículos de ponta, giram em torno de 80 a 90 Km/h. Com isso pode-se concluir que o protótipo em questão, caso atinja na prática os valores almejados, baseado nos números discutidos, deverá apresentar superioridade de desempenho, no pior caso, de 10 a 15% sobre os concorrentes. Já considerando a condição média de uso tanto do protótipo quanto dos concorrentes, essa diferença de desempenho pode chegar ao redor de 35%.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 Mecânica de fluidos e aerodinâmica veicular

A intenção desse item é apresentar de maneira resumida os principais conceitos de mecânica de fluidos e aerodinâmica veicular necessários para entender os mecanismos que criam as forças aerodinâmicas em um veículo em movimento.

Um veículo em movimento está submetido a uma força de arrasto causada pelo fluxo de ar escoando ao longo de sua superfície, a qual é formada pela soma de dois fatores de natureza diferentes: o arrasto devido ao atrito viscoso e o arrasto devido à pressão. No caso da força gerada pela pressão, além do arrasto, há outra componente de força na vertical que é chamada de sustentação, a qual será detalhada adiante.

2.1.1 Atrito viscoso

Um fluido possui duas propriedades relevantes em um estudo de escoamento, sua densidade ρ e sua viscosidade μ . Devido à viscosidade do fluido há uma regra básica da mecânica dos fluidos que é, independente do escoamento, a condição de não-escorregamento do fluido na superfície do corpo. Isso significa que, não interessa qual seja a velocidade do fluxo, qual seja a geometria da superfície, na superfície do corpo a velocidade relativa do fluido será sempre zero. Por outro lado, considerando, por exemplo, um veículo em movimento e sem perturbações externas ao ar, a certa distância da superfície, a velocidade relativa do ar sobre o veículo assume uma velocidade média V_0 que é da ordem de grandeza da velocidade de movimento desse veículo. Dessa forma observa-se que a velocidade do fluxo de ar assume uma distribuição crescente à medida que se afasta da superfície, até que em um determinado ponto ela se estabiliza assumindo esse valor V_0 . Essa distância

da superfície em que a velocidade apresenta essa variação de valor é chamada de camada limite. A espessura da camada limite pode ser, e em geral é, variável ao longo do escoamento. Segundo Katz (2005), em um veículo trafegando a uma velocidade de aproximadamente 100Km/h, por exemplo, é comum observar a espessura da camada limite variar desde poucos milímetros na região frontal até diversos centímetros na região do teto. A figura 2.1 exemplifica a distribuição de velocidades na camada limite do escoamento de um fluido sobre uma placa plana.

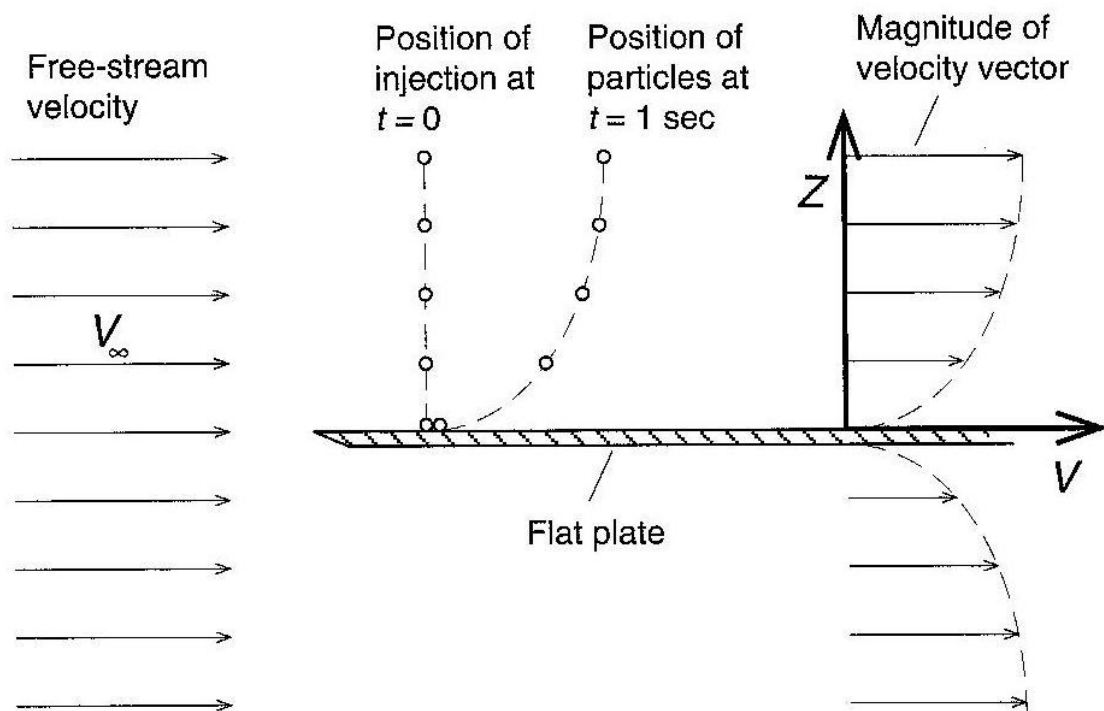


Figura 2.1: Distribuição de velocidade no escoamento sobre uma placa plana (RACE CAR AERODYNAMICS, 2005).

O escoamento do fluido ao longo de um corpo apresenta algumas características que são de extrema relevância num estudo de aerodinâmica. A primeira delas é a apresentação do fluxo como anexado ou separado da superfície. Diz-se que o fluxo é anexado quando o caminho percorrido por uma partícula de ar ao longo da superfície é definido por uma linha praticamente igual à superfície que ele percorre. Da outra forma, se essa linha não segue a forma geométrica da superfície, diz-se que o fluxo é separado. Esse fenômeno em um veículo pode ser observado nas duas formas, como exemplificado na figura 2.2. Observa-se no veículo A que as linhas seguem a forma do veículo do início ao final, caracterizando

um escoamento totalmente anexado. Já no veículo B, observa-se que as linhas de escoamento seguem a forma do veículo até certo ponto, a partir do qual ocorre uma separação, e o escoamento toma linhas diferentes da forma da superfície, caracterizando um escoamento separado nesse ponto.

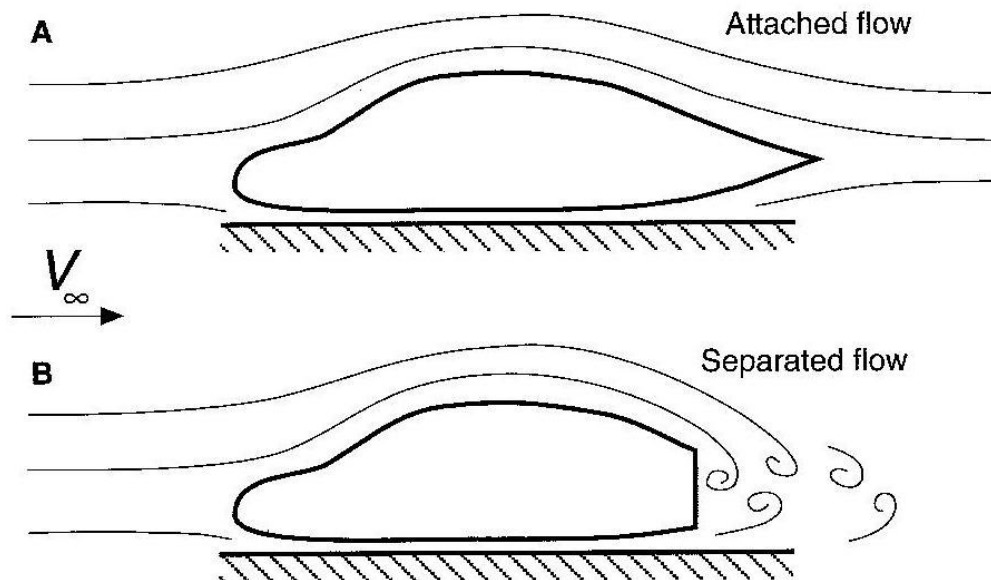


Figura 2.2: Escoamento anexado e escoamento separado (RACE CAR AERODYNAMICS, 2005).

Outro fenômeno importante observado no escoamento é se o fluxo apresenta característica laminar ou turbulenta. Se o caminho percorrido pelas partículas do fluido possui um aspecto organizado, com linhas paralelas entre si e seguindo o vetor da velocidade média do escoamento, diz-se que esse escoamento é laminar. Por outro lado, se essas linhas apresentam um aspecto desorganizado com as partículas tomando movimentos alternativos e aleatórios em relação à velocidade média, diz-se que o escoamento é turbulento. A figura 2.3 exemplifica os dois tipos.

Em aerodinâmica veicular é possível observar os dois tipos de escoamento, e a existência de um tipo ou outro é decorrente de uma série de variáveis. O domínio dessa característica é muito importante no desenvolvimento do veículo, pois a existência de um ou outro tipo em determinado ponto da superfície influencia radicalmente no arrasto e sustentação desse veículo.

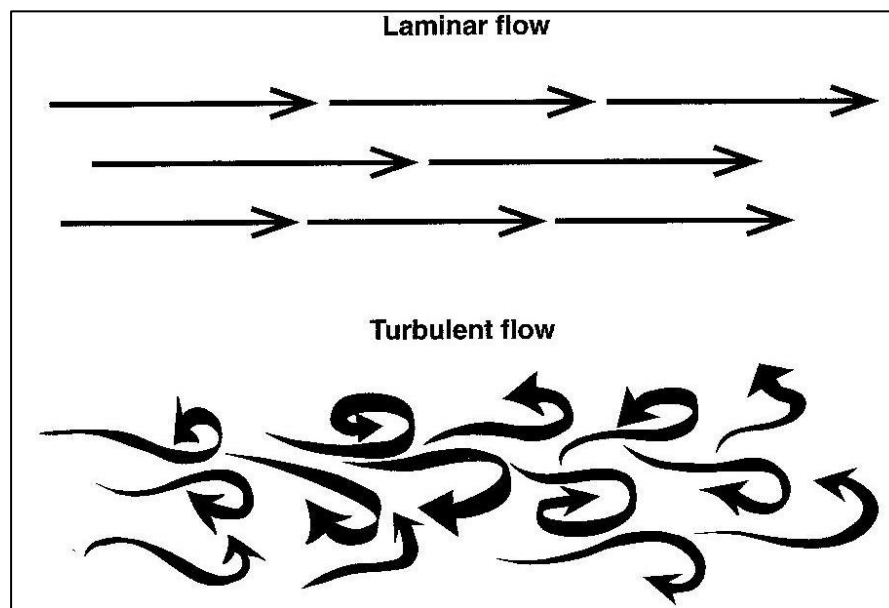


Figura 2.3: Escoamento laminar e escoamento turbulento (RACE CAR AERODYNAMICS, 2005).

É necessário nesse ponto introduzir os conceitos de uma variável com a qual é possível caracterizar uma série de propriedades de um escoamento: o número de Reynolds. O número de Reynolds é uma variável adimensional que toma o produto da velocidade pela dimensão do corpo para caracterizar o escoamento. A equação para o cálculo de número é:

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (2.1)$$

Segundo Hucho (1998), observou-se que para ordem de grandeza do número de Reynolds menor do que 10^5 o escoamento toma uma característica fundamentalmente laminar. Para valores acima dessa ordem, o escoamento pode ser laminar ou turbulento, dependendo de outras variáveis. Enfim, o conhecimento desse número é de fundamental importância, pois a característica do escoamento pode variar drasticamente com seu valor. Um veículo com aproximadamente 4 metros de comprimento trafegando a 100Km/h apresenta número de Reynolds de $8,1 \cdot 10^6$, apresentando dessa forma os dois tipos de escoamento.

Esse número é muito utilizado, e pode ser melhor compreendido através desse exemplo, quando são feitos estudos de escoamento em modelos em escala.

Primeiramente como o número é dependente de comprimento e velocidade, para um modelo em proporções 1:4, o número de Reynolds seria quatro vezes menor se mantida a velocidade e as propriedades do fluido, o que poderia impactar em drásticas mudanças na característica do escoamento. Dessa forma, uma maneira de manter o número constante é o aumento da velocidade no ensaio. Outra saída costumeiramente utilizada e a mudança do fluido, por exemplo, um canal de recirculação de água para simular um modelo em escala como alternativa ao túnel de vento para o modelo original. Como a densidade e viscosidade da água são razoavelmente maiores que do ar, tanto comprimento quanto velocidade podem ser bastante reduzidos mantendo o mesmo número de Reynolds.

Retomando as características do escoamento, há uma série de fatores que foi citada anteriormente, como a definição do escoamento como anexado ou separado, laminar ou turbulento, a definição da camada limite e como ela pode variar num típico escoamento ao longo do escoamento sobre um veículo em movimento. A intenção agora é detalhar o comportamento do fluxo dentro da camada limite e entender como a combinação desses fatores acima influencia no desempenho aerodinâmico do veículo.

Em um veículo trafegando a 100Km/h tem-se que o número de Reynolds se aproxima de 10^7 . Dessa forma, olhando para dentro da camada limite, é possível verificar que o escoamento pode assumir característica tanto laminar quanto turbulenta. Normalmente em um veículo a camada limite possui escoamento laminar no seu início, próximo a região frontal, passando a turbulento ao se aproximar da traseira do veículo. Nessa condição é conhecida a região de transição, que é ponto onde ocorre a mudança da característica laminar para turbulenta. Devido às novas componentes da velocidade no escoamento turbulento, perpendiculares à velocidade média do fluxo, observa-se que a espessura dessa camada passa a ser maior, gerando também maiores perdas de quantidade de movimento, o que conseqüentemente provoca um maior atrito viscoso. A figura 2.4 demonstra esse fenômeno.

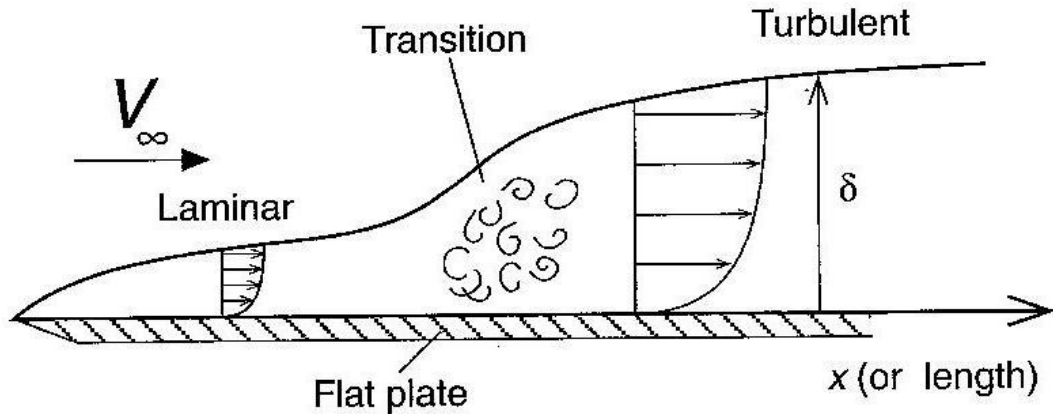


Figura 2.4: Região de transição (RACE CAR AERODYNAMICS, 2005).

Em termos de velocidade, nota-se que à medida que a velocidade aumenta, a espessura da camada limite diminui. Isso é devido à maior quantidade de movimento presente no escoamento se comparada com a perda de quantidade de movimento devido à viscosidade do fluido. Dessa forma, tem-se que quanto maior for a velocidade, menor tende a ser o atrito viscoso. A figura 2.5 mostra como varia o coeficiente de atrito viscoso em função do aumento da velocidade, interpretado no gráfico através da variação do número de Reynolds. Note que há duas curvas diferentes, uma para o escoamento laminar e outra para o escoamento turbulento, e as duas se mostram presentes para uma mesma faixa de valor do número de Reynolds. A definição da característica nesse caso é dependente de outras variáveis envolvidas no escoamento, como geometria da superfície ou rugosidade do material.

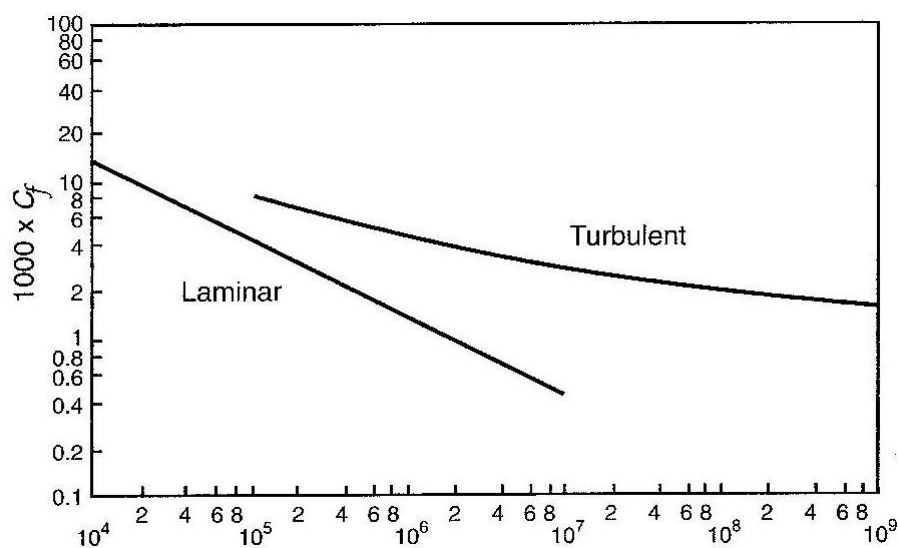


Figura 2.5: Coeficiente de atrito viscoso em função do número de Reynolds (RACE CAR AERODYNAMICS, 2005).

Com essas informações é possível chegar a algumas conclusões importantes para ter como premissa no projeto aerodinâmico de um veículo:

- 1- A espessura da camada limite é maior para um escoamento turbulento do que para um escoamento laminar;
- 2- O coeficiente de atrito viscoso é menor à medida que o número de Reynolds aumenta;
- 3- Em certa faixa de valor do número de Reynolds o escoamento pode ser tanto laminar quanto turbulento;
- 4- O coeficiente de atrito viscoso é maior para o escoamento turbulento do que para o laminar;
- 5- A separação do fluxo pode ser retardada em uma camada limite com escoamento turbulento quando comparada com uma condição com escoamento laminar. Isso é devido à maior transferência de quantidade de movimento na direção perpendicular ao fluxo. Essa característica acaba sendo um recurso útil em um projeto aerodinâmico, força-se a ocorrência da turbulência, pois muitas vezes ela é preferível em relação à separação do fluxo.

Sumarizando os pontos observados acima, é possível definir algumas linhas de pensamento sobre o atrito viscoso para desenvolver um projeto aerodinâmico de um veículo com baixo coeficiente de arrasto, como manter na maior proporção possível o escoamento laminar, ou manter espessura da camada limite sempre a menor possível, afinal o atrito nessas condições é menor.

2.1.2 Distribuição de pressão

Um veículo em movimento provoca um distúrbio no fluxo de ar tanto em sua direção quanto em velocidade. Esse movimento de ar ao longo do corpo do veículo provoca forças aerodinâmicas que podem ser divididas sob duas naturezas diferentes: uma é a força devido ao atrito viscoso, que foi discutida acima, causada

pela ação do fluxo tangencialmente à superfície contribuindo para o arrasto. A outra é a força gerada pela pressão, agindo de forma perpendicular à superfície e contribuindo tanto para o arrasto quanto para a sustentação. É importante notar que essa força causada pela pressão na superfície é fundamentalmente relacionada com a velocidade V_0 , fora da camada limite.

Ambas as forças são decorrentes da variação da velocidade do fluxo de ar ao longo da superfície (fora da camada limite), o que é totalmente dependente da geometria do corpo do veículo. Os detalhes de como essa velocidade pode variar em função dessa geometria são descritos ao longo dos tópicos seguintes, mas o importante nesse ponto é entender como essa variação de velocidade se relaciona com a variação de pressão. Essa relação é descrita pela equação de Bernoulli:

$$\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} = \text{cte} \quad (2.2)$$

O valor dessa constante na prática pouco importa, pois a aplicação dessa fórmula se dá como efeito de comparação entre regiões de análise, podendo ser melhor apresentada da seguinte forma:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{p_\infty}{\rho} + \frac{V_\infty^2}{2} \quad (2.3)$$

A fórmula acima usa V_∞ como a velocidade relativa do ar longe do veículo, ou seja, a velocidade de movimento do veículo, e V_1 é a velocidade no ponto onde se deseja conhecer a pressão. Dessa forma, como há essa constante, pode-se interpretar de maneira bem simplificada que quanto maior for a velocidade do escoamento em um ponto, menor será a pressão. Aplicando isso na aerodinâmica veicular, conclui-se que se é desejável obter forças de sustentação negativas no veículo, conhecida no meio de competição como *downforce*, é necessário ter na sua superfície inferior velocidades do fluxo de ar maiores que na superfície superior. Conseqüentemente será gerada menor pressão abaixo do veículo do que acima, o que o pressionará contra o solo ao invés de suspendê-lo. Esse é o efeito gerado pelas asas, ou

aerofólios, que possuem perfil tal que provoca essa diferença de velocidade favorável.

Aplicando esse conceito no escoamento do fluido ao longo de um corpo, constitui-se uma variável extensamente utilizada para o cálculo das cargas aerodinâmicas: o coeficiente de pressão. Esse coeficiente nada mais é do que a pressão local, apresentado de forma adimensional de maneira que seja independente da velocidade, isto é, não interessa a qual velocidade o veículo está se movendo, o resultado será sempre o mesmo:

$$C_p = \frac{(p - p_\infty)}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2} \quad (2.4)$$

É possível derivar essa expressão em função da velocidade local obtendo a seguinte relação para o coeficiente de pressão:

$$C_p = 1 - \frac{V^2}{V_\infty^2} \quad (2.5)$$

Retomando ao objetivo inicial que é encontrar as cargas aerodinâmicas sobre um veículo em movimento, é possível traçar o que é chamado de diagrama de pressão. Esse diagrama apresenta a distribuição de pressão ao longo de toda a superfície do veículo, acima e abaixo dele, adiante e atrás, de forma que com a somatória dessas cargas é possível calcular as componentes da força resultante que geram o arrasto (no sentido longitudinal do veículo) e sustentação (na vertical).

A figura 2.6 mostra uma típica distribuição de pressão ao longo da dimensão do veículo, tomadas as resultantes nas superfícies superior e inferior. Sobre essa figura alguns detalhes interessantes podem ser melhor explicados. Note que é comum o coeficiente de pressão ser apresentado com sinal negativo, pois dessa forma pressão e velocidade podem ser impressas no mesmo diagrama.

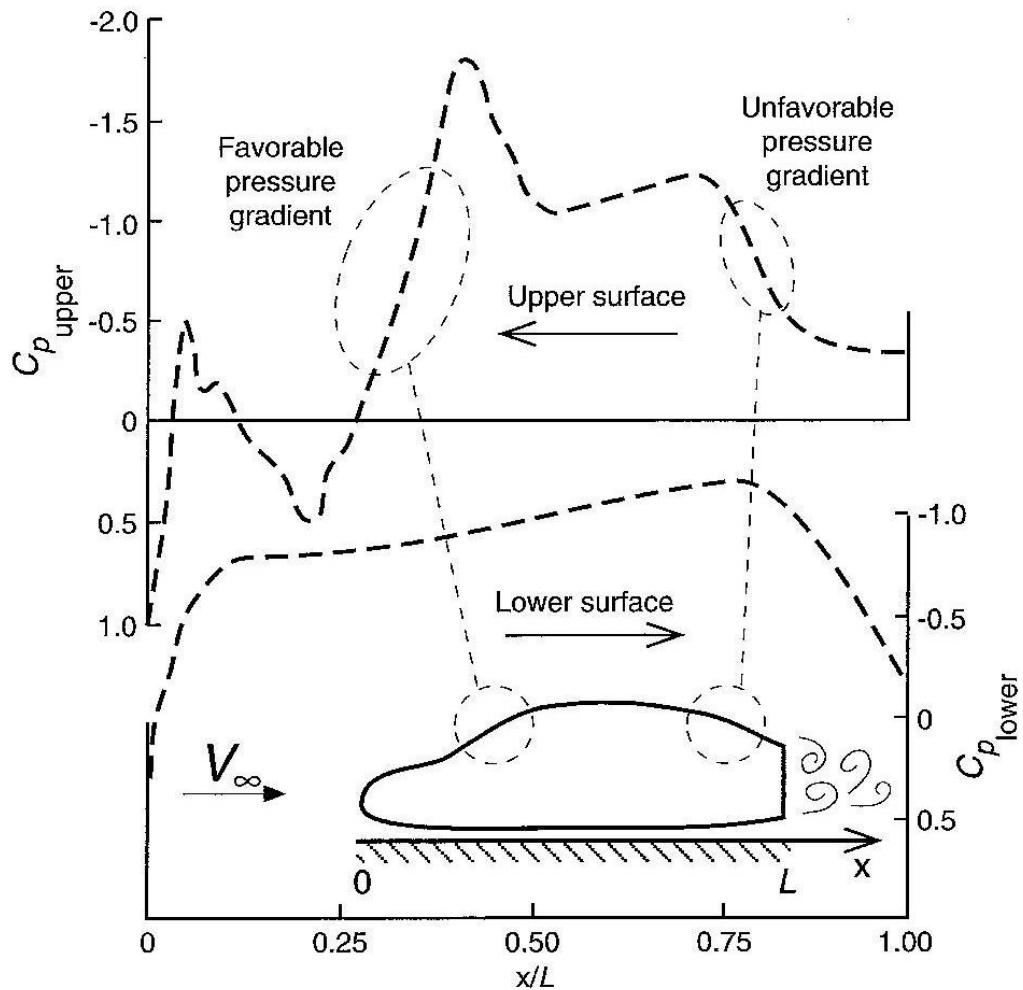


Figura 2.6: Diagrama de pressão ao longo das superfícies de um veículo (RACE CAR AERODYNAMICS, 2005).

Observando a figura, na curva de pressão da superfície superior, no extremo frontal do veículo encontra-se o ponto de estagnação, com velocidade zero, onde pela fórmula do coeficiente de pressão obtém-se conseqüentemente o coeficiente de pressão igual a 1. A partir desse ponto ocorrem as variações de pressão, é possível visualizar que nas regiões onde a superfície do veículo é convexa há um aumento da velocidade, e conseqüentemente uma diminuição no coeficiente de pressão. Na situação oposta, onde a superfície é côncava, a velocidade do fluxo é menor e o coeficiente de pressão maior. Um ponto interessante a se observar é na base do pára-brisas, onde há o segundo maior valor do coeficiente de pressão, pois ocorre uma grande desaceleração do ar ou, em alguns casos, até mesmo estagnação. Daí em diante ocorre um gradiente de pressão negativo com o valor mais baixo do coeficiente no topo do pára-brisas, onde a superfície é convexa e há uma grande aceleração do ar. Por fim, na traseira do veículo, observa-se nas duas curvas que o

coeficiente de pressão não retorna a 1 como na dianteira, pois ocorre a separação do fluxo nesse ponto. Com isso a pressão na dianteira é maior que na traseira, o que gera o arrasto devido à pressão.

Ao fazer a somatória das pressões por toda a superfície do veículo encontra-se uma força resultante, a qual se pode decompor em duas componentes. Teoricamente há três componentes, em X, Y e Z, mas para o esse tipo de estudo costuma-se desconsiderar a componente Y assumindo a simetria do corpo do veículo e que qualquer perturbação externa (como ventos laterais) é inexistente ou insignificante perante as velocidades que o veículo estaria desenvolvendo. Dessa forma, têm-se as duas componentes X e Z, onde a atuação positiva em X, que pela orientação é contrária ao movimento do veículo, representa o arrasto, e a componente Z, com orientação no eixo vertical positiva para cima, representa a sustentação. É comum em veículos de passeio que o coeficiente de sustentação seja positivo, ou seja, a força atua no veículo no sentido de baixo para cima, o levantando sobre o solo. Isso é o que origina a expressão popular de que o veículo fica mais leve quando está em altas velocidades. Porém em veículos de competição abre-se mão de certa eficiência do arrasto para geração de *downforce*, ou seja, a força atuando no sentido de manter o veículo pressionado ao chão. Nesse caso diz-se que o coeficiente de sustentação é negativo.

Os coeficientes de arrasto e de sustentação, como o coeficiente de pressão, são números adimensionais. As expressões que definem os coeficientes de arrasto e sustentação são respectivamente:

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 A} \quad (2.6)$$

$$C_l = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 A} \quad (2.7)$$

Onde:

Cd: coeficiente de arrasto (a sigla *d* vem do inglês *drag*, tradução para arrasto);

D: força de arrasto;

Cl: coeficiente de sustentação (a sigla *l* vem do inglês *lift*, tradução para sustentação);

A: área frontal do veículo.

O objetivo de um bom projeto é obter os menores valores possíveis desses dois coeficientes, de arrasto e sustentação, de forma que o veículo despenda do mínimo de energia possível para vencer a carga aerodinâmica em altas velocidades e também se mantenha firmemente pressionado ao chão. Com isso têm-se um veículo que pode atingir velocidades mais altas tanto nas retas quanto nas curvas, com um consumo de combustível reduzido. Conforme já citado acima, é comum que em aplicações de competição haja certa penalidade no arrasto para a obtenção de *downforce*. Nesses casos objetiva-se obter a maior relação possível entre sustentação e arrasto, ou seja, conseguir o máximo de *downforce* (sustentação negativa) possível com o menor incremento de arrasto.

Valores típicos desses coeficientes são demonstrados na tabela 2.1, separados por veículos comuns de passeio, veículos esportivos e veículos de competição.

Como visto nas expressões que definem os coeficientes de arrasto e de sustentação, as respectivas forças são dependentes da área frontal do veículo. Sendo assim, ao desenvolver um projeto, procura-se também obter o menor valor possível para essa área. É comum também, ao especificar o veículo, colocar não somente o coeficiente de arrasto, mas também o produto desse coeficiente pela área frontal, o que vai dar realmente o valor absoluto para efeito de comparação com outros veículos.

	Modelo e ano	Cd	Cl
Passeio	1973 Opel Rekord	0,47	0,36
	1980 Peugeot 305 GL	0,44	0,44
	1986 Subaru XT	0,29 - 0,31	0,10
Esportivos	Porsche 911 Carrera	0,38 - 0,39	ND
	1982 Camaro Z28	0,37 - 0,38	ND
	1982 Corvette	0,36 - 0,38	ND
Competição	1990 Mazda GTO (Rear Deck Spoiler)	0,51	-0,44
	1991 Mazda GTO (Rear Wing)	0,48	-0,53
	1973 Porsche 917/30	0,57	-1,04
	1985 Generic Prototype	0,74	-1,79
	Generic Porsche 962 C	0,80	-4,80
	1992 Mazda RX-792P	0,70	-3,80
	1992 Nissan P35, C	0,50	-3,00
	1983 Generic F-1, no side pods	1,07	-0,99
	1987 March Indy	1,06	-1,71
	1991 Penske PC20, high downforce	1,11	-3,33
	1991 Penske PC20, speedway	0,740	-2,073
	1992 Galmer G92, high downforce	1,397	-3,688
	1992 Galmer G92, speedway	0,669	-1,953
	2000 Ferrari F-1 (high downforce)	0,99	-2,85
	2002 Dodge NASCAR	0,39	-0,42
2004 Lola Indy car (high downforce)	0,96	-2,75	
2004 Audi R8	0,54	-2,60	

Tabela 2.1: valores típicos de coeficientes de arrasto e sustentação (RACE CAR AERODYNAMICS, 2005).

Concluindo esse tópico ratifica-se um objetivo básico de um projeto aerodinâmico que é obter o menor valor possível para o arrasto. Para facilitar a busca desse objetivo KATZ (1995) coloca que a maior fonte de contribuição é a separação de fluxo, chegando a proporções acima de 80% do valor total do arrasto. Dessa forma, ao projetar, analisar e corrigir o desenho da carroceria de um veículo esse é o principal ponto a atacar.

2.2 Método numérico e ferramentas de simulação

Tradicionalmente para o estudo do escoamento dos fluidos são utilizadas as equações de Navier-Stokes. O conceito utilizado por essas equações é a conservação, para um determinado volume de controle, de variáveis como massa e quantidade de movimento. Por outro lado, por se tratarem de equações não lineares, é necessário solucioná-las através de métodos numéricos. Considerando-se um volume de controle com a complexidade da geometria da carroceria de um automóvel, torna-se inviável essa solução sem o recurso de ferramentas computacionais. Para esse trabalho então se utilizou um software comercial chamado Fluent®, que se baseia nas equações de Navier-Stokes para o estudo do escoamento as solucionando através de métodos numéricos.

Um recurso muito importante utilizado por esse software é chamado de Método dos Volumes Finitos. Esse método consiste na divisão do volume de controle original, com forma complexa, em volumes de controle de dimensão infinitesimal. De posse de uma malha formada por pequenos volumes de geometria simples, é feita a integração das equações nos domínios do espaço e do tempo, construindo equações algébricas para variáveis discretas independentes como velocidade e temperatura. Após isso é feita a linearização dessas equações e a solução do sistema linear, obtendo valores atualizados para as variáveis independentes. Abaixo há a demonstração da equação diferencial unidimensional, que para a análise efetiva pode ser estendida para os casos bidimensional e tridimensional.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) = 0 \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \right] + F \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + S \phi \quad (2.10)$$

A integração no volume de controle é dada da forma:

$$\int_{V.V} \frac{\partial}{\partial X} (\rho u) dV = \int_A (\rho u) dA \quad (2.11)$$

Aplicando em 2.8, 2.9 e 2.10 têm-se:

$$\frac{M_p - M_p^0}{\Delta t} + \dot{M}_e - \dot{M}_w = 0 \quad (2.12)$$

$$\dot{M}_e u_e - \dot{M}_w u_w = -(\rho_e - \rho_w)A + \left[\frac{\mu_e}{\Delta x_e} (\mu E - \mu P) - \frac{\mu_w}{\Delta x_w} (\mu P - \mu W) \right] A + S_\phi \quad (2.13)$$

$$M_e \phi_e - M_w \phi_w = \left(\Gamma_e \frac{\phi E - \phi P}{\Delta x_e} - \Gamma_w \frac{\phi P - \phi W}{\Delta x_w} \right) A + S_\phi \Delta V \quad (2.14)$$

A solução dessas equações algébricas é possível dado que as variáveis independentes como μ , ρ e Φ podem ser interpoladas utilizando os conhecidos valores nas faces do volume de controle. A interpolação pode ser feita de diferentes maneiras, o próprio software Fluent® oferece algumas opções, sendo que a utilizada nas simulações foi o método *Upwind* de primeira ordem. O critério utilizado por esse método é:

$$\phi_e = \phi_P, \text{ se } M_e > 0; \phi_e = \phi_E, \text{ se } M_e < 0. \quad (2.15)$$

$$\phi_w = \phi_W, \text{ se } M_w > 0; \phi_w = \phi_P, \text{ se } M_w < 0. \quad (2.16)$$

2.2.1 Modelagem da turbulência

Num escoamento sobre um veículo em movimento, tipicamente encontra-se o número de Reynolds da ordem de 10^7 . Isso quase que na totalidade dos casos faz

com que o escoamento possua regiões de turbulência. Essas regiões são caracterizadas por grande flutuação da velocidade e conseqüente flutuação de variáveis como quantidade de movimento e energia. Essas flutuações acabam sendo de pequena escala e alta freqüência, o que torna o cálculo uma tarefa extremamente trabalhosa. Já há na literatura citações de estudos onde as equações de Navier-Stokes são resolvidas em sua totalidade, para todo o escoamento incluindo os pequenos turbilhões, porém isso só é possível utilizando geometrias relativamente simples e recursos computacionais muito avançados, o que torna a atividade extremamente custosa. Dessa forma, mesmo com a evolução tecnológica, para fins comerciais é praticamente impossível a resolução de um escoamento por esse processo.

Para permitir então a solução dos problemas foram criados os modelos de turbulência, formulações matemáticas relativamente simplificadas que procuram descrever os fenômenos ocorridos no escoamento turbulento e solucionar o escoamento com certo nível de precisão. Há hoje uma série de modelos de turbulência disponíveis, mas infelizmente ainda não há um consagrado que seja o mais adequado a todos os tipos de escoamento. Sendo assim, é necessário conhecer bem a natureza da simulação que pretende se executar e escolher dentre as opções de modelos existentes qual a que melhor se adéqua à necessidade. O software Fluent® possui algumas opções de modelos de turbulência, dentre os mais conhecidos estão o $k-\varepsilon$, o $k-\omega$, $k-\omega$ SST e LES. O método escolhido para esse trabalho foi o $k-\omega$ SST. Os motivos para a escolha serão descritos em detalhes do item 4.4 adiante.

As equações de transporte para o método $k-\omega$ SST são descritas abaixo:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \tilde{Y}_k + S_k \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega S_\omega \quad (2.18)$$

A difusividade efetiva é dada por:

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (2.19)$$

$$\Gamma \omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma \omega} \quad (2.20)$$

A viscosidade turbulenta é dada por:

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max\left[\frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{a_1 \omega}\right]} \quad (2.21)$$

$$\sigma_k = \frac{1}{F_1 / \sigma_{k,1} + (1 - F_1) / \sigma_{k,2}} \quad (2.22)$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{F_1 / \sigma_{\omega,1} + (1 - F_1) / \sigma_{\omega,2}} \quad (2.23)$$

As funções de mistura são dadas por:

$$F_1 = \tanh(\Phi_1^4) \quad (2.24)$$

$$\Phi_1 = \min\left[\max\left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega}\right), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_\omega^+ y^2}\right] \quad (2.25)$$

$$D_\omega^+ = \max\left[2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10}\right] \quad (2.26)$$

$$F_2 = \tanh(\Phi_2^2) \quad (2.27)$$

$$\Phi_2 = \max\left[2 \frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega}\right] \quad (2.28)$$

Para modelar a produção de energia cinética na turbulência, tem-se a produção de k e ω dadas respectivamente por:

$$\tilde{G}_k = \min(G_k, 10\rho\beta^* k\omega) \quad (2.29)$$

$$G_\omega = \frac{\alpha}{V_t} G_k \quad (2.30)$$

Sendo que:

$$\alpha_\infty = F_1 \alpha_{\infty,1} + (1 - F_1) \alpha_{\infty,2} \quad (2.31)$$

$$\alpha_{\infty,1} = \frac{\beta_{i,1}}{\beta_\infty^*} - \frac{k^2}{\sigma_{\omega,1} \sqrt{\beta_\infty^*}} \quad (2.32)$$

$$\alpha_{\infty,2} = \frac{\beta_{i,2}}{\beta_\infty^*} - \frac{k^2}{\sigma_{\omega,2} \sqrt{\beta_\infty^*}} \quad (2.33)$$

A dissipação da energia cinética na turbulência é dada por:

$$Y_k = \rho \beta^* k \omega \quad (2.34)$$

$$Y_\omega = \rho \beta \omega^2 \quad (2.35)$$

Onde:

$$\beta_i = F_1 \beta_{i,1} + (1 - F_1) \beta_{i,2} \quad (2.36)$$

As constantes utilizadas no modelo são:

$$\sigma_{k,1} = 1.176; \sigma_{\omega,1} = 2.0; \sigma_{k,2} = 1.0; \sigma_{\omega,2} = 1.168; a_1 = 0.31; \beta_{i,1} = 0.075; \beta_{i,2} = 0.0828.$$

$$\alpha_\infty^* = 1; \alpha_\infty = 0.52; \alpha_0 = \frac{1}{9}; \beta_\infty^* = 0.09; R_\beta = 8; R_k = 6; R_\omega = 2.95; \zeta^* = 1.5; M_{t0} = 0.25.$$

3 OBJETO DE ESTUDO

O trabalho em questão gira em torno do projeto de um protótipo para competições em rali *cross country*. Como já comentado anteriormente, é complicado se falar dos aspectos aerodinâmicos de um veículo sem os relacionar com os sistemas diversos adotados. Por isso, nesse tópico, para justificar as soluções adotadas no projeto aerodinâmico, se faz necessário descrever claramente algumas das soluções utilizadas nos diversos sistemas do veículo. É importante lembrar, porém, que o foco desse trabalho é sobre quesitos aerodinâmicos, dessa forma procurar-se-á não se ater aos fundamentos teóricos que levaram à adoção dessas soluções dos diversos sistemas do veículo, considerando-os dessa forma como adequados e os tendo como premissas de projeto.

3.1 Premissas de projeto

O protótipo analisado pode ser classificado com um veículo de porte médio, com capacidade para dois ocupantes - piloto e navegador - com dimensões e peso equivalentes a um sedan grande ou uma caminhonete leve. A medida de entre eixos é de 2,70m, e as bitolas dianteira e traseira foram limitadas em 1,55m. Essa limitação de bitola foi colocada de maneira a manter a largura máxima do veículo em aproximadamente 1,80m, pela característica desse tipo de competição no Brasil, onde pistas muito estreitas são freqüentes, é desejável que o veículo não possua uma largura elevada. Essa informação é de grande relevância ao se tratar da área frontal utilizada no cálculo do arrasto. O peso do veículo é um fator regido pelo regulamento da categoria, sendo de 1675 Kg para o veículo em questão devido à motorização escolhida, distribuído igualmente entre os eixos dianteiro e traseiro, o que evitaria uma eventual necessidade de adendos aerodinâmicos para correção

desse balanceamento. O veículo possui tração nas quatro rodas em tempo integral, com três diferenciais e disposição do *powertrain* central – traseira, com o motor, caixa de câmbio, caixa de redução e caixa de transferência com diferencial central montados longitudinalmente. Essa configuração com motor se localizando adiante do eixo traseiro, logo atrás do habitáculo dos ocupantes, requer especial atenção com os diversos sistemas de arrefecimento do veículo já sabendo de antemão que as captações e saídas de ar para os sistemas de arrefecimento e alimentação de sistemas do veículo não se encontrarão nas posições convencionais. Captações nas laterais da carroceria e no teto são fortes opções. A altura livre do solo média é de aproximadamente 370 mm, o que muda completamente o conceito de projeto aerodinâmico quando comparado com um veículo de pista, o qual praticamente está colado ao solo. Além disso, essa distância do solo deixa expostos grandes pneus e outros diversos componentes de suspensão, o que também traz significativas influências no comportamento aerodinâmico. Outra importante diferença em relação a veículos de pista são os elevados ângulos de ataque e de saída, necessários para prover versatilidade ao veículo em terrenos irregulares. Para isso se faz necessário que as extremidades da carroceria sejam elevadas e de dimensões reduzidas, principalmente na dianteira, sendo um fator que pode comprometer a eficiência aerodinâmica. Do mais, a carroceria deve possuir altura e largura reduzida, de maneira a diminuir a área frontal. As linhas da carroceria e da área envidraçada são definidas de acordo com a disposição física dos componentes, e são ajustadas conforme a análise aerodinâmica para que se obtenha alta eficiência nos diversos aspectos. Tem-se como meta que o veículo seja capaz de atingir velocidades acima de 200 km/h. Como peso e motorização do veículo estão rigidamente regulamentados, a eficiência aerodinâmica é um fator fundamental para que se atinja essa meta. Outro fator de grande importância nesse modelo de competição é o consumo de combustível. Por possuir provas de longa duração e de grande exigência para o veículo, boa eficiência em consumo é extremamente importante para que se consiga superioridade de desempenho. Nesse ponto, mais uma vez, eficiência aerodinâmica é fundamental. Um esboço do veículo e suas características descritas acima podem ser observados nas figuras 3.1 a 3.6.

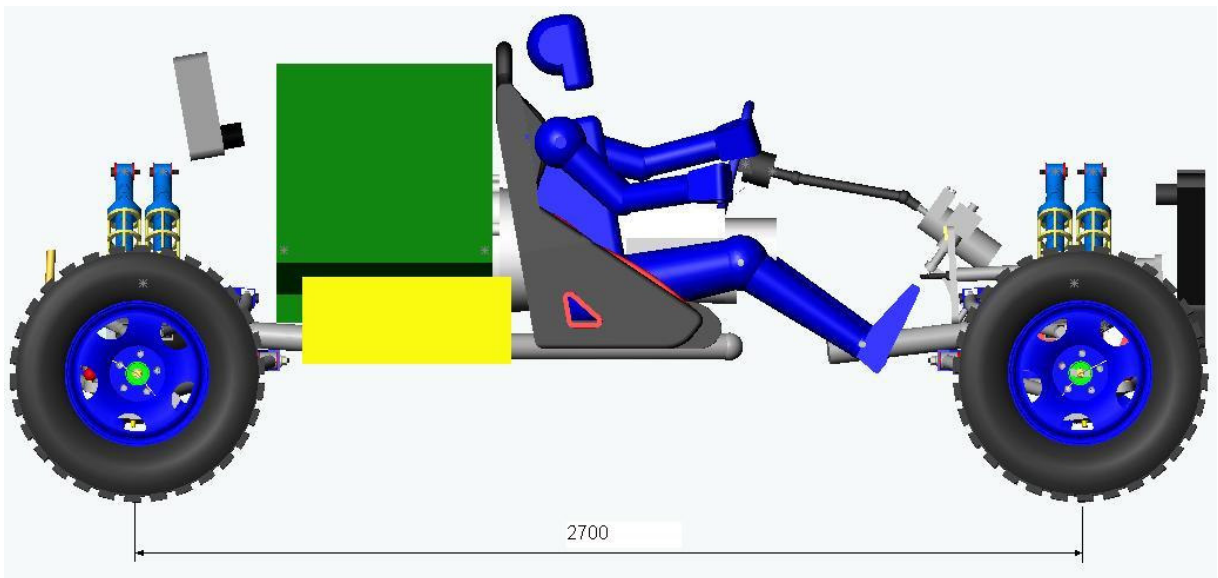


Figura 3.1: Vista lateral do projeto mecânico.

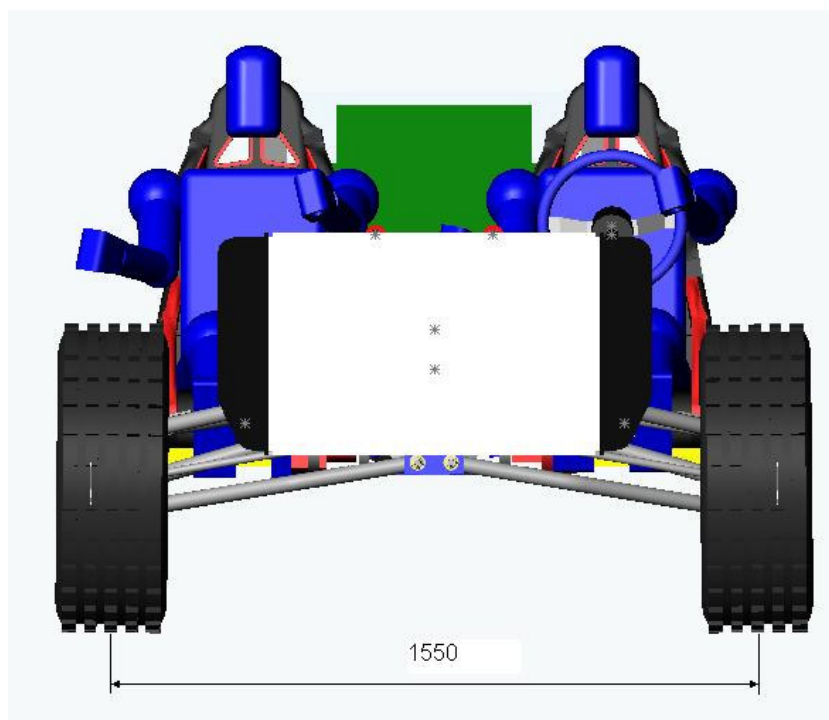


Figura 3.2: Vista dianteira do projeto mecânico.

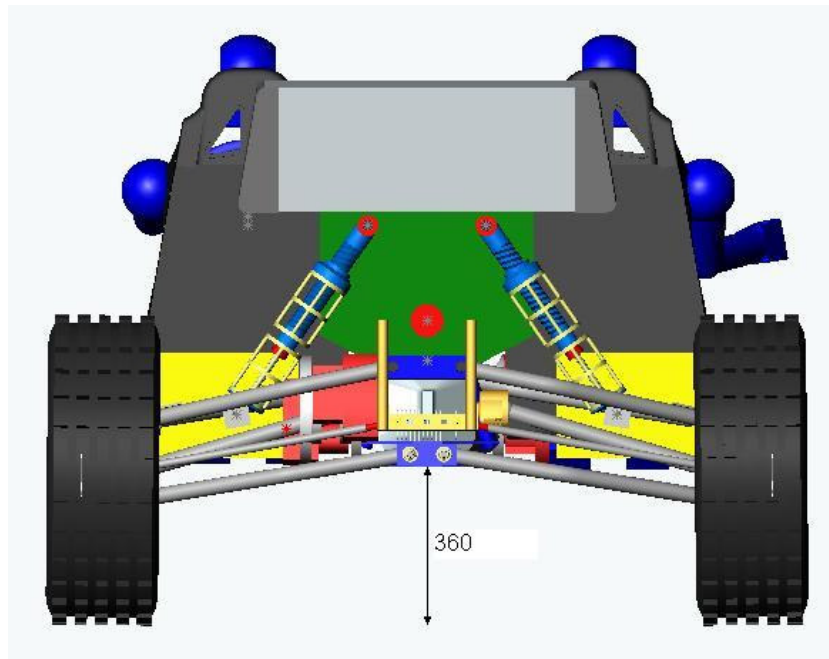


Figura 3.3: Vista traseira do projeto mecânico.

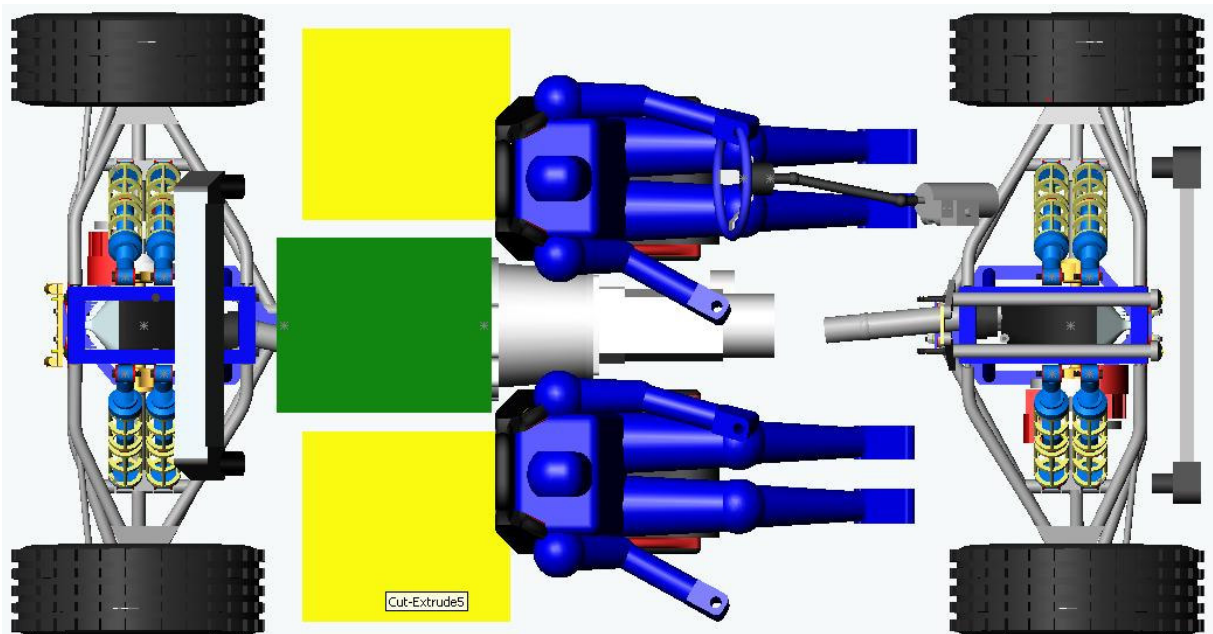


Figura 3.4: Vista superior do projeto mecânico.

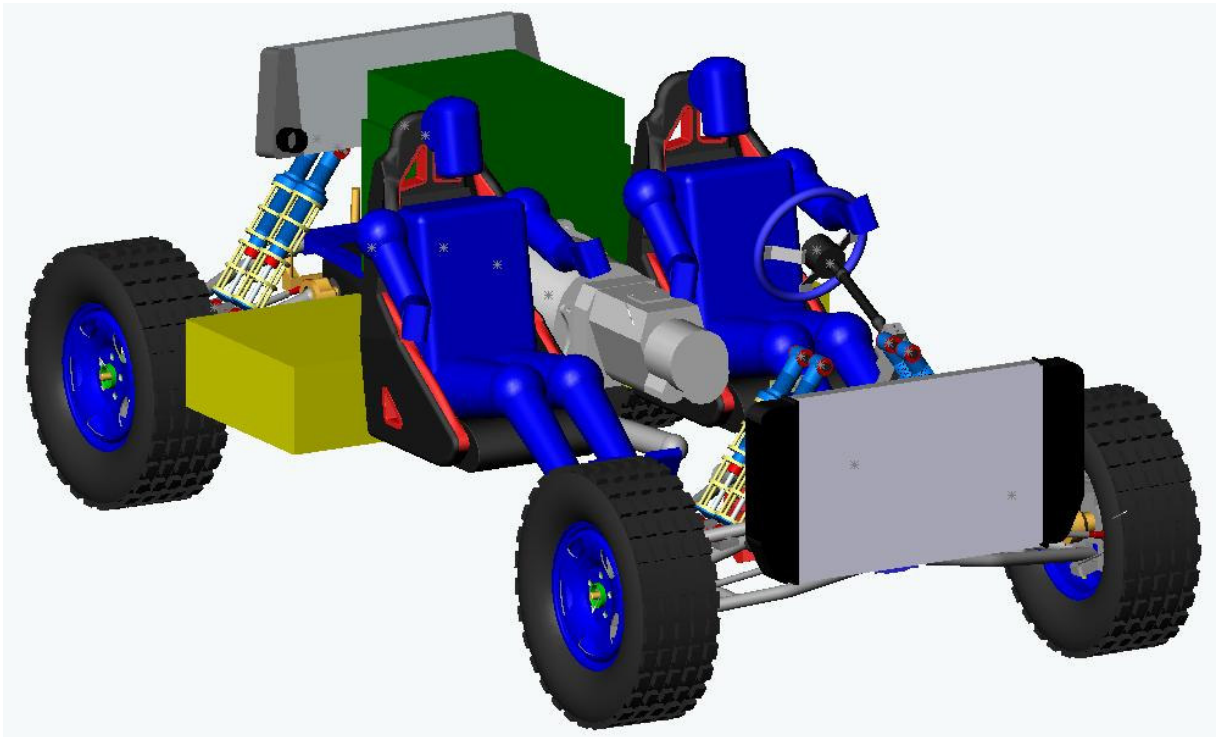


Figura 3.5: Perspectiva dianteira do projeto mecânico.

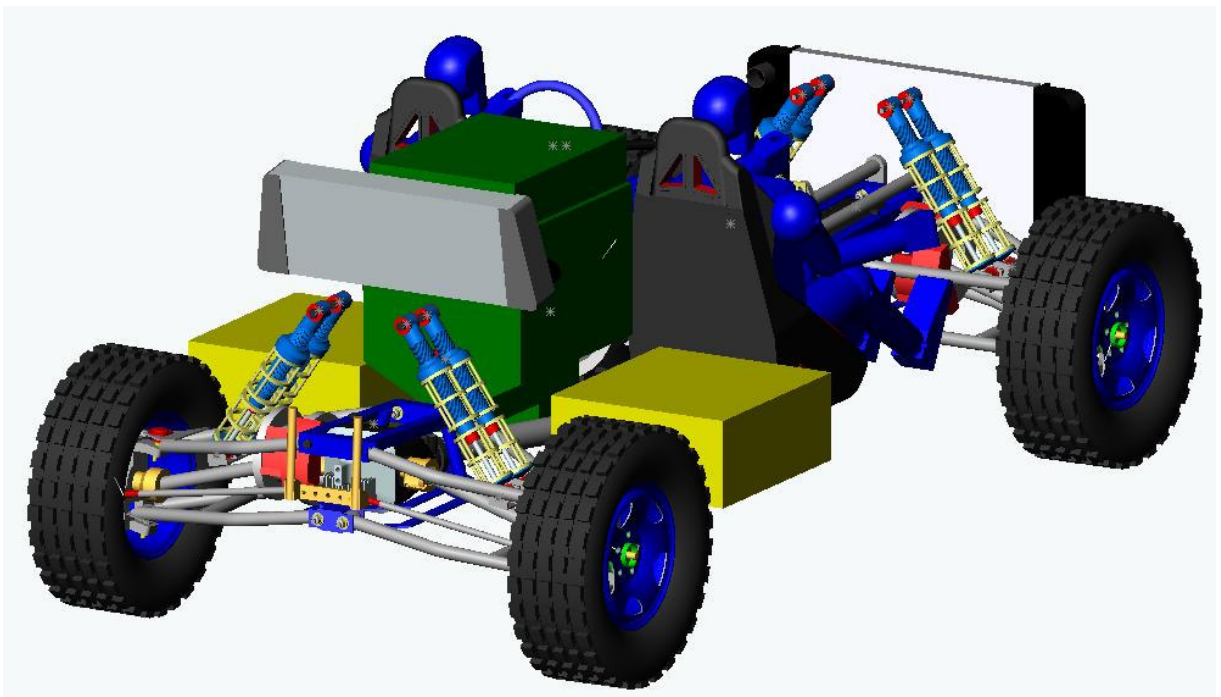


Figura 3.6: Perspectiva traseira do projeto mecânico.

4 PROJETO

O trabalho efetivo no desenho do veículo é iniciado nesse tópico. Primeiramente são selecionadas das literaturas estudadas as principais soluções de projeto que para o veículo em questão podem ser utilizadas e se espera trazerem resultados significativos. A medida do possível essas soluções são empregadas no desenho da carroceria do veículo, logicamente sempre se atendo às limitações que o projeto mecânico coloca, trazendo um desenho primário da carroceria. A partir desse ponto é iniciado um ciclo praticamente iterativo, onde após as análises do desenho primário, diferentes combinações e variações dessas soluções são estudadas, almejando ao final chegar à combinação que apresente a melhor opção de valores para os coeficientes de arrasto e sustentação. Para cada novo desenho é necessária a geração de uma nova malha, e uma nova simulação é realizada, o que toma considerável tempo. Nessa fase de escolhas, opções mais simples de malha e modelo numérico de simulação são utilizadas a fim de otimizar a utilização do tempo. Com isso os resultados apresentados de valores de coeficiente de arrasto e sustentação não necessariamente apresentam grande confiabilidade quantitativa, a análise procura tratá-los de forma qualitativa, observando como a modificação acrescentada alterou o resultado sobre a análise anterior, de maneira positiva ou negativa. Ao final, quando já de posse de um desenho bem estabelecido, uma simulação utilizando malha e modelo numérico mais complexos pode apresentar um resultado com maior precisão.

4.1 Soluções exploradas

Segundo Hucho (1998) o desenho de um veículo muitas vezes pode se iniciar a partir de um corpo genérico, de forma afilada em relação ao escoamento, ou, do

inglês, *streamlined*, que oferece um coeficiente de arrasto extremamente baixo por permitir um fluxo de ar praticamente laminar ao longo de toda sua extensão, sem descolamento ou distúrbios. Sabe-se porém que a aplicação dessa forma em um veículo na grande maioria das vezes é inviável, há uma série de necessidades, de sistemas e componentes do veículo como um todo, que impedem que sua forma resultante seja essa. Comumente, principalmente algumas décadas atrás, o corpo de um veículo se assemelhava muito a uma soma de blocos em forma de paralelepípedos, com faces planas e arestas muito bem definidas. Esse tipo de forma, ao contrário da afilada, gera um fluxo de ar ao seu redor muito longe do ideal, com variações elevadas de pressão próximas às arestas, descolamento do fluxo e geração de turbulência, fatores esses que proporcionam um valor elevado do coeficiente de arrasto. Na prática, o ideal então é trabalhar esse corpo não necessariamente a se aproximar da forma afilada, mas de maneira a eliminar ou amenizar ao máximo possível as diferenças de pressão, distúrbios e descolamentos induzidos pelas não linearidades da carroceria ao longo de sua extensão, objetivando assim a máxima diminuição nos valores dos coeficientes de arrasto e sustentação. Por fim, como complemento para a análise do veículo como um todo, o arrasto é o produto do seu coeficiente pela área frontal do veículo, sendo assim outro objetivo para um bom desempenho aerodinâmico é a diminuição da área frontal.

4.1.1 Área frontal

Como visto na equação 2.6, o esforço de arrasto aerodinâmico é diretamente proporcional à área frontal do veículo, dessa forma, sob o ponto de vista de aerodinâmica, essa área deve ser a menor possível. Logicamente essa área frontal possui um valor mínimo delimitado pelo volume do veículo, no caso largura e altura mínimas do corpo do veículo necessárias para abrigar os componentes mecânicos, e largura e altura mínimas do teto para abrigar os ocupantes. Por se tratar de um veículo de competição, outras considerações como conforto e ergonomia foram feitas, porém não priorizadas. Para garantir o mínimo de segurança e conforto dos ocupantes foram adotadas as dimensões e disposições internas mínimas do

habitáculo regidas pelo regulamento da categoria www.fia.com/sport/Regulations/ccrallyregs (2006 a 2008). Outra solução relacionada com a área frontal é limitar ao máximo a exposição de componentes mecânicos que avancem sob o limite do assoalho, dessa forma o veículo foi projetado de maneira a possuir um limite inferior de posicionamento comum para o máximo de componentes possível. Apenas alguns poucos elementos da suspensão e direção podem ser observados abaixo do nível do assoalho e conseqüentemente gerando uma contribuição para o valor da área frontal.

4.1.2 Dianteira

Entende-se como parte dianteira do veículo componentes como a grade frontal, o pára-choques dianteiro, o capô e demais detalhes que interfiram nas linhas formadas entre eles. Mesmo que partindo da idéia citada acima, onde a dianteira do veículo se assemelha a um bloco em forma de paralelepípedo, há uma série de pontos desse bloco que se trabalhados de maneira adequada podem trazer reduções muito significativas nos valores dos coeficientes de arrasto e sustentação, sendo possível até mesmo chegar a valores muito próximos dos obtidos com um corpo de forma aproximada à afilada.

Uma das mais básicas soluções descritas por Hucho (1998) é a curvatura do plano frontal do veículo no sentido do seu eixo transversal, ou seja, da região da grade e do pára-choques. Combinada a ela, o arredondamento das arestas no plano vertical longitudinal do veículo (arestas de divisão entre grade frontal e capô e entre pára-choques e assoalho) e das arestas no plano horizontal do veículo (extremidades da grade frontal e do pára-choques, região das lanternas) podem trazer ganhos significativos principalmente no valor do coeficiente de arrasto.

Outra opção a ser trabalhada é a inclinação do capô, no sentido longitudinal do veículo de maneira a aumentar seu ângulo com a horizontal, conforme exemplificado na figura 4.1. Essa inclinação ajuda a suavizar a interface entre o plano do capô com a aresta com a grade frontal e também com o pára-brisas, que são regiões onde costumeiramente apresentam baixa e alta pressão

respectivamente. Diminuindo essas diferenças de pressão consegue-se uma redução no valor dos coeficientes de arrasto e sustentação. Somada a isso, uma leve curvatura no plano do capô em seu sentido longitudinal também gera uma pequena contribuição para melhoria dos coeficientes.

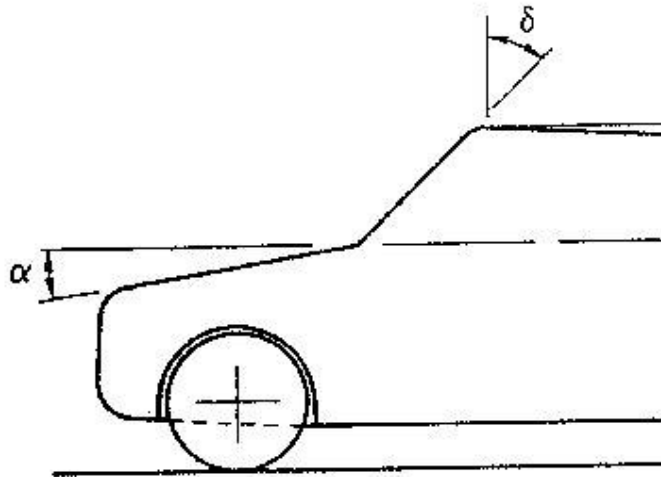


Figura 4.1: Ângulo dos planos do capô e pára-brisas (AERODYNAMICS OF ROAD VEHICLES, 1998).

Outra solução de interesse é a diminuição da altura do ponto extremo frontal. Esse ponto é onde geralmente se observa a região de estagnação, uma região de velocidade relativa praticamente zero e alta pressão, o que contribui fortemente na definição da altura do centro de pressão, conforme pode ser observado na figura 4.2. Dessa forma, quanto mais baixo esse ponto extremo do veículo, mais baixa será a região de estagnação e conseqüentemente a altura do centro de pressão. O efeito dessa variação traz certa influência nos valores dos coeficientes de arrasto e sustentação, porém, segundo Hucho (1998), não existem regras muito bem definidas sobre o comportamento desses valores em função dessas variações, sendo assim simulações são necessárias para verificar as melhores opções. É importante citar que no caso do projeto em questão, por se tratar de um veículo *off-road*, existe uma série de limitações com relação à forma da extremidade frontal do veículo, que acaba deixando pouca liberdade em trabalhar variações de soluções como essa.

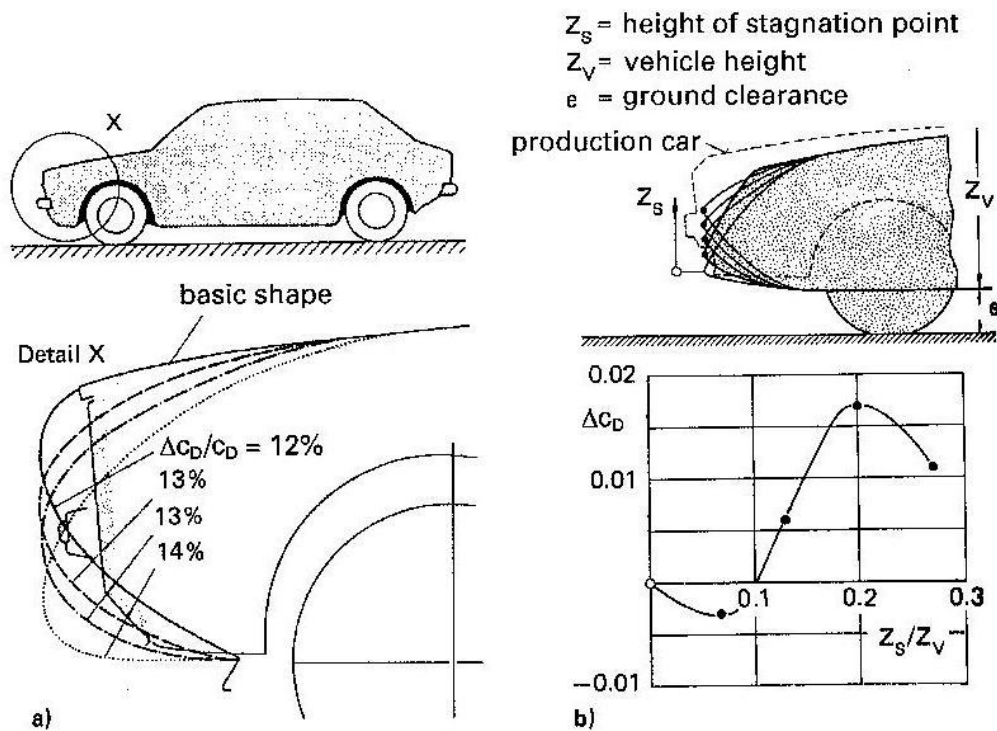


Figura 4.2: Altura do ponto de estagnação e variação do C_d em função da altura do ponto extremo frontal (AERODYNAMICS OF ROAD VEHICLES, 1998).

4.1.3 Pára-brisas e coluna A

Da mesma maneira que a dianteira, o conjunto compreendido pelo pára-brisas, colunas A e carroceria ao redor desses componentes deve possuir forma tal que evite o distúrbio elevado do fluxo de ar e conseqüentemente proporcione uma contribuição reduzida no valor do coeficiente de arrasto e de sustentação. Para essa região também se aplicam soluções semelhantes às citadas acima. Inicialmente, uma leve curvatura do pára-brisas nos sentidos longitudinal e transversal ajuda a suavizar as interfaces com o teto / capô e coluna A respectivamente.

A inclinação do pára-brisas de maneira a aumentar seu ângulo com a vertical no sentido longitudinal, conforme observado na figura 4.1, também traz efeitos significativos sobre os valores dos coeficientes de arrasto e sustentação. Aumentando esse ângulo, as interfaces do pára-brisas com o capô e com o teto tornam-se mais suaves, diminuindo as variações de pressão. Alguns estudos

apontados por Hucho (1998) trazem resultados de análises práticas, onde reduções nos valores para os coeficientes de arrasto e sustentação são encontrados com o pára-brisas em ângulos até 60 graus com a vertical. A partir desse valor as reduções já se tornam menos significativas.

O arredondamento das diversas arestas de interface, entre pára-brisas e teto, pára-brisas e capô e as colunas A também têm forte influência no resultado dos coeficientes. Alguns experimentos apontados por Hucho (1998) apontam que variações do raio de arredondamento até certo valor trazem variações significativas nos resultados, porém a partir desse valor já passam a ser não tão mais representativas. Dessa forma, os valores sugeridos são um bom ponto inicial para o desenho primário. Para pára-brisas e teto e para pára-brisas e capô o valor sugerido é de 100 mm e para a coluna A fica em 150mm. Um exemplo dessa solução é apresentado na figura 4.3.

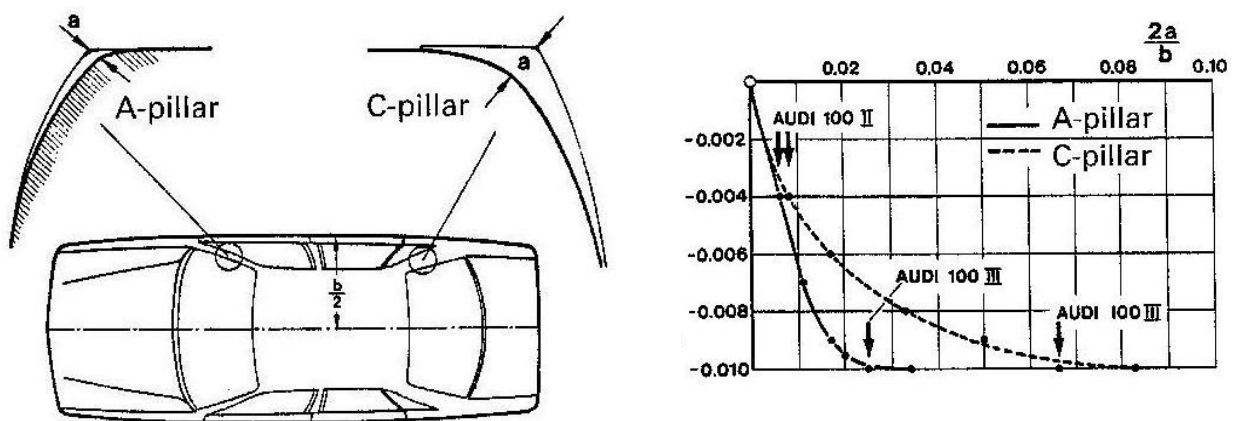


Figura 4.3: Arredondamento das arestas das colunas A e C (AERODYNAMICS OF ROAD VEHICLES, 1998).

4.1.4 Teto

Nesse tópico é considerada apenas a forma do teto no plano vertical longitudinal do veículo. Suas laterais e a coluna C são tratadas nos itens a seguir por possuírem maior interação com os respectivos tópicos. A sugestão básica dada por Hucho (1998) é que uma leve curvatura do teto no sentido citado acima causa uma

diminuição do coeficiente de arrasto. Essa curvatura porém trás um efeito colateral, que é o aumento da área frontal do veículo. Um incremento mais elevado na curvatura aumenta a área frontal a ponto de prejudicar o ganho obtido com a diminuição do coeficiente, resultando num produto coeficiente de arrasto vezes a área frontal maior que o original, conforme demonstrado na figura 4.4. É interessante então através de simulações encontrar o ponto ideal de curvatura do teto onde o produto coeficiente de arrasto vezes área frontal é mínimo. De qualquer forma um valor estimado inicial de curvatura já deve ser utilizado.

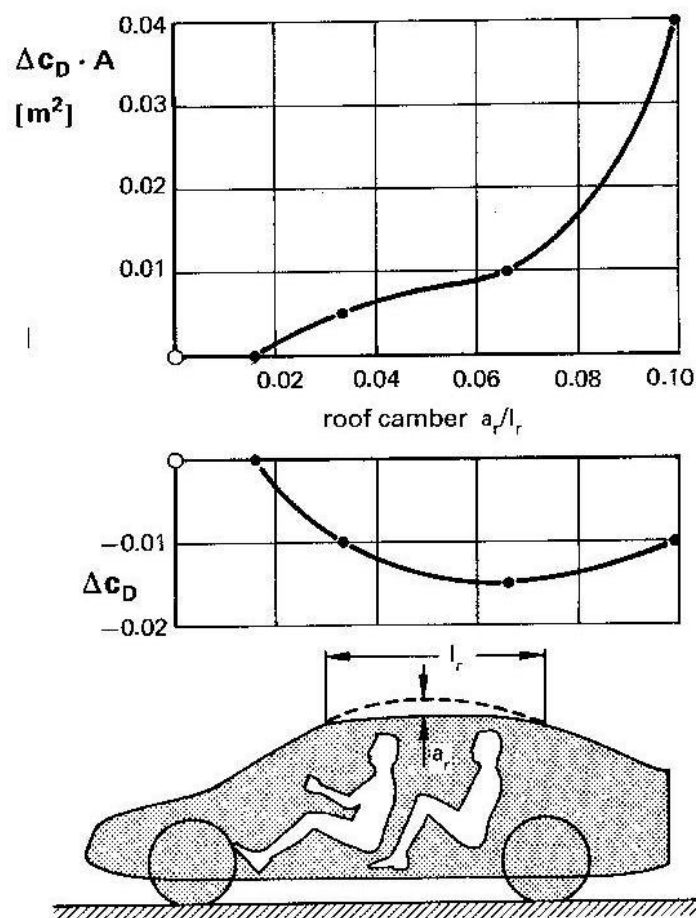


Figura 4.4: Relação entre curvatura do plano do teto e aumento da área frontal e a influência no C_d (AERODYNAMICS OF ROAD VEHICLES, 1998).

4.1.5 Traseira

O bloco definido como traseira compreende praticamente as regiões dispostas atrás das rodas traseiras, como a coluna C, o vidro traseiro, o capô traseiro (o que num sedã comercial usualmente é a tampa do porta-malas), a parte traseira das laterais, as arestas laterais verticais (onde geralmente se encontram as lanternas), o plano vertical traseiro e a extremidade do assoalho. É possível dizer que esse bloco é o que apresenta a maior complexidade de combinações e também o de maior contribuição para o valor do coeficiente de arrasto e de sustentação.

Apesar da vasta opção de formas para a traseira do veículo, algumas delas são muito comumente utilizadas por plataformas comerciais e tratadas com uma denominação comum. Segundo Hucho (1998) as denominações mais comuns são o, *squareback*, *fastback* e *notchback*. De maneira bem simplificada, pode-se descrever que um veículo *squareback* (ou também conhecido como *hatchback*) é aquele que possui a traseira curta e com os planos do vidro e capô traseiros bem alinhados e próximos a vertical, conforme demonstrado no primeiro veículo da figura 4.5. São exemplos dessa denominação a grande maioria dos veículos populares e compactos encontrados no mercado nacional. O *fastback* é o veículo que possui a traseira pouco mais alongada, com plano do vidro e capô traseiros bem alinhados e próximos a horizontal, conforme demonstrado no segundo veículo da figura 4.5. Grande parte dos veículos classificados como esportivos em todo o mundo utilizam essa configuração. Por fim, o *notchback* é o veículo que possui a traseira alongada, com planos do vidro e capô traseiros mais bem definidos entre si e relativamente mais próximos à vertical e horizontal respectivamente, conforme demonstrado no terceiro veículo da figura 4.5. Os sedãs de maneira geral em todo o mundo possuem essa configuração. Teoricamente a melhor configuração sob o ponto de vista de aerodinâmica, que traz os melhores valores de coeficientes de arrasto e sustentação, é a *fastback*, desde que alguns cuidados com relação aos ângulos utilizados nos planos do vidro e capô traseiro sejam respeitados. Essa teoria é confirmada por Hucho (1998) numa coletânea de trabalhos que analisam os resultados de diversas formas, dimensões e ângulos da traseira de um veículo. Esses diversos estudos, dentre eles Ahmed (1984), apontam que à medida que o

ângulo do plano do vidro e capô traseiros em relação à horizontal aumenta, se consegue significativas reduções no valor do coeficiente de arrasto, pois há uma diminuição da área de descolamento, chamada de *deadwake*, logo atrás do plano traseiro do veículo. Esse ângulo porém, ao atingir um determinado valor, faz com que se inicie a formação de um par de vórtices logo após a coluna C, que apesar de reduzir a dimensão do *deadwake* traz como resultado um valor do coeficiente de arrasto maior que a opção de um ângulo muito pequeno, onde o plano traseiro é quase vertical e a região do *deadwake* é maior. Em outras palavras, o escoamento é totalmente anexado e com característica predominantemente laminar sobre esse plano até certo ângulo, a partir do qual vórtices são formados. Esses vórtices se mantêm até certo valor do ângulo, onde o descolamento total do fluxo ocorre. Uma visualização desse efeito pode ser observada também na figura 4.5. Enfim, os resultados dos diversos estudos apresentados por Hucho (1998) apresentam o valor ideal do ângulo dos planos do vidro e capô traseiros próximo a 15 graus. A pior condição, onde os vórtices são mais intensos e a contribuição no valor do coeficiente de arrasto é maior, é o valor do ângulo próximo de 30 graus.

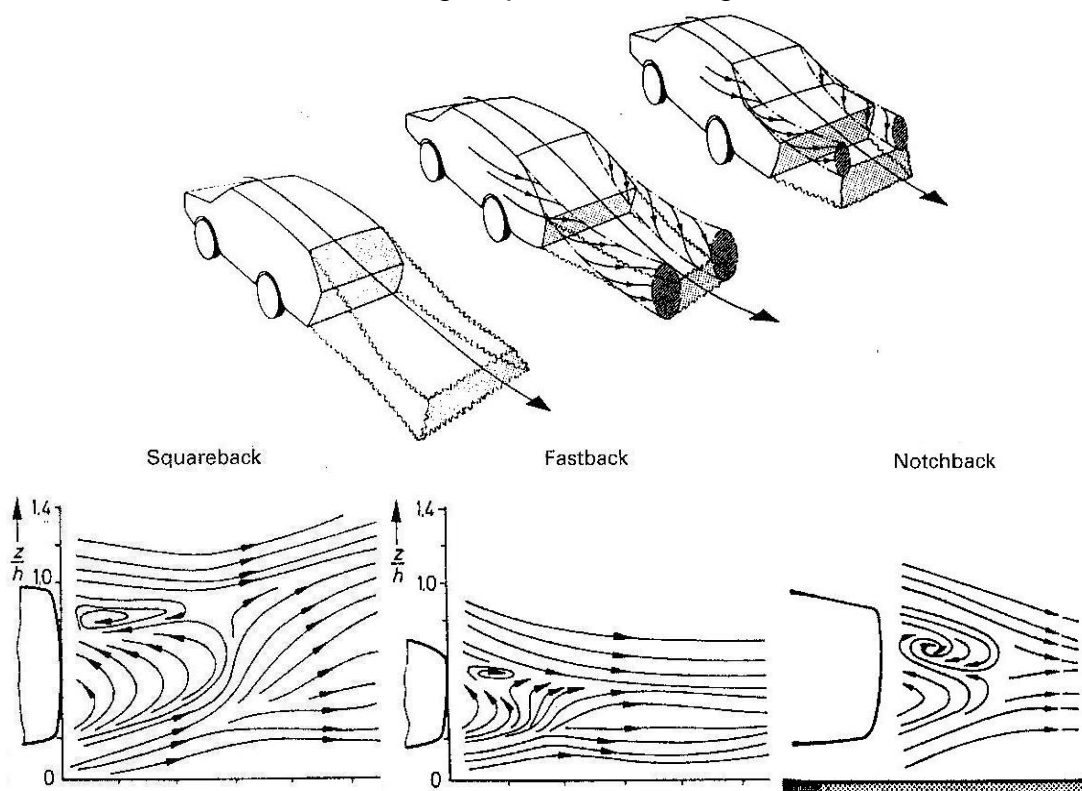


Figura 4.5: Três configurações diferentes para a traseira de um veículo e suas características de escoamento (AERODYNAMICS OF ROAD VEHICLES, 1998).

Outro recurso utilizado na traseira de um veículo para melhoria do valor do coeficiente de arrasto é o chamado *boat-tailing*, demonstrado na figura 4.6. Esse recurso consiste em diminuir gradualmente a largura da carroceria à medida que se aproxima da extremidade traseira do veículo, fazendo com que se assemelhe às linhas de um casco de embarcação, como o termo em inglês sugere. Da mesma maneira que o item anterior, Hucho (1998) oferece uma compilação de resultados de diversos estudos práticos, onde um valor ideal dessa inclinação do plano lateral em relação ao plano vertical longitudinal do veículo fica próximo a 10 graus.

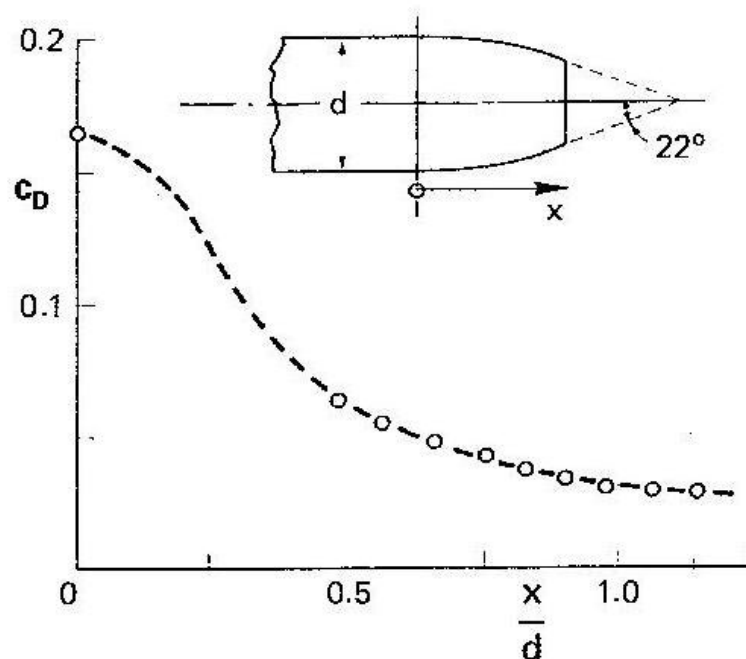


Figura 4.6: *Boat-tailing* da traseira e seu efeito no C_d (AERODYNAMICS OF ROAD VEHICLES, 1998).

O arredondamento das arestas laterais verticais também é uma solução que traz variações significativas no coeficiente de arrasto. Esse recurso possui uma característica interessante que quando combinado com a inclinação do plano do vidro e capô traseiros faz com que o ângulo de inclinação desse plano não faça tanto efeito no coeficiente de arrasto do que na condição onde as arestas são mais abruptas. Nesse caso, o parâmetro mais influente na variação do arrasto se torna a altura do plano vertical traseiro. Os estudos apresentados por Hucho (1998) sobre esse assunto não são tão conclusivos, não existe uma recomendação ou um valor a ser usado que sirvam com um bom ponto de partida para obtenção de um baixo coeficiente de arrasto. Essa condição abre margem para uma série de simulações,

entre diferentes combinações de ângulos de inclinação do plano e arredondamento das arestas, porém uma opção que pode simplificar bastante é fazer a comparação entre uma condição com arestas arredondadas e outra com as arestas abruptas.

Uma última solução importante que pode ser trabalhada é a inclinação da extremidade final do assoalho do veículo, o que é chamado por alguns autores como difusor, conforme demonstrado na figura 4.7. Essa solução traz ganhos significativos no coeficiente de arrasto, mas também muito significativos no coeficiente de sustentação. O fluxo de ar que corre abaixo do veículo está confinado a certo volume, dado pela altura livre do solo do veículo. Se ao se aproximar da traseira do veículo esse volume passa a ser gradativamente maior, uma diminuição na distribuição de pressão nessa parte inferior traseira do veículo é observada. Essa diminuição na pressão em baixo do veículo conseqüente contribui para a diminuição do valor do coeficiente de sustentação. Essa contribuição porém está diretamente relacionada com a altura livre do solo do veículo. Se o veículo é muito alto, a variação do volume de ar dada pelo difusor acaba sendo bem menor, conseqüentemente o ganho em pressão também é menor. Além disso uma altura livre do solo elevada permite grande troca de fluxo de ar com as laterais, amenizando também dessa forma os ganhos de pressão. O coeficiente de arrasto por sua vez também tende a diminuir com o uso dessa solução. Com a inclinação do assoalho a área vertical traseira se torna menor, diminuindo a dimensão do *deadwake*. Da mesma maneira que nas outras soluções acima, existe um limite para o valor do ângulo, porém com um valor não tão bem definido. Um estudo apresentado por Hucho (1998) mostra que um difusor com maior extensão e um menor ângulo gera ganhos mais significativos do que um com menor extensão e maior ângulo. Nesse caso simulações podem mostrar para o caso específico qual seria o ponto ideal desse ângulo.

Por fim, pode-se ver que as possibilidades isoladas de melhoria para a traseira de um veículo são diversas, quando combinadas então geram uma infinidade de opções. Uma seqüência interessante a ser abordada é a simulação de cada uma dessas opções individualmente a fim de entender seu grau de contribuição e uma faixa ideal para seus parâmetros. Tendo isso, a combinação entre elas pode ser gradativamente estudada, adicionando uma a uma e observando a variação dos valores dos coeficientes.

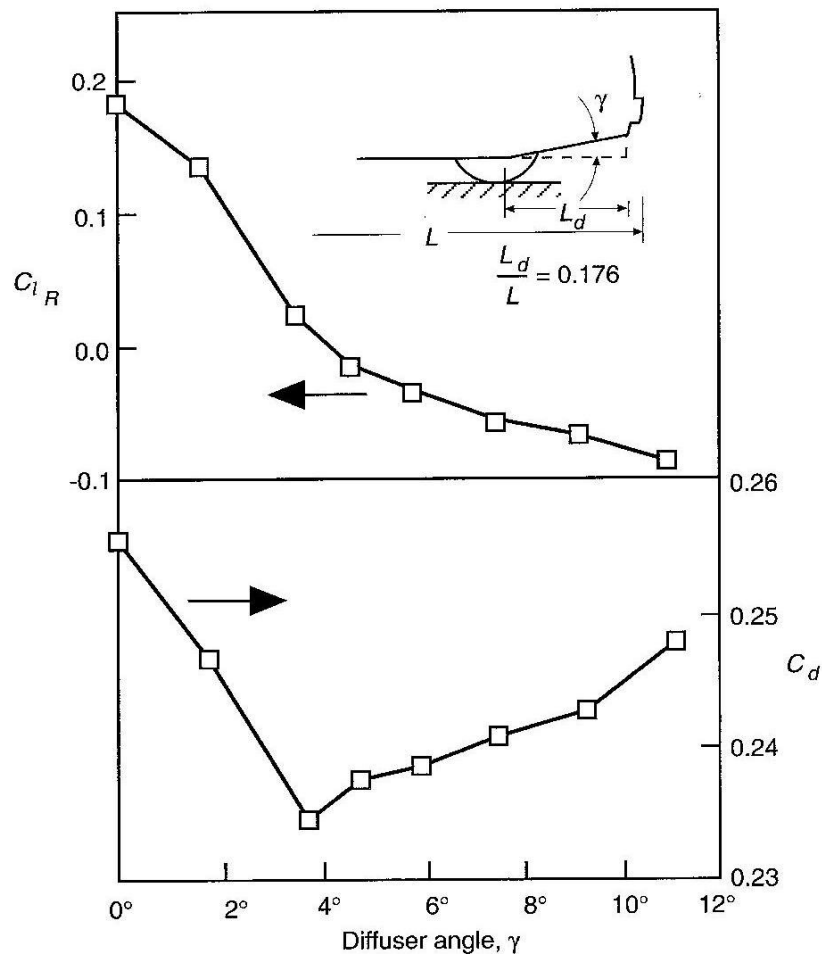


Figura 4.7: Inclinação da parte posterior do assoalho – difusor – e sua influência no C_d (RACE CARS AERODYNAMICS, 2005).

4.1.6 Laterais

Segundo Hucho (1998), da mesma maneira que ocorre com o teto a curvatura do plano lateral do veículo tende a gerar uma diminuição no valor do coeficiente de arrasto, porém também gera o efeito colateral que é o aumento da área frontal, conforme demonstrado na figura 4.8. Dessa forma, apesar de ocorrer uma diminuição do coeficiente, o produto coeficiente vezes área, dependendo da intensidade da curvatura, pode ser maior que a condição de lateral plana. Novamente, simulações de diferentes valores são necessárias para encontrar o valor ideal. Essa solução é complicada de ser explorada na grande maioria dos veículos comerciais, em geral as medidas de entre-eixos e bitola são limitadas por fatores

mecânicos, e por questões de dinâmica veicular procura-se explorar ao máximo a largura do veículo para a disposição das rodas. Dessa forma, os pára-lamas dianteiros e traseiros já costumam estar no limite da largura do veículo, o que dificulta ou até mesmo impede a possibilidade de curvatura do plano lateral.

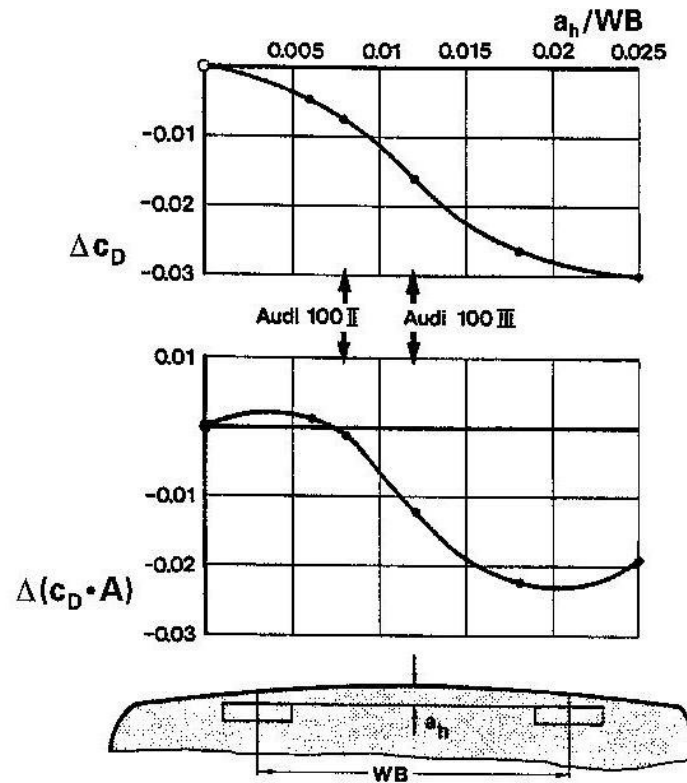


Figura 4.8: Curvatura do plano lateral e sua influência no C_d (AERODYNAMICS OF ROAD VEHICLES, 1998).

As bordas dos pára-lamas, assim como qualquer outro volume ao longo dos planos do veículo, devem ser o mais suaves que seja o possível para evitar o distúrbio do fluxo. Isso muitas vezes vêm em confronto com questões de *design*, dificilmente se vê hoje veículos comerciais sem linhas bem delineadas nos pára-lamas. Se no entanto forem observadas as linhas de veículos super esportivos, ou de competição em categorias como esporte-protótipo, vê-se claramente a busca por linhas muito suaves praticamente ocultando o delineamento das bordas dos pára-lamas. Dessa forma, em se tratando de um veículo de competição onde *design* é das últimas prioridades, a opção de bordas de pára-lamas suaves é dada como definitiva.

Os recessos necessários para a montagem das janelas laterais também é um item de pequena, porém significativa contribuição no valor do coeficiente de arrasto. No entanto, de acordo com os resultados apresentados por Hucho (1998) mostram que recessos menores que 5mm passam a não apresentar contribuições significativas, dessa forma, no projeto em questão, as análises são realizadas considerando as laterais completamente lisas, sem recessos, pois se espera que a solução mecânica adotada para a fixação dos vidros consiga atingir esse valor. A questão dos recessos ao longo do corpo do veículo, principalmente nas janelas, na verdade traz efeitos mais consideráveis sob o ponto de vista de ruídos causados pelo vento do que sobre o arrasto. Mesmo não afetando o coeficiente, um recesso igual ou até mesmo menor que 5mm ainda traz significativas contribuições sobre esse efeito, onde soluções de suavização das bordas são estudadas. Novamente, se tratando de um veículo de competição a questão do ruído também não é tratada como prioridade, logo as variações desse parâmetro não serão estudadas.

4.1.7 Assoalho

Segundo Puhn (1981), Hucho (1998) e Katz (2006) um dos fatores de grande contribuição no valor do coeficiente de arrasto C_d é o assoalho do veículo. Quanto menos irregularidades existirem ao longo da superfície externa do assoalho menor será o distúrbio do fluxo de ar em baixo do veículo, conseqüentemente menor será o valor de C_d . Dessa forma o projeto mecânico do veículo, assim como citado no capítulo anterior, foi feito de maneira a possuir um limite inferior de posicionamento comum para o máximo de componentes possível, permitindo que o assoalho fosse completamente plano. A principal desvantagem desse tipo de adotar um assoalho completamente plano sem aberturas, recessos, ou erupções, é de selar os compartimentos do veículo e eliminar a circulação de ar por eles necessária para arrefecimento de alguns componentes. No veículo em questão a solução do assoalho plano é utilizada, dessa forma essa preocupação obviamente existe. Dessa forma, cada componente do veículo que necessita captação ou rejeição de ar para alimentação ou arrefecimento é estudado individualmente posteriormente. Essa questão se combina com outro fator trazendo características interessantes. Para

evitar a perturbação do fluxo abaixo do veículo devido às irregularidades, uma solução é minimizar esse fluxo de ar, obstruindo sua passagem. Isso é conseguido diminuindo a altura do veículo em relação ao solo ou com a adição de *spoilers* logo na extremidade frontal inferior da carroceria. Essa solução porém não se torna tão efetiva quando o assoalho do veículo é perfeitamente plano, dessa forma, no caso do veículo em questão, que por sua característica *off-road* possui altura livre do solo elevada, incentiva os esforços em tornar o assoalho o mais plano possível.

Apesar de o projeto mecânico facilitar a adoção do assoalho plano, ainda alguns poucos componentes de suspensão e direção excedem essa linha limite e geram uma contribuição para o distúrbio do fluxo de ar em baixo do veículo. A contribuição desses componentes no valor de C_d é estudada e formas de amenizá-la são propostas. A figura 4.9 exemplifica o ganho obtido individualmente quando suavizadas algumas superfícies do assoalho de um veículo.

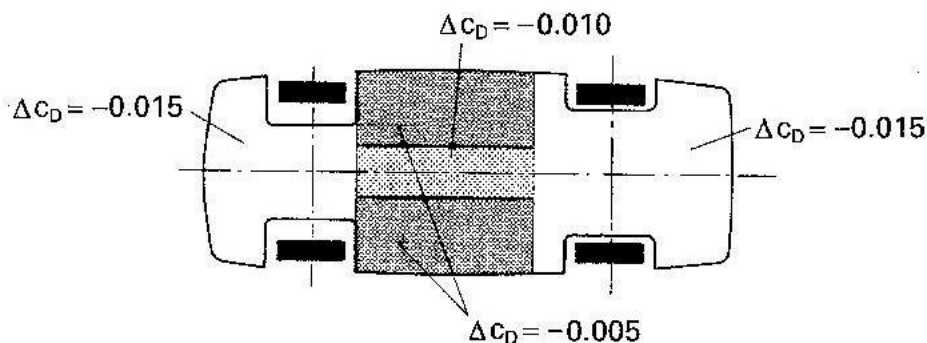


Figura 4.9: Redução de C_d pela suavização de superfícies do assoalho (AERODYNAMICS OF ROAD VEHICLES, 1998).

4.1.8 Rodas e caixas de rodas

Esse é um item de extrema importância, os efeitos provocados pelas rodas e caixas de rodas são de grande contribuição nos valores dos coeficientes de arrasto e sustentação do veículo. Estudos observados por Hucho (1998) em veículos com forma afilada apontam que essa contribuição pode chegar a aproximadamente 50% do valor total do coeficiente de arrasto do veículo. Três efeitos observados no fluxo de ar ao redor de rodas são citados por Hucho (1998), que interagem de forma muito

forte e complexa entre si, causando grande dificuldade para seu tratamento. O primeiro é que o conjunto das rodas e pneus é muito distante da forma afilada e ainda é relativamente mais complexo que um simples cilindro, estando em rotação tocando o solo. Isso faz com que o fluxo ao seu redor seja perturbado de formas muito complexas, conforme demonstrado na figura 4.10. Segundo, o ar que atinge a extremidade dianteira do veículo chega às rodas com certo ângulo em relação ao eixo longitudinal do veículo, o que torna o fluxo de ar que atinge as rodas mais complexo do que se esse fosse perfeitamente alinhado com o eixo longitudinal. Hucho (1998) apresenta alguns estudos sobre a influência desse ângulo no coeficiente arrasto, conforme demonstrado na figura 4.11. Por fim, um conjunto de roda e pneu está em rotação dentro de um volume que é caixa de roda, mais uma vez colocando complexidade no fluxo observado. De maneira geral, quanto maior for o volume livre entre o conjunto e a caixa de roda, maior é a liberdade para ocorrência de perturbações no fluxo, e conseqüentemente maiores serão os coeficientes de arrasto e principalmente de sustentação. Hucho (1998) apresenta alguns estudos que colocam relações entre o volume da caixa de rodas e os coeficientes, como pode ser observado na figura 4.12.

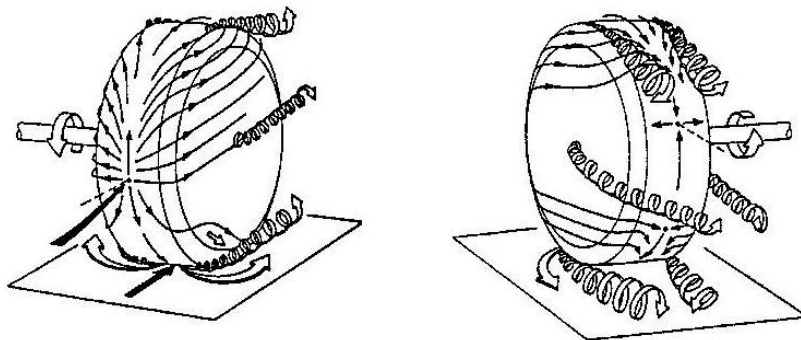


Figura 4.10: Perturbação do fluxo de ar sobre um conjunto de roda em rotação (AERODYNAMICS OF ROAD VEHICLES, 1998).

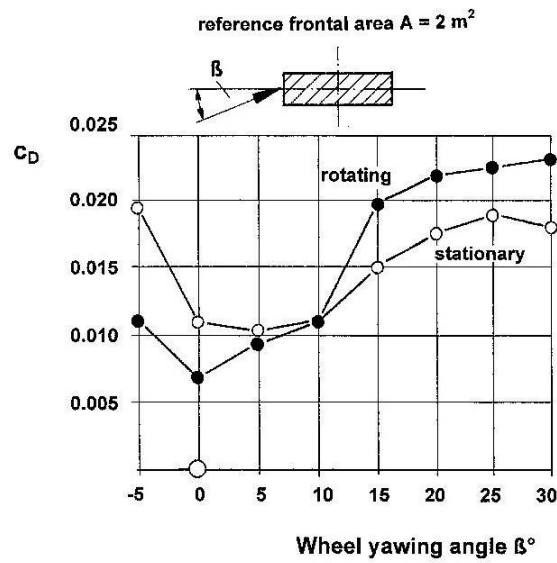


Figura 4.11: Angulo de ataque do fluxo de ar sobre o conjunto de rodas e sua influência no C_d (AERODYNAMICS OF ROAD VEHICLES, 1998).

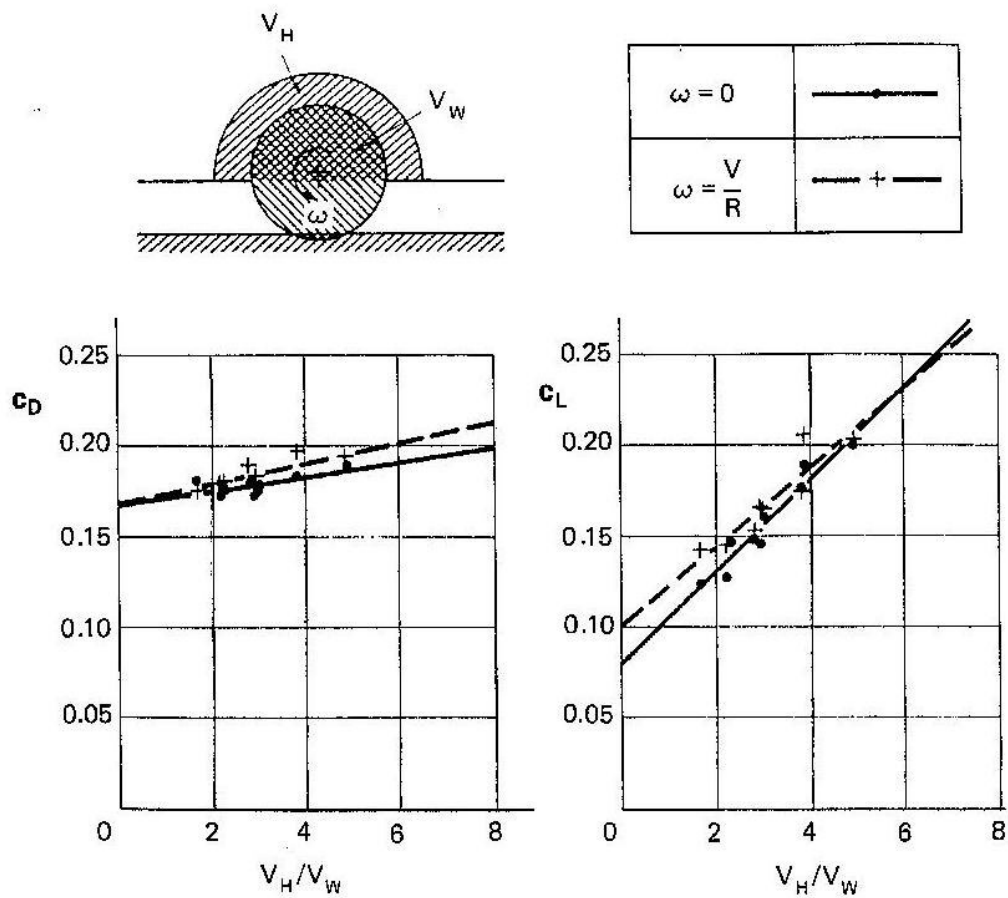


Figura 4.12: Influência da relação entre os volumes do conjunto de rodas e da caixa de rodas em C_d e C_l (AERODYNAMICS OF ROAD VEHICLES, 1998).

De maneira genérica, considerando esses três efeitos, é razoável pensar que um bom projeto deve expor o mínimo possível o conjunto de roda e pneu ao fluxo de ar causado pelo veículo em movimento. Isso implica em soluções como reduzir a altura livre do veículo em relação ao solo, *spoilers* ou aletas que direcionem o fluxo para fora das rodas ou de maneira a evitar o ângulo, e adoção de caixas de rodas de dimensões reduzidas.

4.1.9 Anexos

Anexos são componentes do veículo ou acessórios posicionados externamente à carroceria, como espelhos retrovisores, antenas, maçanetas, captações de ar, suporte para cargas, etc. Esses componentes quando analisados individualmente possuem coeficiente de arrasto elevado, devido a sua forma bem particular, porém quando analisados no conjunto sua contribuição para a área frontal é tão pequena que a alteração no coeficiente de arrasto se torna pouco significativa ou praticamente nula. O principal desses componentes é o espelho retrovisor. Segundo Hucho (1998) no passado, quando esses se assemelhavam à forma de uma placa circular plana, seu coeficiente de arrasto chegava a ser da ordem de 1,2. Considerando um bom projeto como dos veículos atuais, esse valor pode ser 0,4. Ainda sob a mesma referência, um valor razoável para ser adotado é de 0,5. Para o veículo em questão o único anexo relevante a ser considerado é o par de retrovisores, porém ainda assim não se preocupou em considerar sua influência no ciclo de análises, mas apenas ao final sugerir um incremento nos valores da área frontal e do coeficiente de arrasto. Hucho (1998) aponta uma fórmula para calcular essa contribuição baseado no valor estimado do coeficiente de arrasto individual do anexo e sua área frontal:

$$c_{DM} = \frac{D_M}{\frac{\rho}{2} V^2 A} = C_{DM} \frac{A_M}{A} \left(\frac{V_M}{V} \right)^2 = 0.004 \quad (4.1)$$

Onde para esse cálculo é sugerida a velocidade média do fluxo ao redor do retrovisor aproximadamente 30% maior que a velocidade V^∞ .

4.2 Desenho da carroceria

Nesse item é descrito como foram definidas as diversas soluções adotadas no desenho da carroceria. Antes de iniciar a discussão é importante ficar claro nesse ponto que a seqüência apresentada não necessariamente segue uma ordem cronológica. Ao invés disso, para melhor exposição e entendimento das soluções adotadas, procurou-se nesse item organizar essas soluções e seus detalhamentos por blocos do veículo. Na seqüência prática de trabalho, partindo do desenho inicial e seus resultados, a cada bloco cabe uma série de modificações até que o resultado desse bloco individualmente atinja satisfatório nível de maturidade. Esse passo é realizado bloco a bloco, até que após tratados de forma individual, é feita uma a uma a combinação entre as melhores soluções de cada um desses blocos, observando se o resultado é positivo ou não. Sendo positivo a solução é adota, e em caso negativo é descartada, porém em certas vezes algumas das dadas soluções descartadas são novamente analisadas no conjunto, pois a interação com uma nova solução adicionada pode alterar o resultado. Enfim, a determinação da adoção de soluções se torna um processo iterativo, como muitas delas interagem entre si, uma definição dada para uma solução é conseqüente da definição de outra. Portanto nesse item procurou-se ater apenas à descrição e detalhamento das soluções estudadas. Os resultados provenientes de cada uma delas e das diversas combinações analisadas são apresentados no capítulo seguinte.

A carroceria do veículo deve fundamentalmente envolver todos os componentes mecânicos e o habitáculo dos ocupantes do veículo. De maneira geral, em um veículo comercial de passeio, quase a totalidade dos componentes mecânicos do veículo se encontram abaixo da linha envidraçada, como motor, transmissão, suspensão, rodas, etc., sendo envolvidos pelas partes da carroceria como grade frontal, capô, pára-lamas, lataria das portas, etc. Acima dessa linha estão normalmente apenas os ocupantes acima da linha de seus ombros, envolvidos pelo pára-brisas, janelas laterais e traseira e o teto. Dessa forma, desde o início do desenho da carroceria esses dois blocos ficam muito bem definidos, sendo inclusive tratados de maneira bem independente. O desenho do bloco abaixo dessa linha fica

condicionado prioritariamente ao envolvimento dos componentes mecânicos do veículo, e o desenho do bloco acima da linha prioritariamente ao envolvimento dos ombros e cabeça dos ocupantes. Por simplificação, a partir desse ponto, nesse capítulo, esses blocos serão tratados apenas como corpo e teto respectivamente.

4.2.1 Área frontal

Como citado no item 4.1.1, há uma intenção de se limitar a área frontal ao mínimo, sendo assim, tanto corpo quanto teto devem ser os mais estreitos e baixos possíveis. As larguras do corpo e a do teto praticamente não possuem relações entre si, já altura final do veículo é a soma da altura do corpo com a do teto.

No caso da largura do corpo, está fundamentalmente condicionada à bitola do veículo. Sendo esse valor 1550 mm tanto para dianteira quanto traseira na condição de maior extensão, somado à largura dos pneus que é de 235 mm, deixou-se uma pequena folga entre o arco dos pára-lamas e os pneus, resultando num valor de 1820mm de face a face externas dos pára-lamas, conforme observado na fig. 4.13. A altura do corpo, observando os desenhos mecânicos do veículo, acabou sendo também delimitada em função de envolver os pneus na condição de maior compressão da suspensão. No caso do veículo em questão, por se tratar de um *off-road*, tem uma característica especial que é possuir pneus com dimensões acentuadas e curso de suspensão elevado, o que resulta em caixas de rodas enormes. Conseqüentemente o corpo deve prever essa característica, resultando numa altura mínima de 690 mm, conforme apresentado na fig. 4.14. Dadas essas dimensões limítrofes para o corpo, foi iniciado um processo de delineamento da carroceria, ajustando sua forma para que a projeção da área frontal seja exatamente o suficiente para o envolvimento dos componentes. Sendo assim, conforme pode ser também observado na figura 4.14, uma curvatura na linha lateral e uma inclinação nas extremidades da linha superior foram adicionadas para acompanhar a posição do pneu em função de seus movimentos causados pelo trabalho da suspensão e da direção.

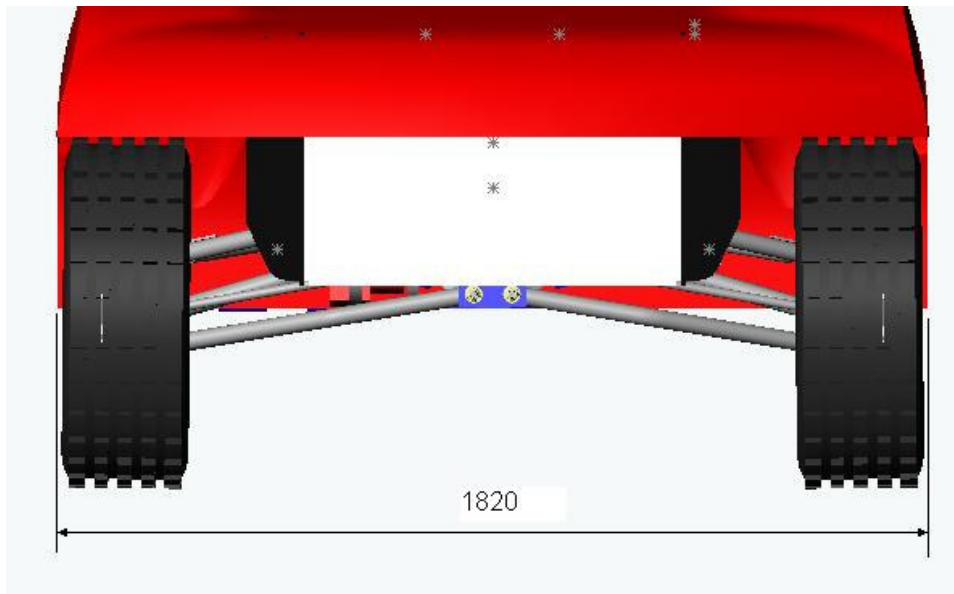


Figura 4.13: Largura mínima do corpo.

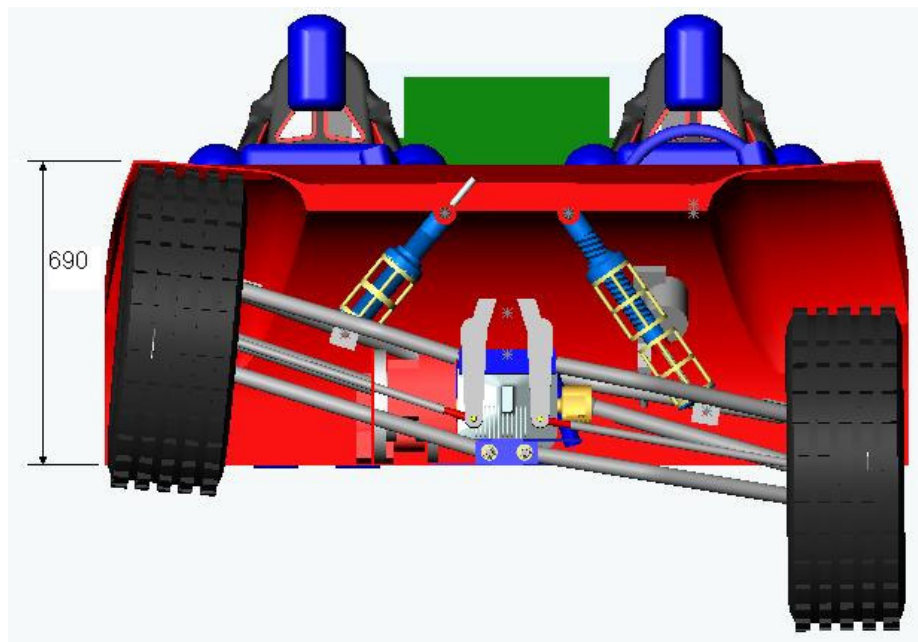


Figura 4.14: Altura mínima do corpo e linhas de adequação ao curso do pneu.

Para o caso do teto, sua largura está diretamente condicionada ao envolvimento dos ocupantes, no caso o suficiente para acomodar com relativo conforto e segurança seus ombros na região da base, e podendo se estreitar um pouco no topo onde deve acomodar suas cabeças. Deve se considerar também uma pequena distância entre os ocupantes, necessária para acomodar alguns componentes mecânicos. Sendo assim, a largura mínima necessária do teto deve

ser de 1600 mm na base. Pela característica do projeto como um todo foi encontrada nesse ponto uma limitação: os pára-brisas dos veículos modernos, pela sua forma, são componentes de manufatura muito complicada, sendo tecnicamente e financeiramente impeditiva a construção de uma peça específica para o veículo em questão. Dessa forma, a solução encontrada foi a utilização de um pára-brisas de um veículo comercial. Os critérios considerados para essa escolha foram as dimensões mínimas necessárias, teórica eficiência aerodinâmica do veículo doador (pontos citados no item 4.1.3) e de fácil aquisição (disponibilidade e preço). Sendo assim, o pára-brisas tido como melhor opção foi o do veículo Chevrolet Astra. Seu pára-brisas atende as dimensões necessárias, é um veículo de boa eficiência aerodinâmica em relação aos outros modelos comerciais, onde de acordo com www.chevrolet.com.br (2007) seu coeficiente de arrasto é de 0,30 na versão sedã e 0,31 na versão *hatch*, e por fim possui grande disponibilidade de peças de reposição no mercado. Suas dimensões foram obtidas de medições práticas, sendo que sua largura na base é de 1350 mm. A essa largura é adicionada a largura das colunas A (citadas em detalhes adiante) e uma pequena curvatura do teto na região longitudinal do veículo correspondente à posição dos ombros dos ocupantes, resultando na largura mínima de teto de 1600 mm. A figura 4.15 exemplifica esse resultado. Por fim, a altura do teto é definida em função do valor já obtido da altura do corpo, onde a soma das duas deve corresponder à altura mínima necessária da carroceria do veículo. Essa altura da carroceria como um todo foi definida em função dos requerimentos mínimos de segurança e conforto regulados pela Federação Internacional de Automobilismo para a categoria em questão www.fia.com/sport/Regulations/ccrallyregs (2006 a 2008), resultando em 1100 mm desde o assoalho até o teto. Sendo assim, como o comprimento do pára-brisas do Chevrolet Astra é de 875 mm, sua inclinação no veículo foi de 62 graus com a vertical, gerando uma altura de 410 mm, o que somada à altura do corpo e da aresta de interface com o teto (citada em detalhes adiante), e considerando seu posicionamento de 30 mm abaixo da linha do corpo (necessária para acondicionamento do limpador de pára-brisas) resultou nos 1100 mm definidos.

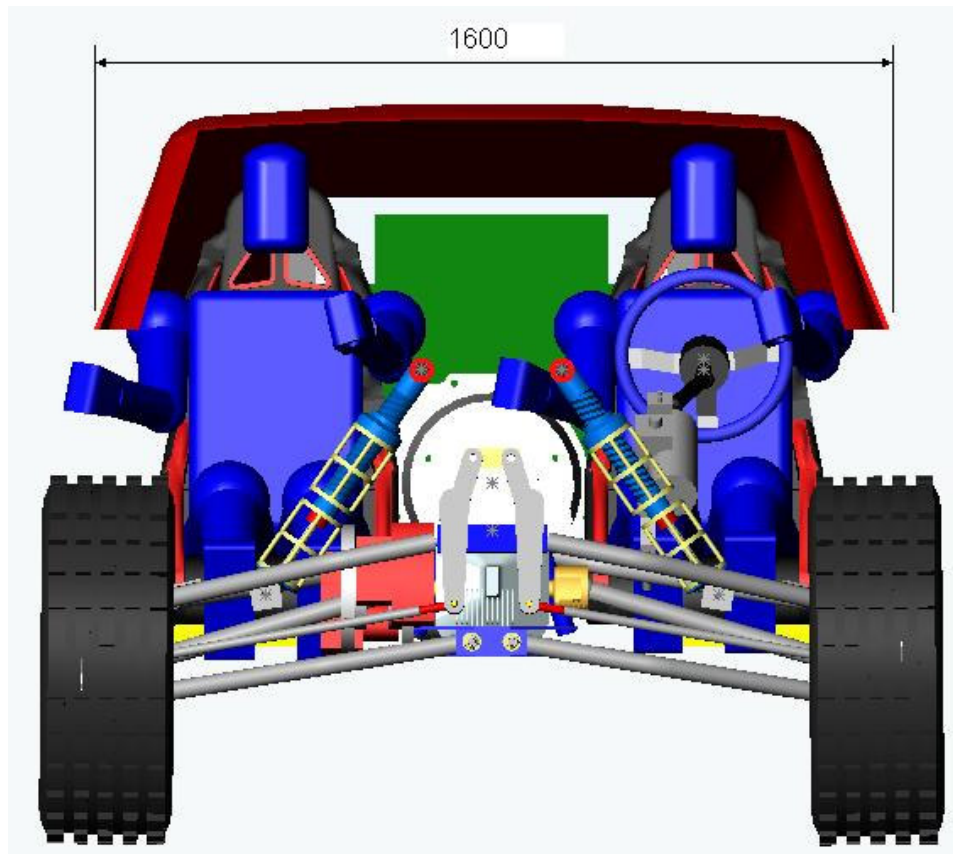


Figura 4.15: Largura da base do teto.

Enfim, dadas todas essas dimensões, somando a área dos pneus, a área frontal do veículo no desenho inicial pode ser definida, conforme observado na figura 4.16, sendo de $2,11 \text{ m}^2$. Pequenas alterações no desenho ao longo do projeto trouxeram variações nesse resultado, onde o melhor valor obtido foi de $2,08 \text{ m}^2$, presente na versão final do desenho. Esse valor considera os principais componentes, corpo, teto e pneus, no momento desconsiderando acessórios e detalhes como retrovisores, captações de ar, componentes de suspensão que avançam sob a linha do assoalho, etc. Isso porque esses acessórios e detalhes não são inseridos no desenho utilizado nas simulações principais.

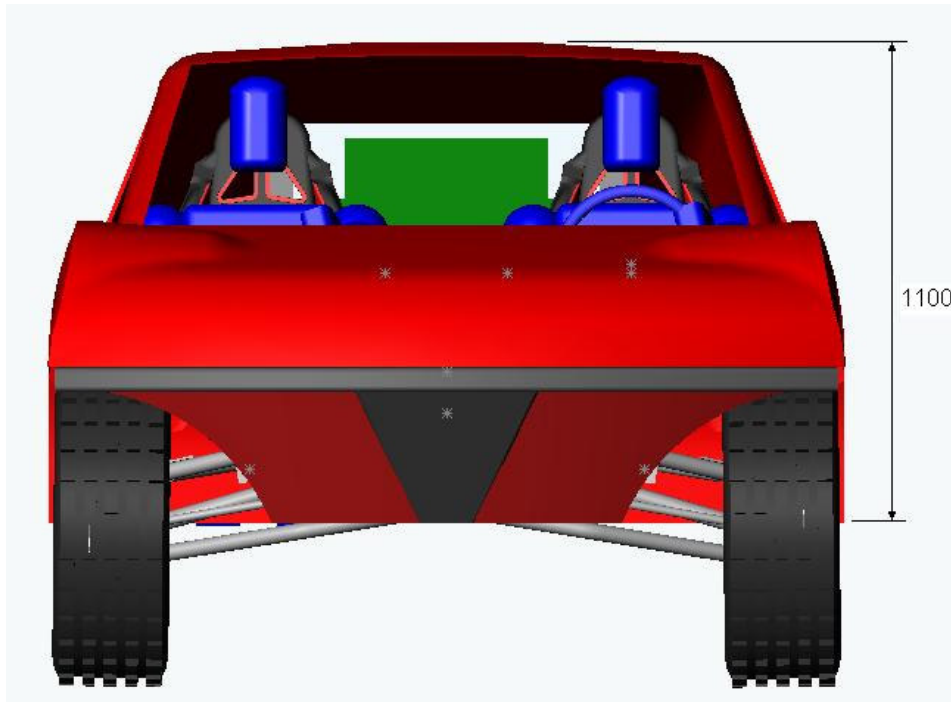


Figura 4.16: Altura do corpo área frontal final.

4.2.2 Dianteira

O desenho da dianteira se apóia em uma premissa do projeto mecânico do veículo que é possuir o ângulo de ataque de 70 graus. Para obter esse valor elevado do ângulo a parte da carroceria que se avança adiante da extremidade dos pneus deve se ao mesmo tempo alta e curta. Isso é um fator de bastante complicação para o desenho da dianteira, conforme comentado no item 4.1.8 é necessário envolver o máximo possível os pneus, sobrando pouco espaço para trabalhar as curvaturas e arredondamentos necessários para um bom resultado de coeficiente de arrasto, além de manter um valor elevado da altura do ponto de estagnação. Dessa forma, o desenho da dianteira é um item de extrema importância para a obtenção de um resultado eficiente em comparação com os outros veículos da categoria.

Os esboços se iniciam a partir de uma linha imaginária que delimita o ângulo de ataque, nada pode avançar adiante dessa linha sendo o ponto extremo da dianteira o pára-choques. Para definir sua posição, ou seja, em que altura e

conseqüentemente o quanto avança adiante do limite dos pneus, foi adotado o seguinte critério: considerando a altura máxima do corpo, ou seja, o ponto mais alto do capô que faz interface com o pára-brisas, se necessitava possuir diferença de altura entre essa linha e a linha superior do pára-choques suficiente para permitir a inclinação necessária do capô, acomodar a parte do plano frontal que contém os faróis e lanternas, e permitir o arredondamento da aresta de interface entre capô e plano frontal. A inclinação adotada para o capô foi de 9 graus, atendendo às recomendações apontadas por Hucho (1998). A região do plano frontal acima do pára-choques deveria possuir acima de 150 mm, que é a dimensão dos faróis utilizados. De acordo com Hucho (1998) um raio de 150 mm para o arredondamento da aresta de interface entre o capô e o plano frontal deve ser o suficiente para uma boa contribuição no resultado do coeficiente de arrasto. Dessa forma esse arredondamento da aresta tomou toda a altura dessa região do plano frontal, praticamente a eliminando. Isso exigiu que para que os faróis pudessem ficar acomodados sob essa linha eles fossem ligeiramente recuados dentro do corpo. Com isso a altura da face superior do pára-choques encontrada foi de 356 mm em relação ao assoalho, o que, para o pára-choques previsto pelo projeto mecânico que possui 56 mm de altura, localizou o ponto extremo a 205 mm adiante do limite dos pneus, ou 572 mm adiante da linha do eixo dianteiro.

Abaixo da linha do pára-choques então foi necessário acomodar a outra parte do painel frontal, que faz a interface com o assoalho. O ponto extremo da estrutura do veículo no assoalho fica a 235 mm adiante da linha do eixo dianteiro, a partir desse ponto deveria haver distância e altura suficiente para o arredondamento da aresta de interface entre assoalho e o plano frontal. Num desenho inicial do projeto mecânico pensou-se em apenas possuir nessa região uma extensão do pára-choques até o ponto extremo da estrutura, com uma carenagem simples acompanhando essa linha, não permitindo o arredondamento dessa aresta de interface. Essa opção foi utilizada no desenho inicial da carroceria simulado, os resultados, que são discutidos detalhadamente no capítulo 5, mostraram certa deficiência da solução. Essa configuração pode ser verificada na figura 4.17. Em uma versão seguinte do desenho optou-se então por adotar uma carenagem diferente nessa região, permitindo o arredondamento da aresta com raio de 100mm, o que exigiu que o desenho mecânico do pára-choques fosse ligeiramente

modificado. Como essa modificação mecânica não interferiu na premissa do ângulo de ataque, esse novo desenho da dianteira foi aceito e simulado, com os resultados apresentados no capítulo 5. O novo desenho é apresentado na figura 4.18.

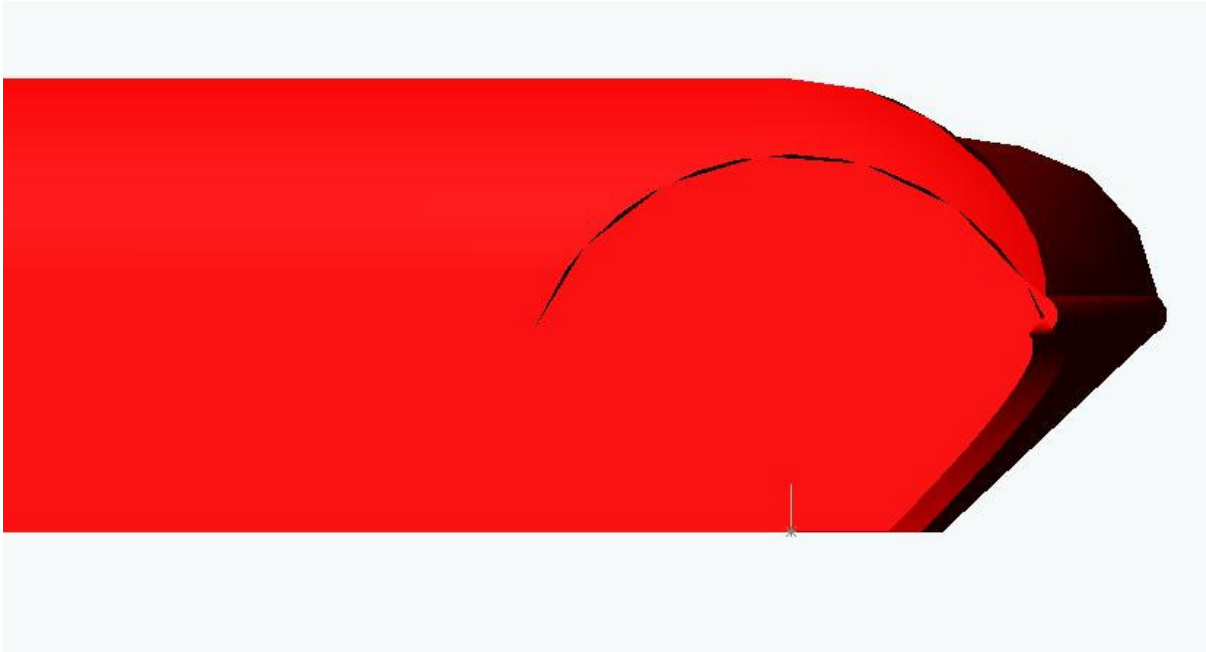


Figura 4.17: Interface entre a carenagem frontal inferior e o assoalho.

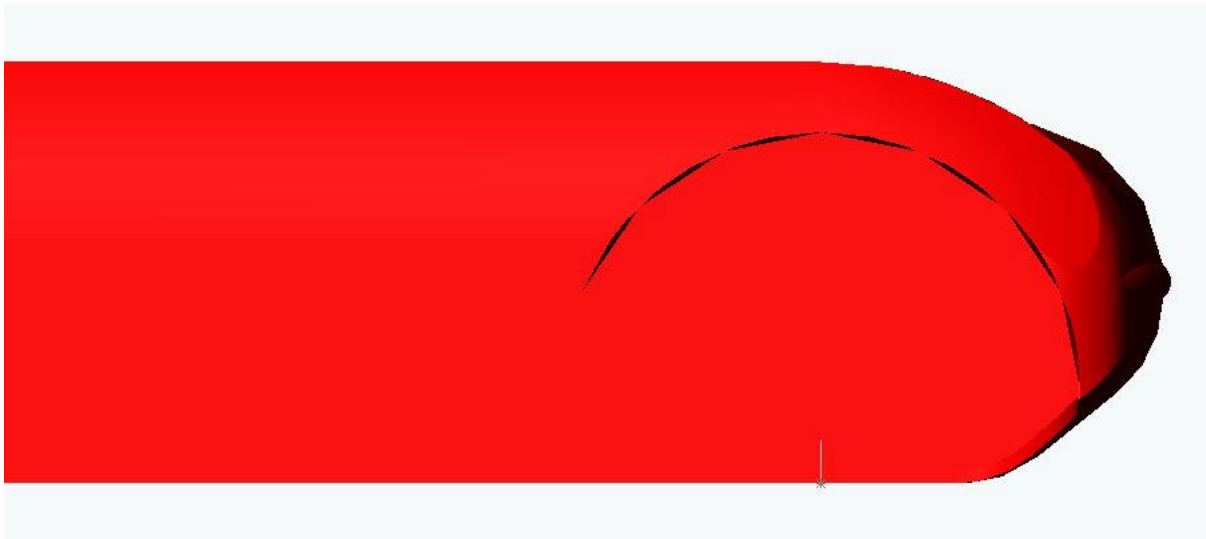


Figura 4.18: Nova interface entre a carenagem frontal inferior e o assoalho.

Com o ponto extremo do pára-choques a 205 mm adiante do limite dos pneus, foi necessário ajustar a curvatura do plano frontal de maneira que as extremidade laterais do pára-choques ficassem ainda adiante do limite do pára-

lamas, de maneira que a carroceria pudesse envolver o máximo possível os pneus. Essa dimensão disponível é de 185 mm, conforme observado na fig. 4.19. No desenho inicial da carroceria foi feita apenas a curvatura do plano frontal com raio de 2490 mm, sem o arredondamento das arestas laterais. Esse desenho foi simulado e os resultados apresentaram uma indicação de deficiência. Com intenção de melhorar esse resultado, em uma versão seguinte do desenho foi diminuído o raio de curvatura do plano frontal, de maneira a permitir o arredondamento das arestas laterais. O novo raio de curvatura do plano adotado foi de 5000 mm e o raio de arredondamento das arestas foi de 100 mm, valor apresentado por Hucho (1998) como já eficiente para melhoria do coeficiente de arrasto. Valores mais altos para esse raio de arredondamento da aresta teoricamente poderiam trazer resultados mais significativos, porém não há espaço para tal e o valor de 100 mm foi o melhor compromisso estimado em confronto com o raio de curvatura do plano frontal de 5000 mm. Esse novo desenho é apresentado na figura 4.20.

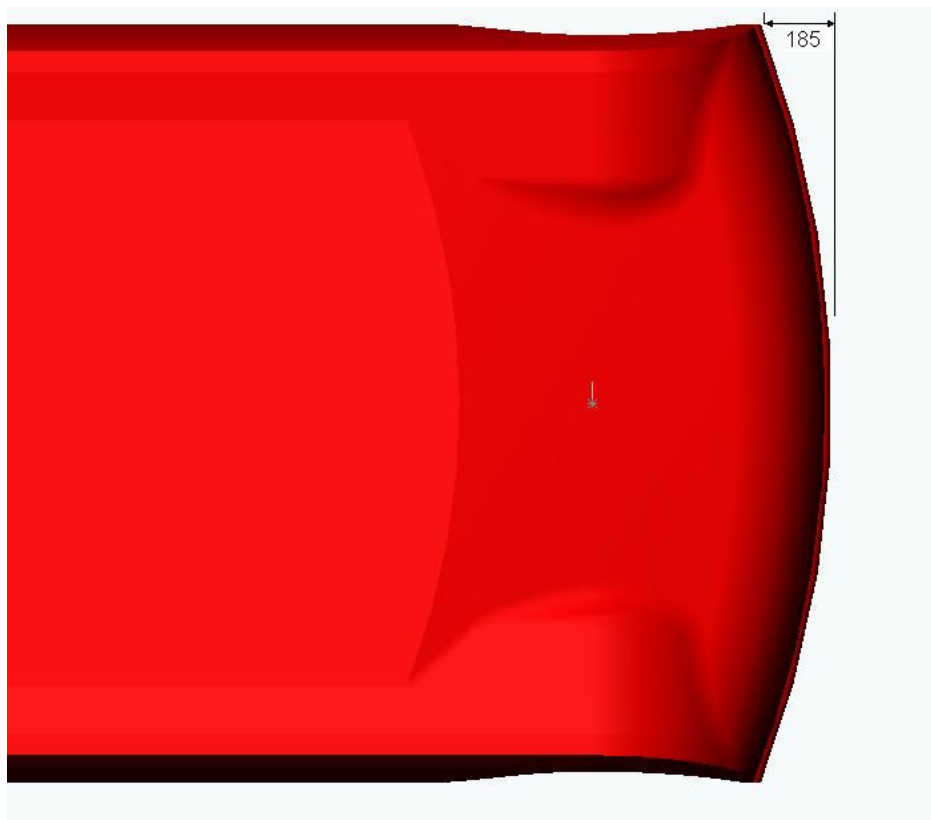


Figura 4.19: Distância entre o limite da carroceria e a extremidade do pára-lamas.

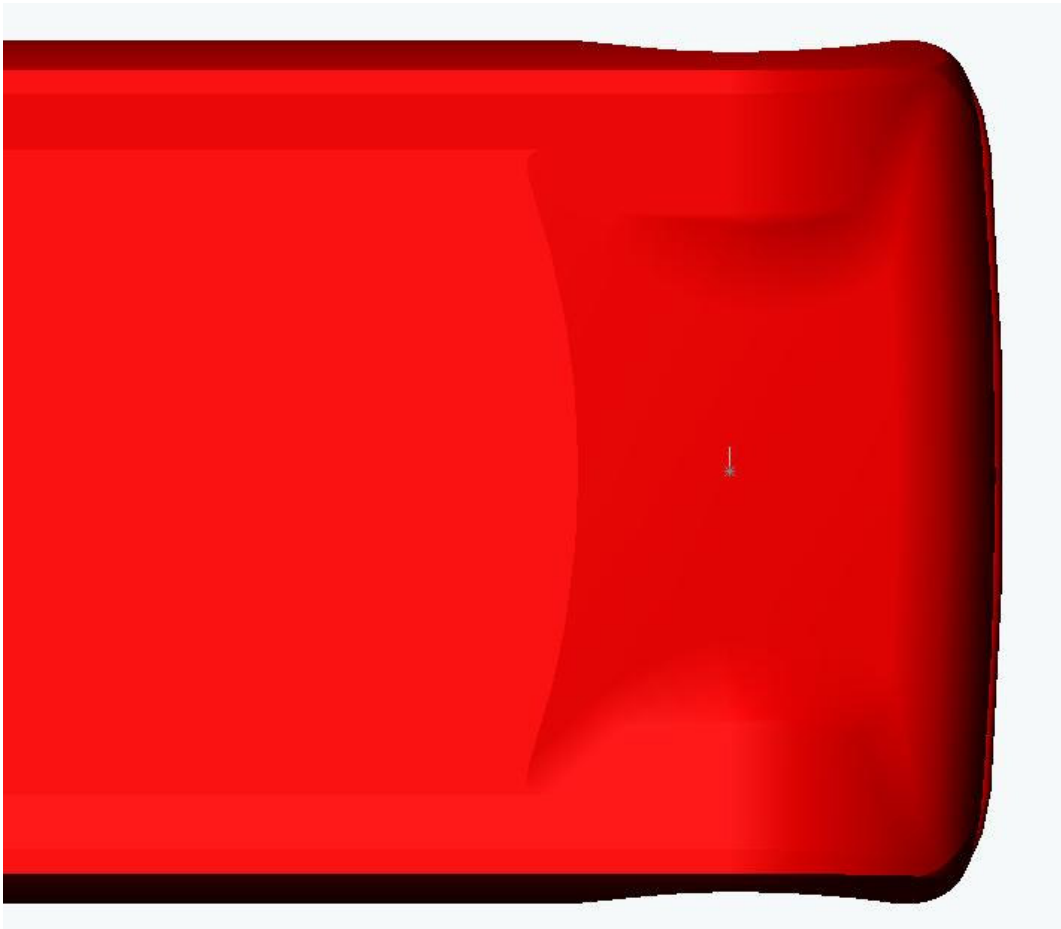


Figura 4.20: Nova curvatura do plano frontal com arredondamento das arestas.

Por fim, nesse plano frontal, mais especificamente na carenagem abaixo do pára-choques, foi necessário fazer um corte em suas extremidades laterais inferiores para que não provocasse interferência com os pneus nas diferentes posições ao longo dos trabalhos de suspensão e direção. Esse corte foi estudado junto ao projeto mecânico de maneira que fosse o menor possível, a fim de evitar a exposição das rodas diretamente ao fluxo de ar. Esse corte é mostrado nas duas versões do desenho da dianteira nas figuras 4.21 e 4.22.

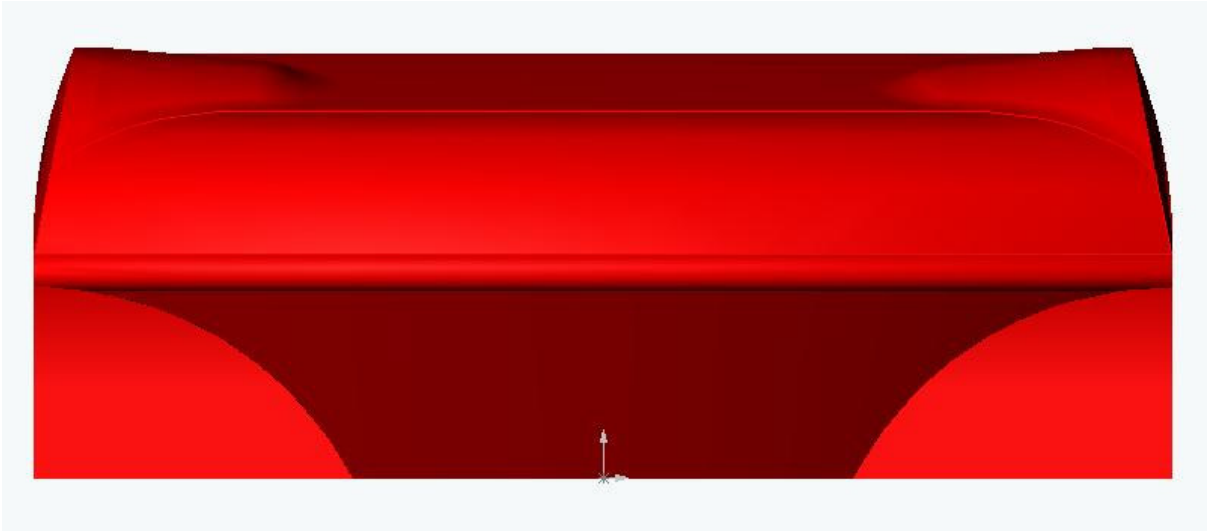


Figura 4.21: Cortes na carenagem.

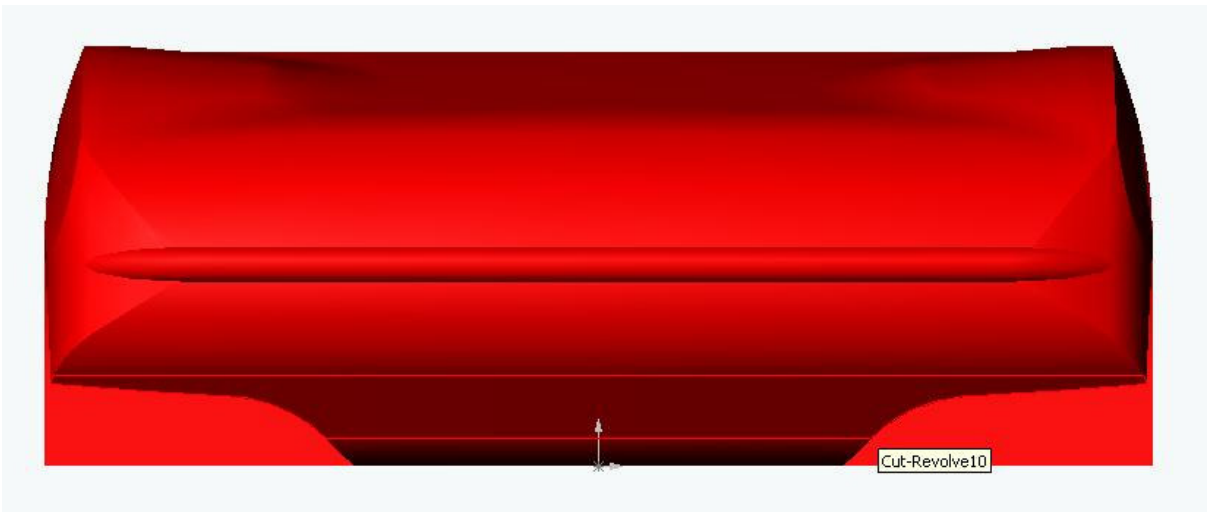


Figura 4.22: Corte na carenagem no novo plano frontal.

4.2.3 Pára-brisas e colunas A

Parte das soluções citadas no item 4.1.3, que dizem respeito às curvaturas do pára-brisas nos dois sentidos, não são possíveis de serem trabalhadas, pois como dito anteriormente o pára-brisas não será desenvolvido mas sim adotado de um veículo existe que é o Chevrolet Astra. Com isso a única solução a ser trabalhada com o pára-brisas é sua inclinação. Segundo Hucho (1998), dentre algumas opções de combinações com outros fatores, ângulo de inclinação do pára-brisas em relação à vertical até 60 graus atinge o limiar de melhoria no coeficiente de arrasto. Esse

ângulo no veículo na verdade foi definido de maneira a oferecer a menor área frontal possível, conforme citado no item 4.1.1, sendo que seu valor ficou entre 62 e 65 graus, o que se enquadra na sugestão apresentada. Esse valor inclusive é muito próximo ao utilizado no veículo original. Duas versões do desenho foram feitas, a primeira posicionando o pára-brisas imediatamente acima do plano do corpo e com ângulo tal que seu limite superior permitisse ainda uma pequena curvatura da aresta de interface com o teto, respeitando o limite estabelecido para sua altura. Com esse desenho o ângulo obtido foi de 62 graus. Na segunda versão, esse pára-brisas foi posicionado ligeiramente abaixo do plano superior do corpo, de maneira que possibilitasse a criação de um rebaixo entre capô e pára-brisas para acomodação dos limpadores de pára-brisas. Seu limite superior nessa versão foi posicionado pouco mais abaixo da versão anterior, de maneira a permitir um maior raio de arredondamento da aresta de interface com o teto e conseqüentemente uma transição mais suave. O ângulo obtido nessa versão foi de 65 graus. As duas versões são apresentadas respectivamente nas figuras 4.23 e 4.24.

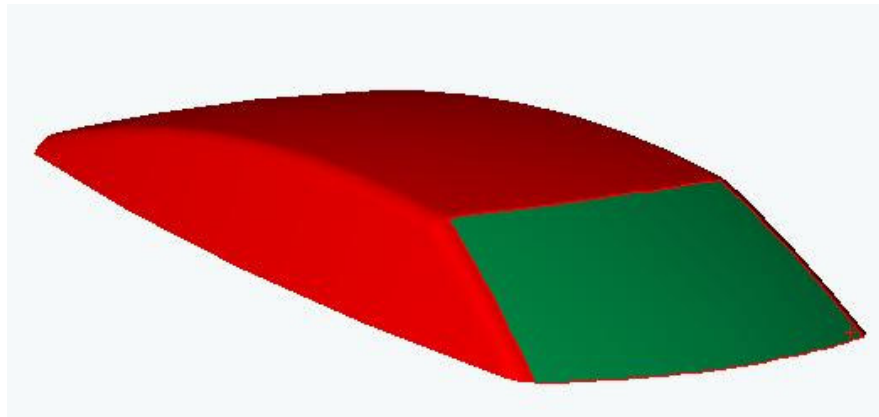


Figura 4.23: Primeira versão do pára-brisas.

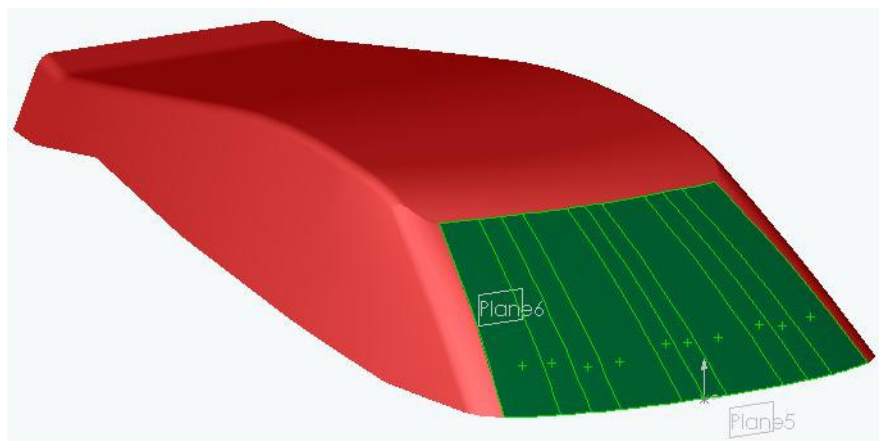


Figura 4.24: Segunda versão do pára-brisas.

Para as colunas A, segundo Hucho (1998) raios de arredondamento até 150 mm trazem melhorias significativas no valor do coeficiente de arrasto. O valor adotado na primeira versão do desenho foi de 100 mm, de maneira a permitir ainda certa curvatura do plano lateral do teto o que acrescentou 38 mm até atingir o limite estabelecido pela área frontal. Em uma versão seguinte do desenho essa aresta foi desenhada com raio variável, permitindo que houvesse maior suavidade da transição e otimizasse o ganho da curvatura da lateral do tato. Com esse novo desenho o raio médio adotado foi de 150 mm e a curvatura foi da lateral foi aumentada para 50 mm. As duas versões do desenho são apresentadas respectivamente nas figuras 4.25 e 4.26, e seus resultados são discutidos no capítulo 5.



Figura 4.25: Coluna A e curvatura do plano lateral do teto.



Figura 4.26: Coluna A e curvatura do plano lateral do teto na segunda versão.

Para a aresta de interface com o teto, conforme já citado, houve duas versões de desenho. Na primeira se adotou um raio de arredondamento de 100 mm, de maneira a obter um bom compromisso com a curvatura do teto em não exceder o limite imposto pela área frontal. Nessa condição a curvatura gera uma diferença na altura do teto em 30 mm, exatamente na posição longitudinal do teto onde se encontram as cabeças dos ocupantes. Essa opção é apresentada na figura 4.27. Na versão seguinte, como o limite superior do pára-brisas foi posicionado mais abaixo, foi possível fazer a interface de transição muito mais suave, praticamente tangente tanto ao pára-brisas quanto ao teto. O raio nessa condição é de 1000 mm, o qual corresponde à própria curvatura do plano do teto, o que gerou uma diferença de cota de 56 mm, conforme observado na figura 4.28. A comparação dos resultados é apresentada no capítulo 5.



Figura 4.27: Arredondamento da aresta de interface com o teto na primeira versão.



Figura 4.28: Arredondamento da aresta de interface com o teto na segunda versão.

Para a aresta de interface com o capô, na primeira versão nenhum raio de curvatura foi adotado, pensando no pára-brisas fixo diretamente ao corpo o plano do capô, conforme observado na figura 4.29. Esse recurso é comumente observado em veículos antigos ou atuais com pouca preocupação com aerodinâmica, como caminhonetes. Nesse caso os componentes dos limpadores de pára-brisas ficam expostos ao fluxo de ar, o que prejudica o arrasto. Exemplos dessa solução podem ser observados na figura 1.1. Na versão seguinte foi modificado o desenho não só

criando um arredondamento na aresta, mas também inserindo uma pequena abertura entre base do pára-brisas e a extremidade do capô, recurso utilizado comumente em veículos atuais com bons projetos aerodinâmicos, para acomodação dos limpadores de pára-brisas. Com isso o arredondamento da aresta é feito com a inclinação da extremidade do capô, num raio de 150mm, sem alterar a fixação do pára-brisas. Outra opção trabalhada foi a modificação do desenho do corpo inserindo uma distância entre a linha de interface do capô e a posição de fixação do pára-brisas, criando assim uma pequena área disponível para o rebaixo de acomodação dos limpadores de pára-brisas. Os novos desenhos são apresentados nas figuras 4.30 e 4.31, e exemplos dessa solução em veículo existentes podem ser observados na figuras 1.3.

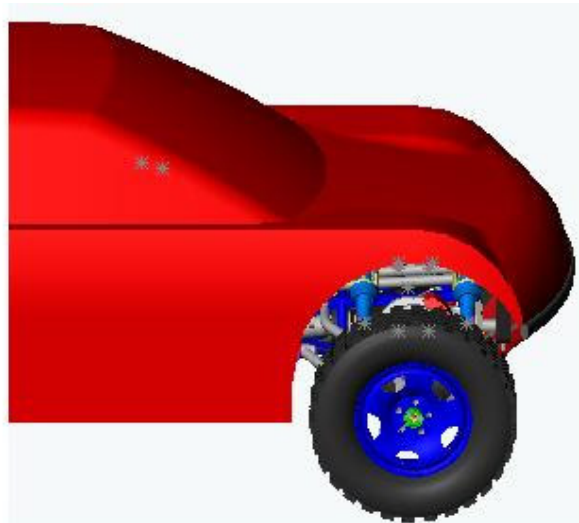


Figura 4.29: Aresta de interface do pára-brisas com o capô.

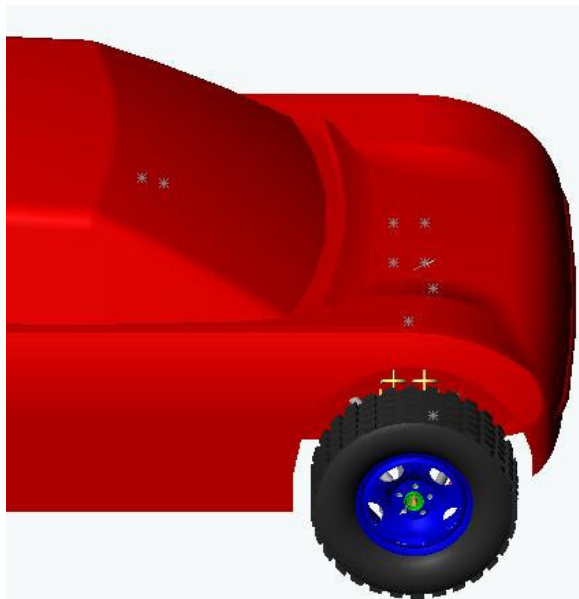


Figura 4.30: Modificação da aresta de interface do pára-brisas com o capô.

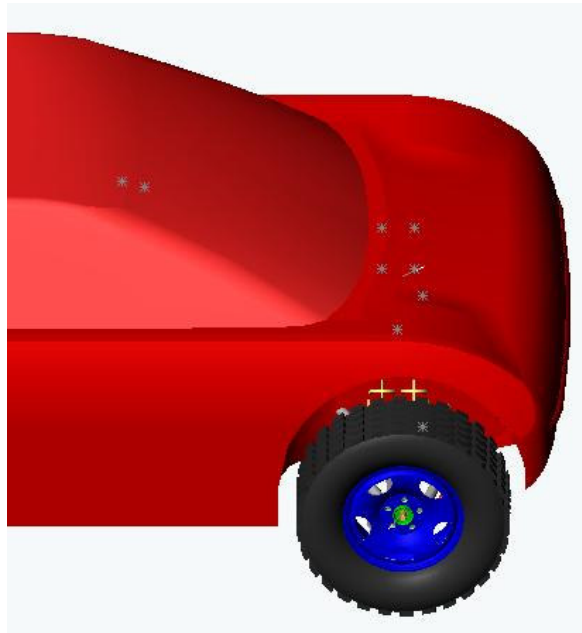


Figura 4.31: Segunda modificação da aresta de interface do pára-brisas com o capô.

4.2.4 Teto

A única solução a ser tomada para o teto é a adoção de uma leve curvatura no sentido longitudinal. Como descrito no item 4.1.4, essa solução possui um efeito colateral que é o aumento da área frontal. Dessa forma se procurou obedecer sempre à altura limitada pela definição da área frontal, e trabalhando apenas na altura da aresta superior do pára-brisas e o arredondamento da aresta com o teto. Conforme descrito no item anterior, duas versões foram estudadas, seus desenhos são apresentados nas figuras 4.32 e 4.33 e os resultados são discutidos no capítulo 5.



Figura 4.32: Curvatura do teto na primeira versão.



Figura 4.33: Curvatura do teto na versão modificada.

4.2.5 Traseira

O veículo em questão, ao contrário da dianteira, por sua característica, apresenta grande facilidade em desenvolver um desenho eficiente para a traseira. Vários aspectos de um veículo de passeio comercial se tornam uma limitação para a elaboração de um desenho com linhas mais adequadas a bom desempenho aerodinâmico. Por exemplo, a necessidade de acomodar os ocupantes do acento traseiro exige que o teto possua naquele ponto largura e altura mínimas, a presença de um porta malas exige que haja um capô traseiro, o vidro traseiro deve oferecer visibilidade adequada, com isso as linhas adequadas ao bom desempenho acabam se alterando para acomodar essas necessidades citadas e outras mais. Já o veículo analisado, por ser dedicado unicamente a competições, pode abrir mão de uma série de coisas. Primeiramente, os compromissos com questões estéticas nesse veículo são mínimos, o que dá grande liberdade em trabalhar as formas. Nesse veículo não há acento traseiro e conseqüentemente ocupantes, no lugar deles há apenas alguns poucos componentes mecânicos que excedem à altura da fronteira entre o corpo e o teto, mas que não oferecem limites significativos para as linhas do teto. Em seguida, pela presença desses componentes mecânicos, que obstruem a visão do condutor, não há a necessidade de um vidro traseiro. Por fim, o veículo não possui um porta malas, o volume correspondente é dedicado a acomodação de componentes mecânicos. Essas características podem ser observadas na figura 4.34.

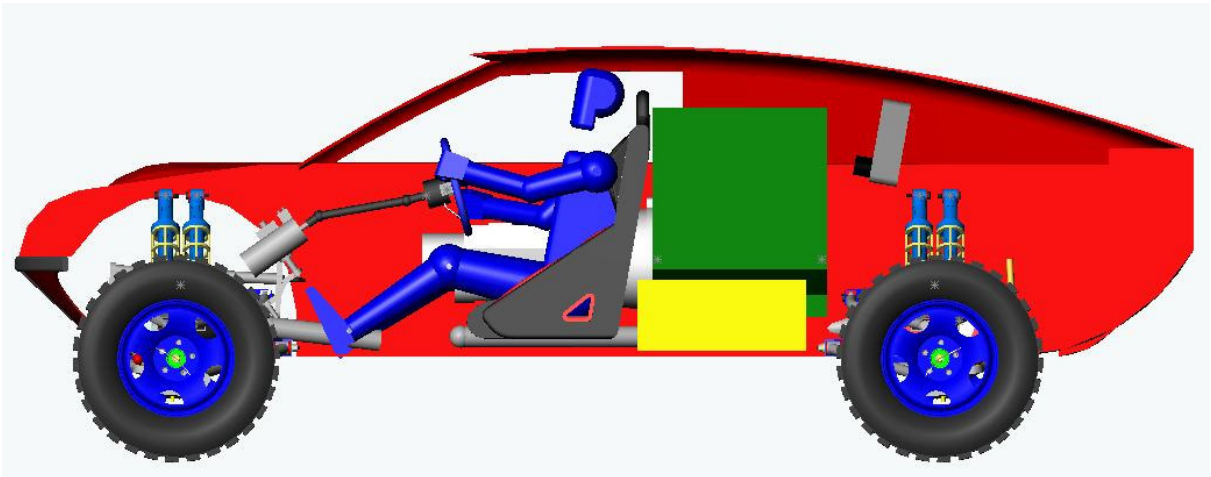


Figura 4.34: Disposição dos componentes na traseira do veículo.

Dessa forma as soluções apresentadas por Hucho (1998) podem ser exploradas ao máximo. Como não existem vidro e capô traseiros, a altura do teto pode diminuir suavemente, resultando em uma única face até a extremidade, na aresta com plano traseiro. A inclinação média obtida é de 12 graus. Como os resultados apresentados por Ahmed (1984) apud Hucho (1998) sugerem o ângulo ideal em 15 graus, uma nova versão do desenho foi criada aumentando essa inclinação média para 15 graus, o que diminuiu a extensão da face do teto restando uma face ao final do corpo equivalente ao capô traseiro. A extensão dessa pequena face foi utilizada então para criar um pequeno *spoiler*, o que segundo Hucho (1998) pode trazer contribuições muito significativas no coeficiente de sustentação e possivelmente também no coeficiente de arrasto. As diferentes opções criadas são demonstradas nas figuras 4.35 e 4.36.

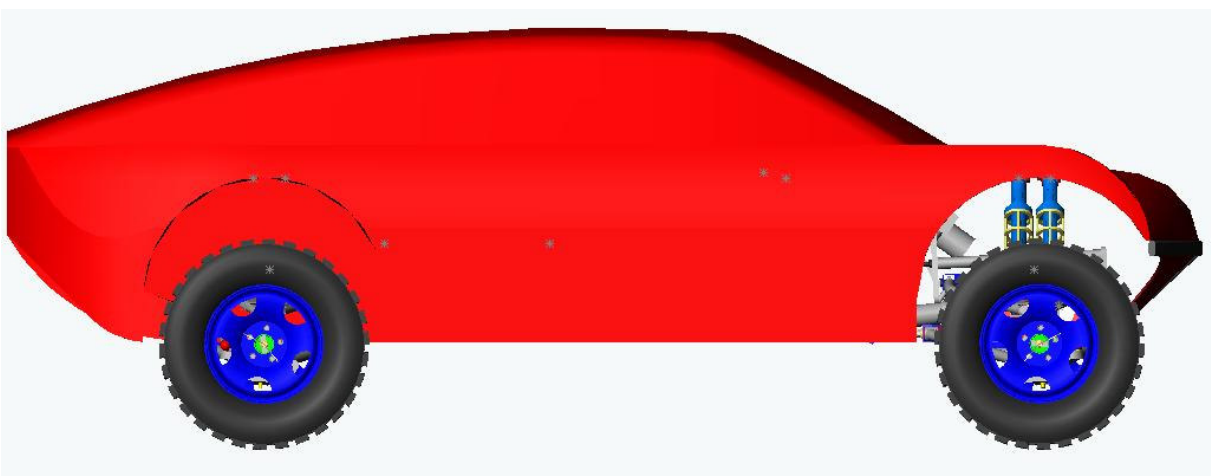


Figura 4.35: Inclinação da traseira na primeira versão.

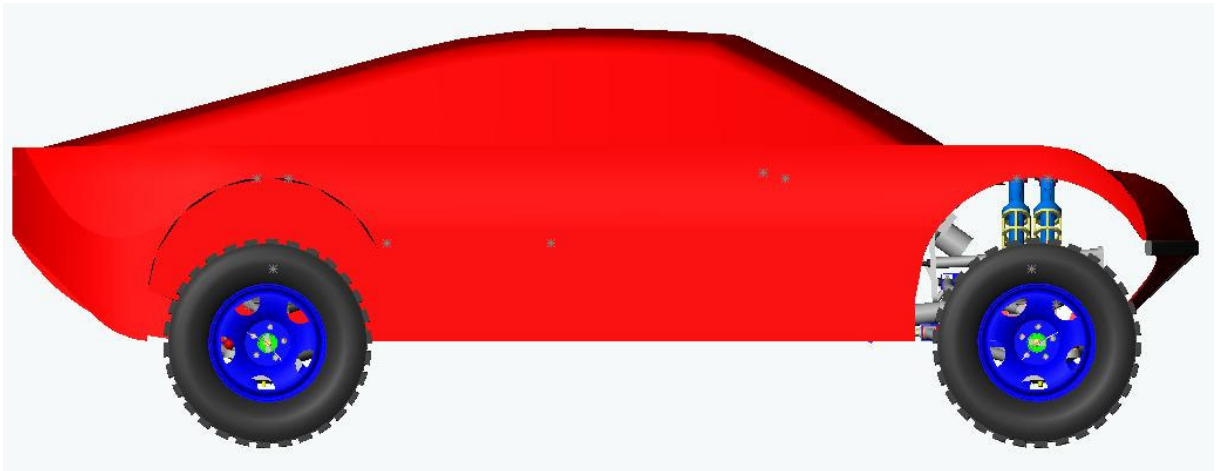


Figura 4.36: Inclinação da traseira na segunda versão.

Além dessa inclinação no plano traseiro do teto, foi feita uma modificação explorando esse recurso também no corpo, introduzindo uma inclinação no seu plano superior logo após as caixas de rodas traseiras. Essa inclinação foi de 15 graus, conforme a figura 4.37. Com esse recurso perdeu-se a área plana disponível que formava um pequeno *spoiler*, sendo assim duas novas modificações foram criadas, introduzindo uma curvatura na extremidade traseira do teto, de maneira que formasse um plano em ângulo com a inclinação do teto servindo de *spoiler*. Uma das versões teve esse ângulo em 15 graus em relação à horizontal, oposto ao plano do teto formando uma diferença de 150 graus, e a outra versão com esse plano horizontal, mantendo a mesma relação com o plano do teto da versão sem inclinação do plano do corpo. Essas modificações são demonstradas nas figuras 4.38 e 4.39.



Figura 4.37: Inclinação da traseira do corpo em 15 graus.



Figura 4.38: Inclinação da traseira e teto com *spoiler* de 15 graus.

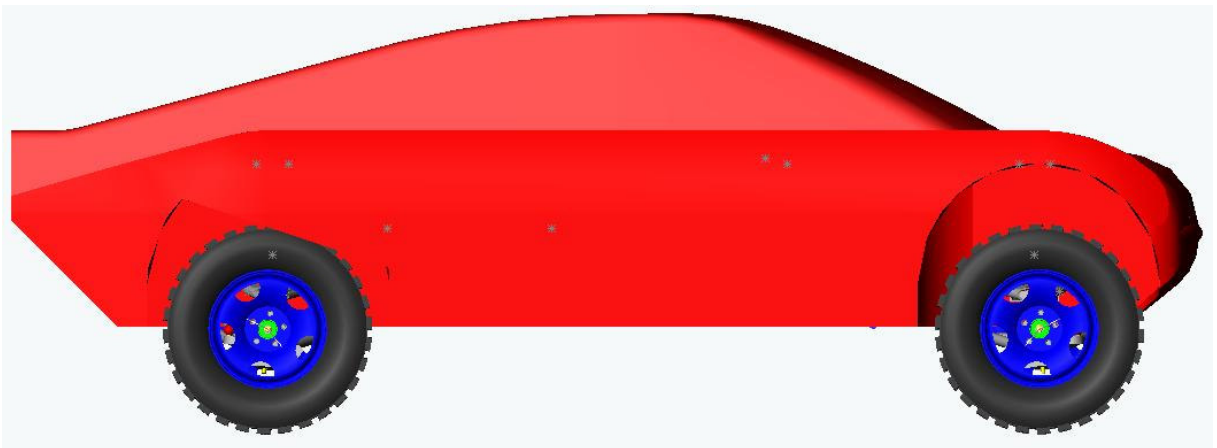


Figura 4.39: Inclinação da traseira e teto com *spoiler* horizontal.

Nas laterais do teto se pode utilizar uma grande diminuição da sua largura ao longo da aproximação com a extremidade traseira, ou seja, utilizando o recurso do *boat-tailing*. O ângulo médio utilizado na primeira versão dessa solução foi de aproximadamente 10 graus, o que tornou possível, como a extensão disponível para trabalhar esse recurso é grande, fazer com que a largura ocupada pelo teto na sua extremidade fosse bem reduzida, aproximando as linhas a uma forma *streamlined*., conforme observado na figura 4.40. Ao realizar a modificação anterior, da inclinação do teto, manteve-se inicialmente essa mesma proporção de *boat-tailing*. Uma nova tentativa foi feita aumentando esse ângulo, passando para 15 graus, o que na prática seria o maior ângulo permitido de maneira que o teto ainda mantivesse dimensões suficientes para abrigar os componentes mecânicos internos. As figuras 4.41 e 4.42 mostram essas versões.

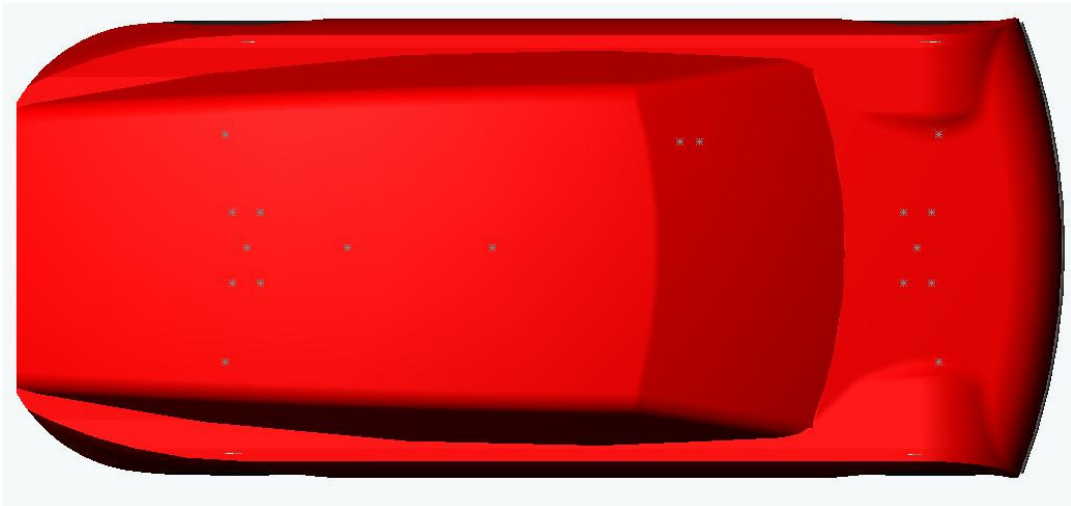


Figura 4.40: *Boat-tailing* do teto na primeira versão.

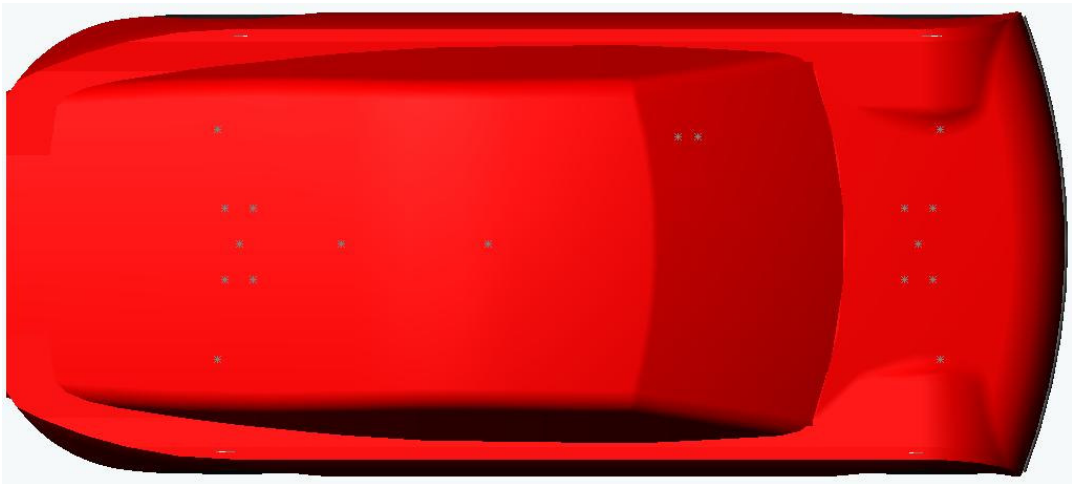


Figura 4.41: *Boat-tailing* do teto na segunda versão.

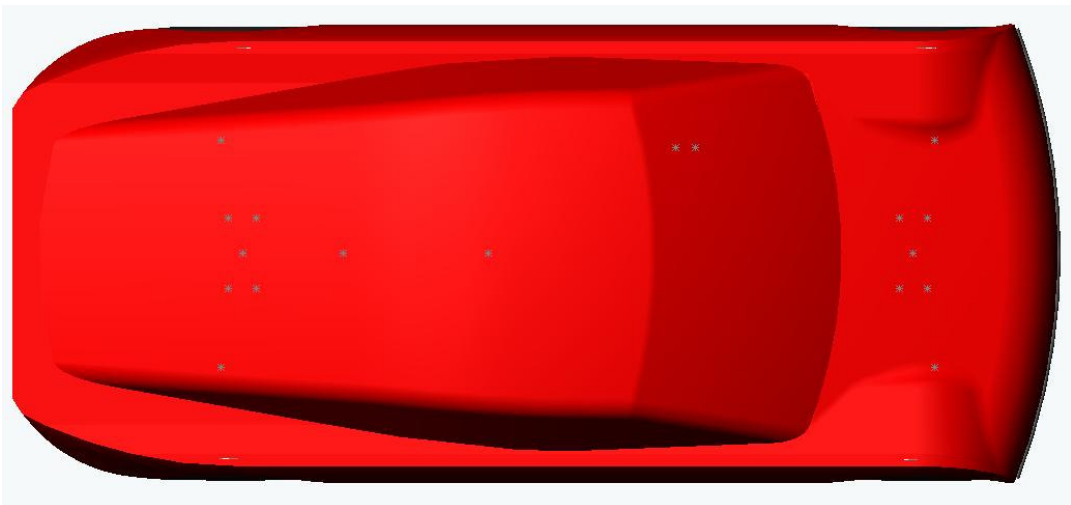


Figura 4.42: *Boat-tailing* do teto com ângulo de 15 graus e arestas do plano traseiro com arredondamento.

Nas laterais do corpo essa solução também foi adotada, porém com menor intensidade. Assim como na dianteira, o volume ocupado pelas caixas de rodas é grande, e também como na dianteira há uma preocupação em evitar a extensão da carroceria atrás do limite dos pneus, obtendo um valor elevado para o ângulo de saída do veículo. Considerando esses dois fatores, não é possível reduzir a largura do veículo até a região das caixas de rodas, sendo assim a extensão disponível da lateral do veículo após esse ponto até o limite do veículo acaba sendo reduzida. De qualquer forma, o ângulo médio de 10 graus foi adotado. Somado a isso, foi feito o arredondamento das arestas laterais com o plano traseiro do veículo. O resultado dessa combinação trouxe área preenchida pelo plano traseiro do veículo não muito reduzida em comparação ao que seria possível se a traseira pudesse ser mais longa. Ainda assim, como o veículo não possui porta malas, esse volume pode ser consideravelmente menor que de um veículo comercial, se aproveitando mais da solução do *boat-tailing*, conforme observado na figura 4.42.

Outras combinações para esse caso foram trabalhadas, primeiramente, o estudo da opção de não arredondar as arestas de interface das laterais com o plano traseiro, mantendo o ângulo de *boat-tailing* em 10 graus. Em seguida modificou-se esse ângulo para 15 graus, também sem o arredondamento das arestas, o que trouxe uma significativa redução da área preenchida pelo plano traseiro. Os exemplos dessas soluções são apresentados nas figuras 4.43 e 4.44, e os resultados dessas combinações são apresentados no capítulo 5.

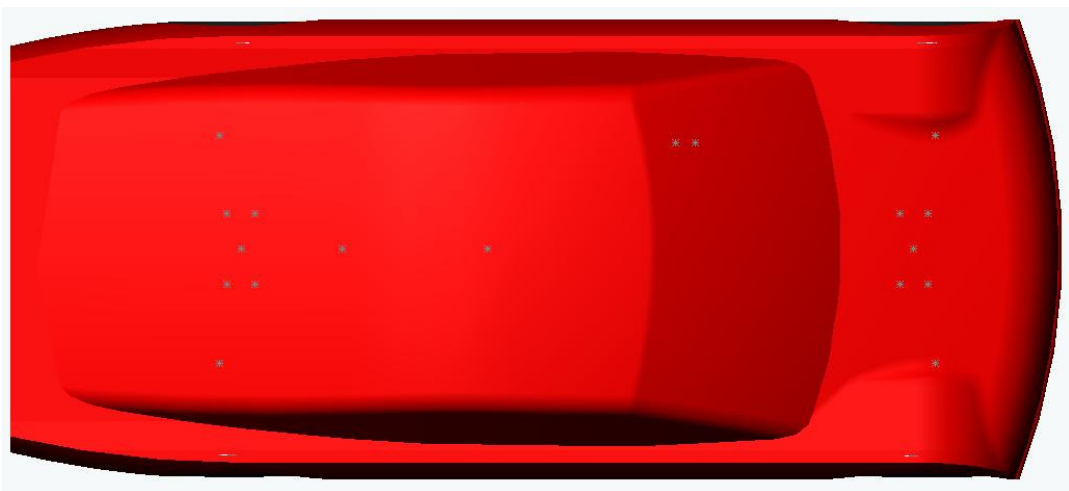


Figura 4.43: *Boat-tailing* do corpo com ângulo de 10 graus e arestas do plano traseiro sem arredondamento.

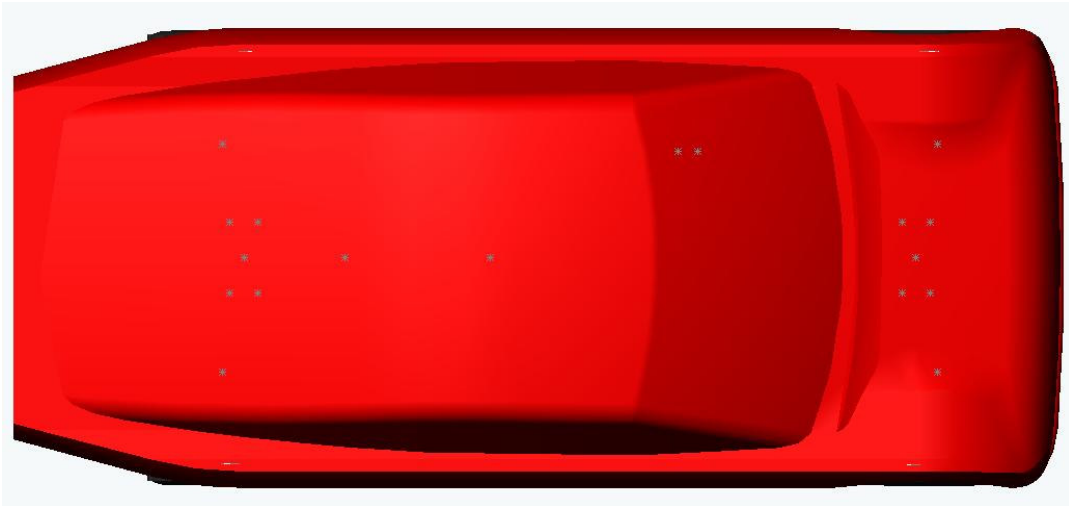


Figura 4.44: *Boat-tailing* do corpo com ângulo de 15 graus e arestas do plano traseiro sem arredondamento.

Olhando agora para a parte inferior da traseira, Hucho (1998) sugere a inclinação da extremidade do assoalho criando um efeito de difusor, o que também diminui a área do plano traseiro. Esse ponto rendeu um grande número de combinações, variando o ângulo, a posição de partida e o acabamento das arestas desse difusor. No desenho inicial do veículo essa solução foi bastante explorada, inclinando ao máximo o assoalho nas regiões onde não havia componentes mecânicos. Os ângulos obtidos foram de 20 graus para duas faixas paralelas entre os pneus e uma terceira faixa no centro do veículo onde havia componentes mecânicos que impediam a inclinação. Nessa terceira faixa foi feito apenas um arredondamento da sua extremidade em dois sentidos, o que criou uma face inclinada com ângulo médio de 45 graus com a horizontal. Uma segunda versão foi criada eliminando completamente o difusor, o que em teoria já se esperava uma perda de eficiência tanto no arrasto quanto na sustentação, mas simulou-se a alternativa para comprovar e verificar a diferença causada pelo uso ou não desse difusor. Uma terceira versão foi criada reduzindo o ângulo do difusor para 15 graus e alterando seu ponto de partida o mais adiante possível no assoalho do veículo sem que gerasse conflito relevante com os componentes mecânicos do veículo, alocando-se logo abaixo dos assentos dos ocupantes. Com essa disposição pode-se manter praticamente a mesma área do plano traseiro, porém com um difusor mais longo e menos inclinado, o que segundo Hucho (1998) é mais eficiente que um difusor curto e de maior inclinação. Essa opção na verdade gerou pequeno conflito

com os tanques de combustível, que originalmente estão alocados imediatamente acima do plano do assoalho do veículo, porém podem ter sua forma e posição levemente alteradas caso essa solução aerodinâmica venha a trazer resultados significativos. Na quarta versão, para evitar a modificação dos tanques de combustível, manteve-se o último ângulo de 15 graus, porém afastou-se o ponto de partida de maneira que não gerasse o conflito. Com isso houve um aumento significativo na área do plano traseiro. A quinta versão foi referente apenas a alguns ajustes finos, as arestas da região central (que não possui inclinação) e de interface com as laterais tiveram seus arredondamentos horizontais todos eliminados e procurou-se deixar inclinações suaves apenas nos planos verticais, objetivando a prevenção de formação de vórtices. Por fim, observados os resultados individuais de cada uma dessas alterações, uma versão final foi gerada somando esses ajustes finos à versão de inclinação mais longa do difusor com ângulo de 15 graus, que foram as opções que mais trouxeram ganhos. Há de se observar que ao somar duas opções de contribuição positiva não necessariamente o resultado é positivo, pois quando combinadas pode haver interferência entre suas ações de maneira que se torne pior que se utilizadas uma das combinações individualmente. Essas seis versões são colocadas nas figuras 4.45 a 4.50.

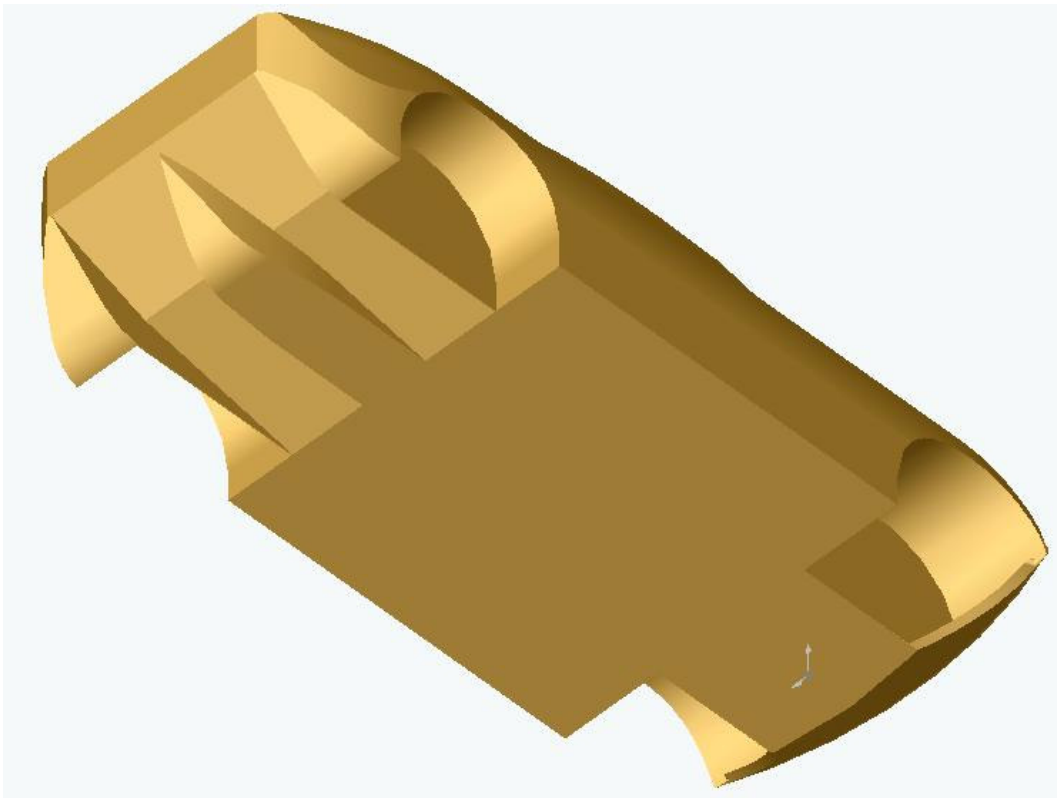


Figura 4.45: Difusor na primeira versão.

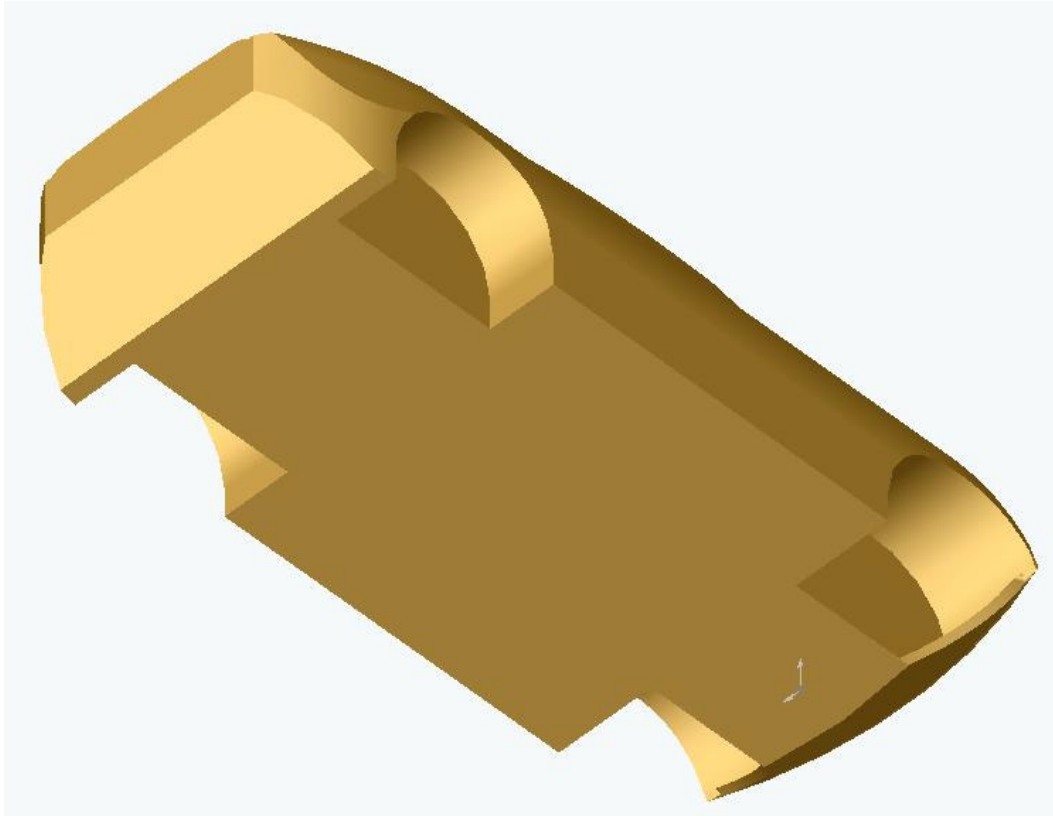


Figura 4.46: Sem difusor.

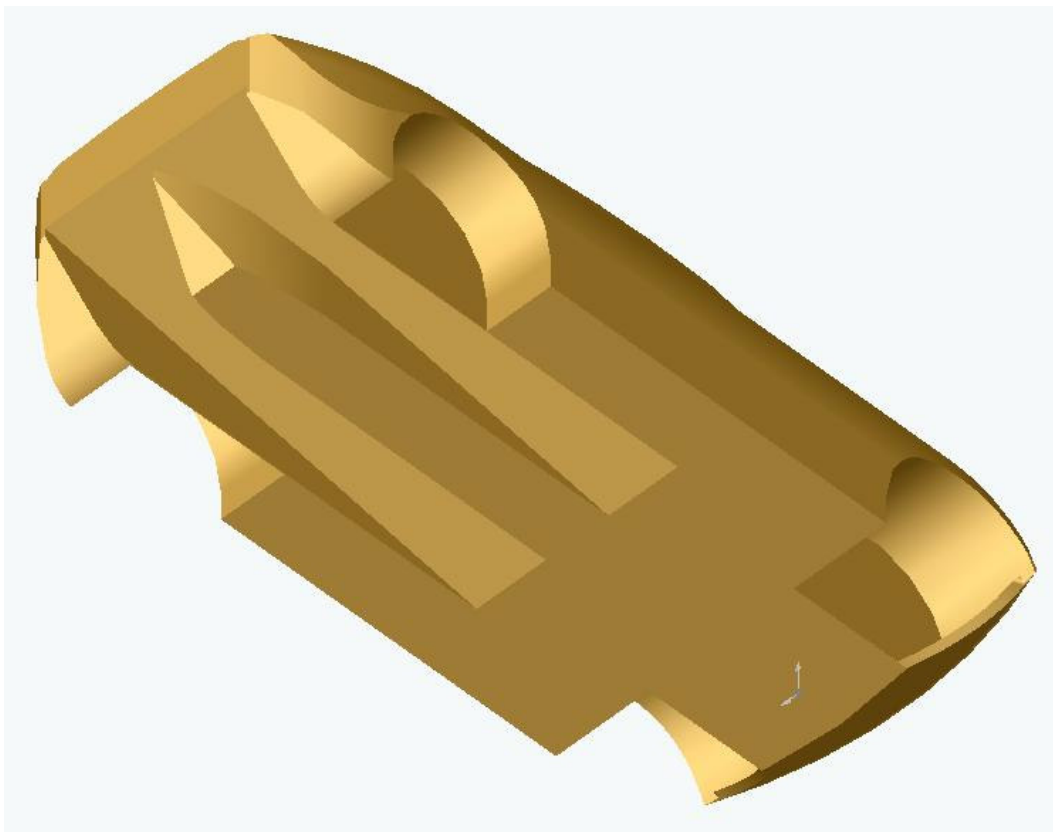


Figura 4.47: Difusor a 15 graus partindo abaixo dos acentos.

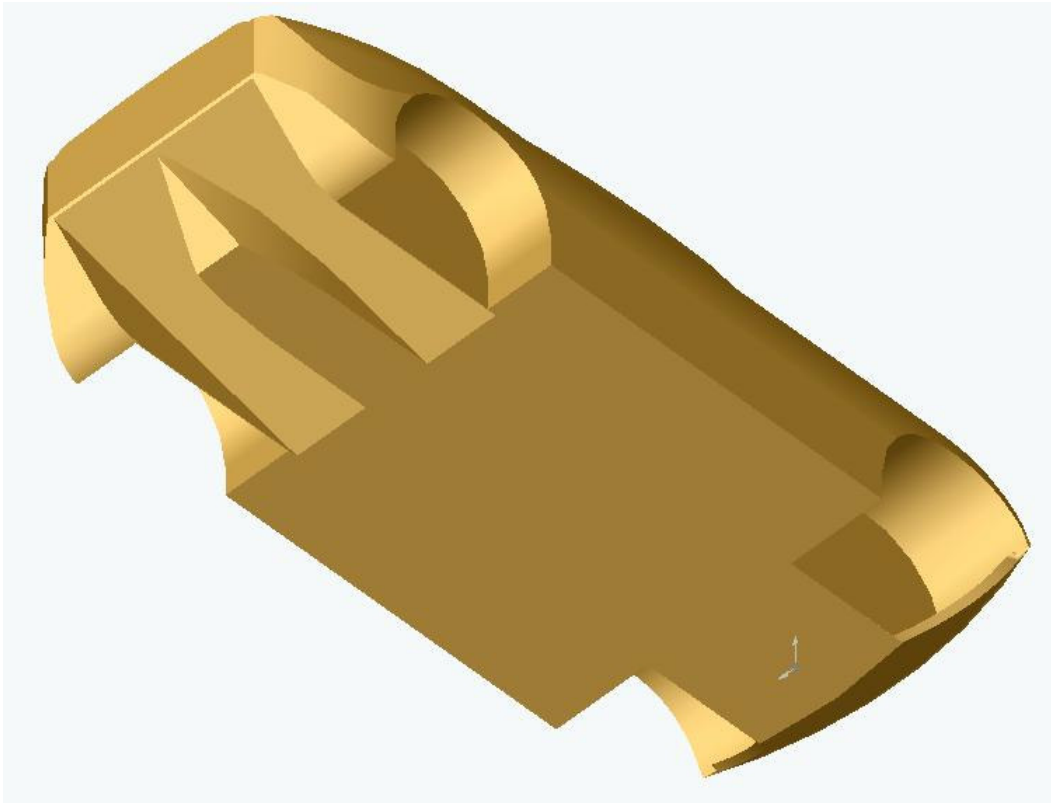


Figura 4.48: Difusor a 15 graus partindo após os tanques.

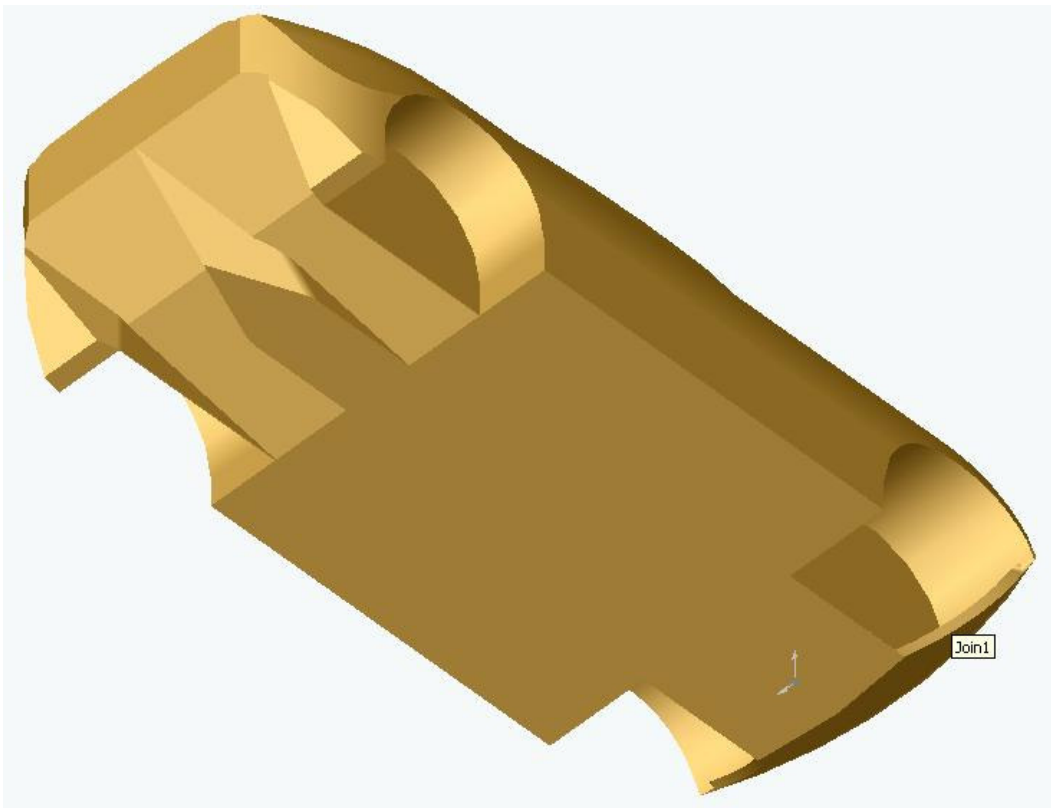


Figura 4.49: Modificação das arestas do difusor.

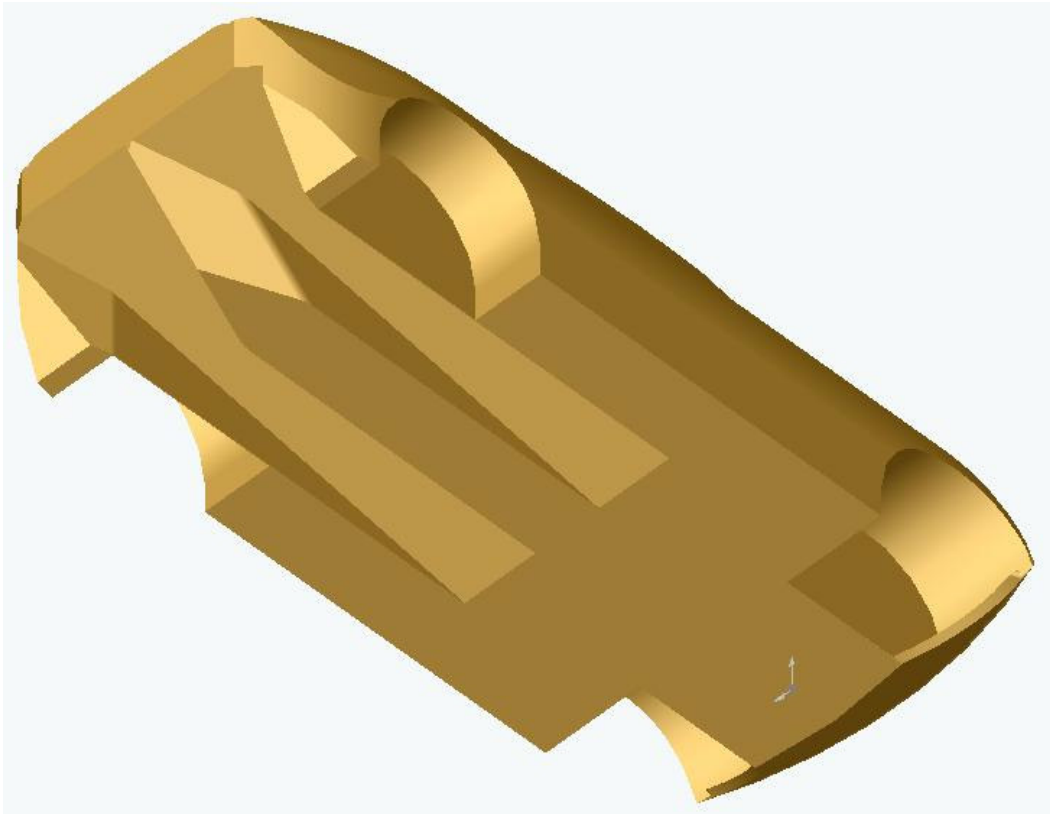


Figura 4.50: Soma das alterações mais significativas.

4.2.6 Laterais

No teto do veículo, conforme citado no item 4.2.3, foi possível criar uma pequena curvatura das faces laterais. O resultado observado é a largura do teto se iniciando com um valor correspondente à largura do pára-brisas somada à largura das colunas A, passando gradativamente para sua maior largura na região onde envolvem os ombros dos ocupantes, e diminuindo também gradativamente sua largura até sua extremidade traseira, pela solução do *boat-tailing* citada no item 4.2.5. A opção seguinte é a descrita no item 4.2.3, onde essa curvatura foi alterada em função do novo raio de arredondamento das colunas A. Ambas as opções são demonstradas nas figuras 4.25 e 4.26. Pela característica do veículo decidiu-se não adotar essa solução da curvatura no corpo, mantendo uma única versão das faces laterais completamente planas entre as caixas de rodas dianteiras e traseiras.

Com relação às bordas dos pára-lamas, conforme citado no item 4.1.6, se optou apenas em trabalhar com faces completamente planas, sem o delineamento de suas linhas. Essas bordas foram definidas originalmente com forma redonda, tanto na dianteira quanto na traseira, com raio suficiente para permitir a movimentação dos pneus devido ao trabalho combinado dos sistemas de suspensão e direção. Isso considerando a hipótese do uso dos maiores pneus permitidos pelo regulamento da categoria, com diâmetro de 800 mm. Porém como na traseira do veículo não há o trabalho do sistema de direção, existe a opção das bordas dos pára-lamas possuírem dimensões reduzidas, basicamente sendo mais baixas que a dianteira, com a limitação apenas de não obstruir o acesso ao conjunto em situações de manutenção. Os desenhos das duas opções são apresentados nas figuras 4.51 e 4.52, e seus resultados apresentados no capítulo 5.

Por fim, o outro item das laterais do veículo que traz contribuições para a variação do coeficiente de arrasto é o recesso das janelas, mas que não é considerado nas análises iniciais por assumir que o processo construtivo permitirá seu valor máximo em 5 mm. Uma versão final do desenho pode considerar esse recesso, apenas como confirmação de sua não contribuição nos valores finais dos coeficientes de arrasto e sustentação.

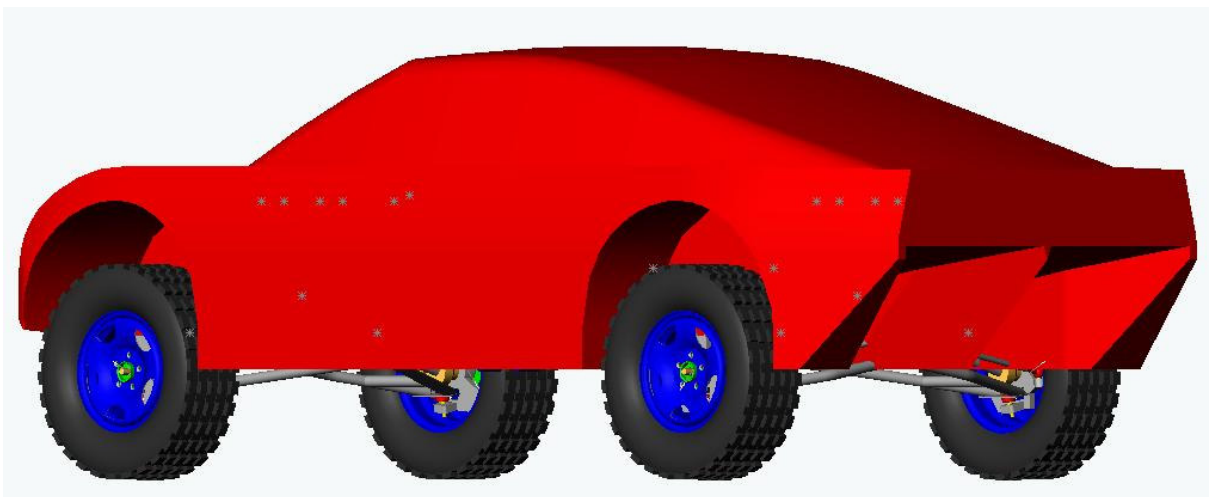


Figura 4.51: Pára-lamas traseiro com bordas altas.

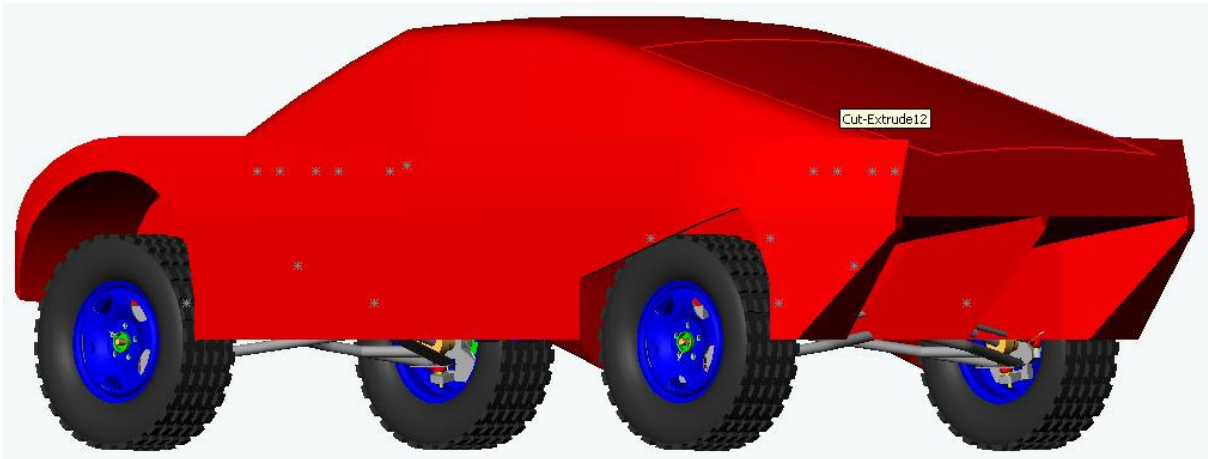


Figura 4.52: Pára-lamas traseiro com bordas reduzidas.

4.2.7 Assoalho

Conforme descrito no item 4.1.7, há a intenção de se trabalhar com o assoalho do veículo o mais plano possível, sem recessos ou erupções. O projeto mecânico permite isso, sendo que as únicas irregularidades encontradas ao longo desse plano são as fixações mecânicas das chapas na estrutura. Essas irregularidades, por serem da ordem de poucos milímetros, não são consideradas no desenho utilizado para as simulações. A única consideração feita sobre essa solução é sobre os poucos componentes de suspensão e direção que avançam abaixo da linha do assoalho entrando em contato com o fluxo de ar. Nas análises iniciais são completamente desconsiderados, observando sua contribuição e trabalhando soluções de amenizações apenas nos desenhos finais para as simulações mais detalhadas e precisas.

4.2.8 Rodas e caixas de rodas

De acordo com as considerações feitas no item 4.1.8, para reduzir a contribuição causada por esses componentes sobre os coeficientes de arrasto e sustentação o projeto deve ser desenvolvido de forma a evitar ao máximo o fluxo de ar ao redor dos conjuntos de rodas e pneus. Para o veículo em questão novamente

encontra-se um desafio, pois sendo um *off-road* possui, conforme já observado nos itens anteriores, dianteira muito curta e alta, altura livre em relação ao solo elevada e caixas de rodas de grande volume. Todas essas características contribuem para a exposição do conjunto ao fluxo de ar. Há apenas uma vantagem por trás de uma dessas características: sendo a dianteira muito curta e alta, ocorre pouca perturbação do fluxo até atingir as rodas, mantendo-o ainda bem paralelo ao eixo longitudinal do veículo.

As soluções estudadas então nesse item são poucas, conforme descrito no item 4.2.2 se procurou ter a carenagem frontal o mais envolvente possível sobre o conjunto de roda e pneus. O corte dessa carenagem foi o menor possível e as caixas de rodas tiveram seu volume reduzido ao máximo, mais ainda assim extremamente grandes. Essa tentativa porém conseguiu reduzir mas não eliminar a formação de uma região de alta pressão dentro da caixa de rodas dianteira. O fluxo de ar que encontra o veículo na sua dianteira, na região do corte da carenagem, atinge diretamente uma parede ortogonal à sua direção no fundo da caixa de rodas, formando assim a região de alta pressão, quase como uma região de estagnação. Para amenizar esse efeito foi feita uma modificação na caixa de rodas arredondando a aresta dessa sua parede posterior de maneira a divergir o fluxo evitando assim a estagnação. Esse arredondamento foi feito na maior dimensão possível que não interferisse no movimento do conjunto de rodas durante os cursos de suspensão e direção. Ainda na tentativa de suavizar o fluxo de ar na caixa de rodas, foi feita uma tentativa de forçar o fluxo através de uma passagem que interligava o fundo da caixa de rodas com uma região de baixa pressão na lateral do veículo logo após a borda do pára-lamas. Por fim, outra alternativa de suavizar o fluxo nas caixas de rodas foi, em conjunto com o arredondamento da aresta vertical citada, fazer também o arredondamento da aresta horizontal, entre parede posterior e o assoalho. Essas modificações são respectivamente demonstradas nas figuras 4.53 a 4.56.

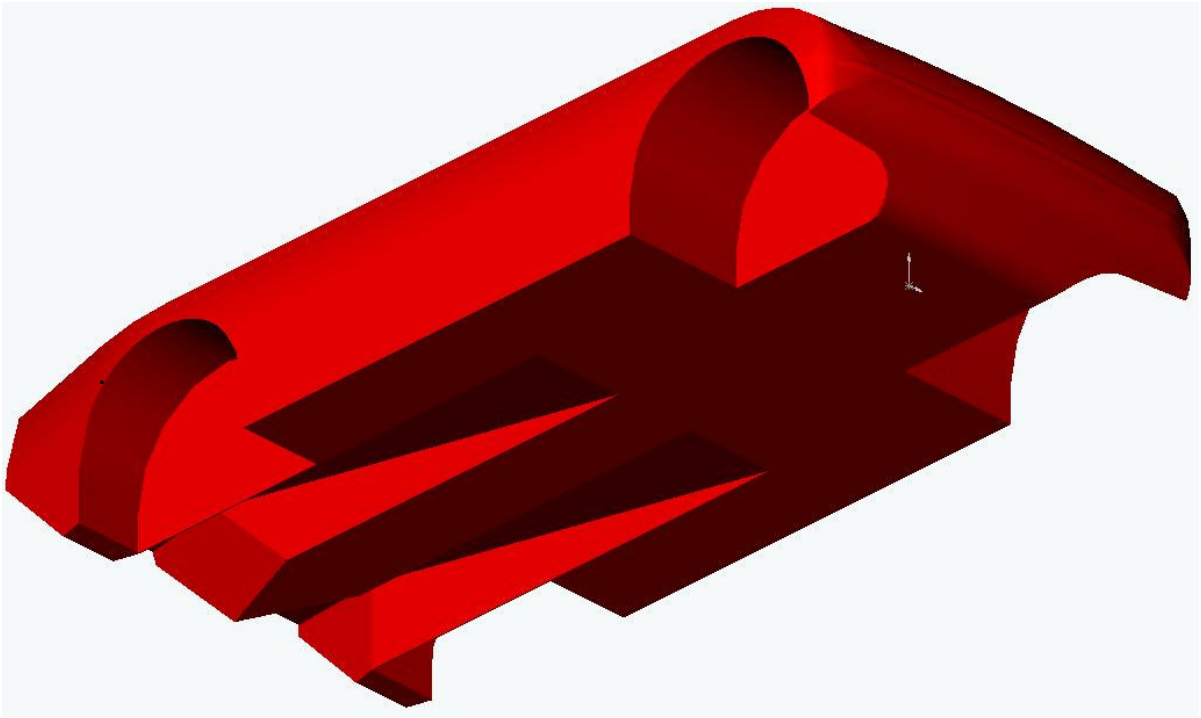


Figura 4.53: Caixa de rodas sem modificações para suavização do fluxo.

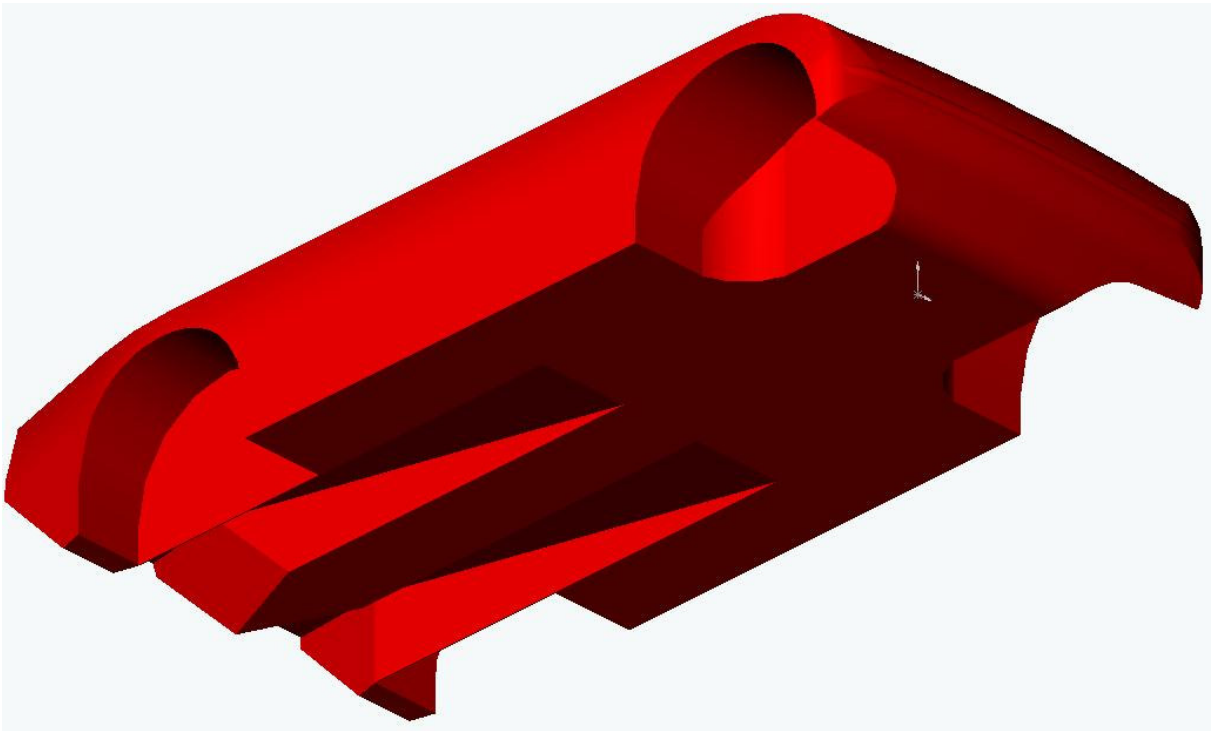


Figura 4.54: Caixa de rodas com arredondamento da aresta vertical da parede posterior.

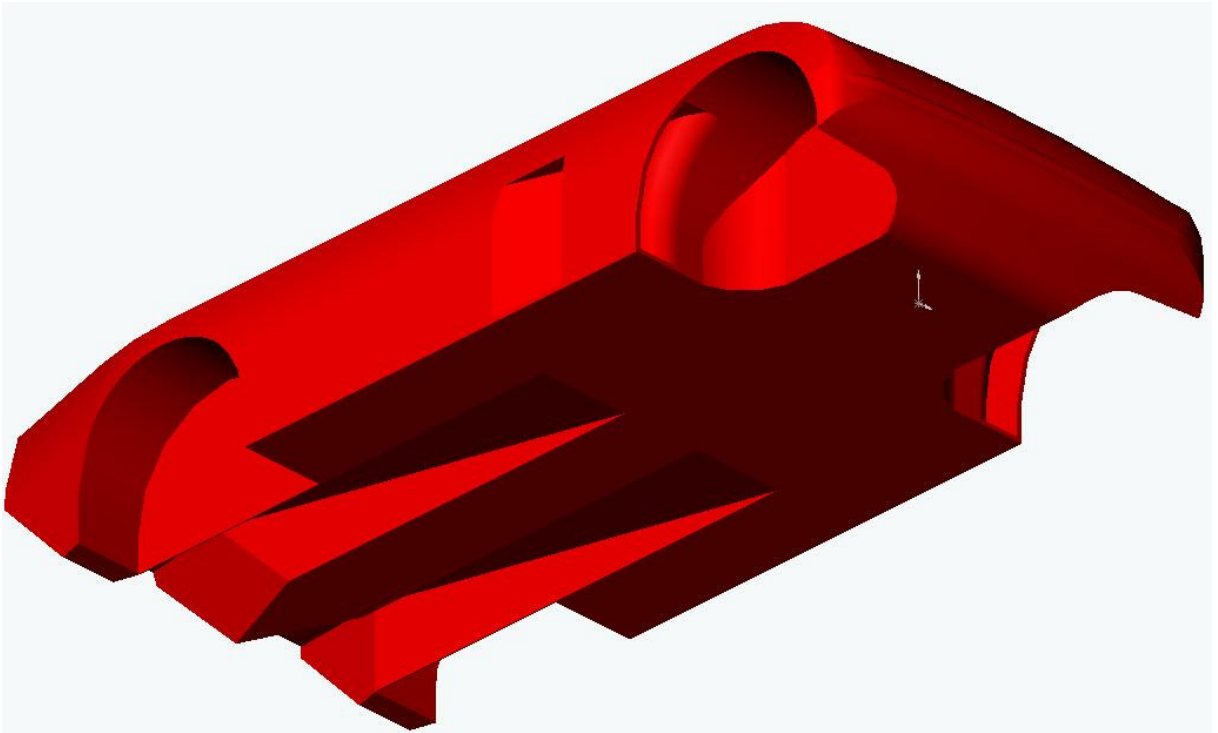


Figura 4.55: Caixa de rodas com arredondamento da aresta vertical da parede posterior e direcionamento do fluxo para uma saída no plano lateral.

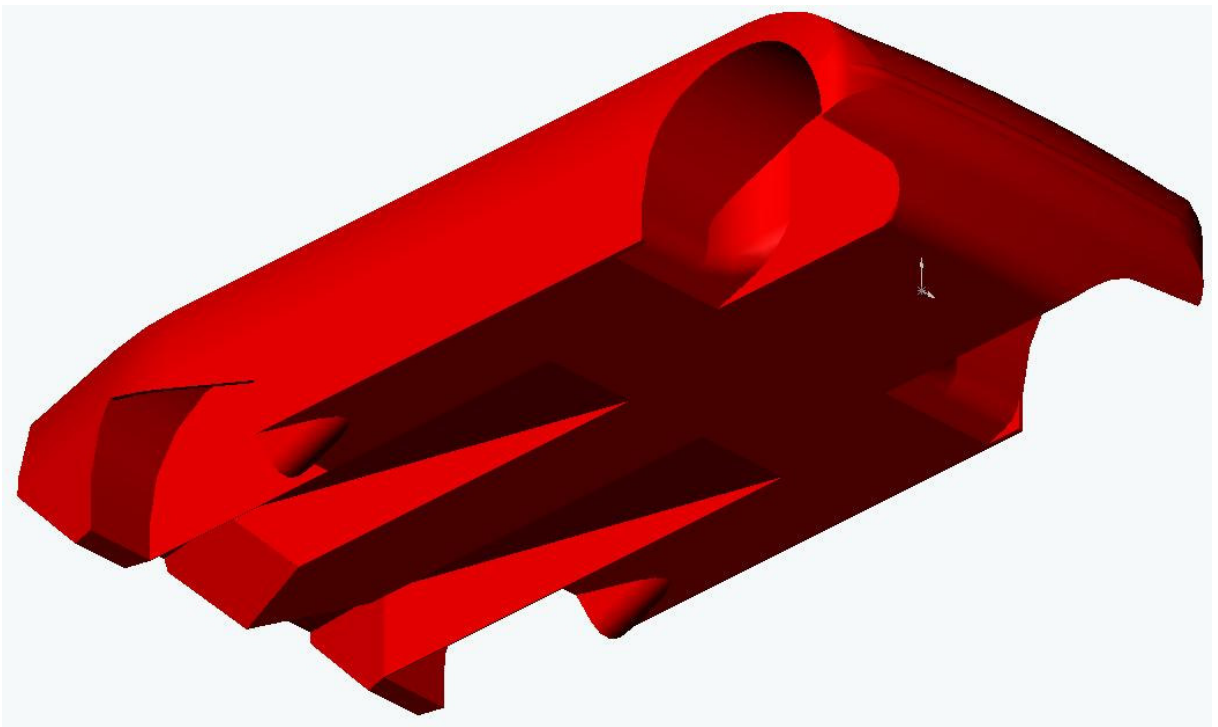


Figura 4.56: Caixa de rodas com arredondamento das arestas vertical e horizontal da parede posterior.

Outra solução relacionada com as rodas e caixas de rodas foi a exposta no item anterior, onde na superfície lateral se modificaram as bordas dos pára-lamas traseiros a fim de diminuir a perturbação de ar dentro das caixas de rodas pelo fluxo externo. Também na traseira, para evitar a formação de alta pressão adiante das rodas, adicionou-se um pequeno defletor com intenção de divergir o fluxo para baixo e para os lados. A versão do desenho com o recurso pode ser observada na figura 4.57. Esse recurso poderia ser de grande eficiência, porém deve se notar que caso esse componente tenha dimensões muito acentuadas pode interferir na altura livre do solo e prejudicar o desempenho do veículo na transposição de obstáculos. Por essa razão sua dimensão longitudinal é reduzida, mantendo-se muito próximo do pneu, e a dimensão vertical foi limitada em 100mm, o que é próximo a altura livre do solo do veículo na condição de maior compressão da suspensão, evitando assim que nessa condição o componente toque o solo.

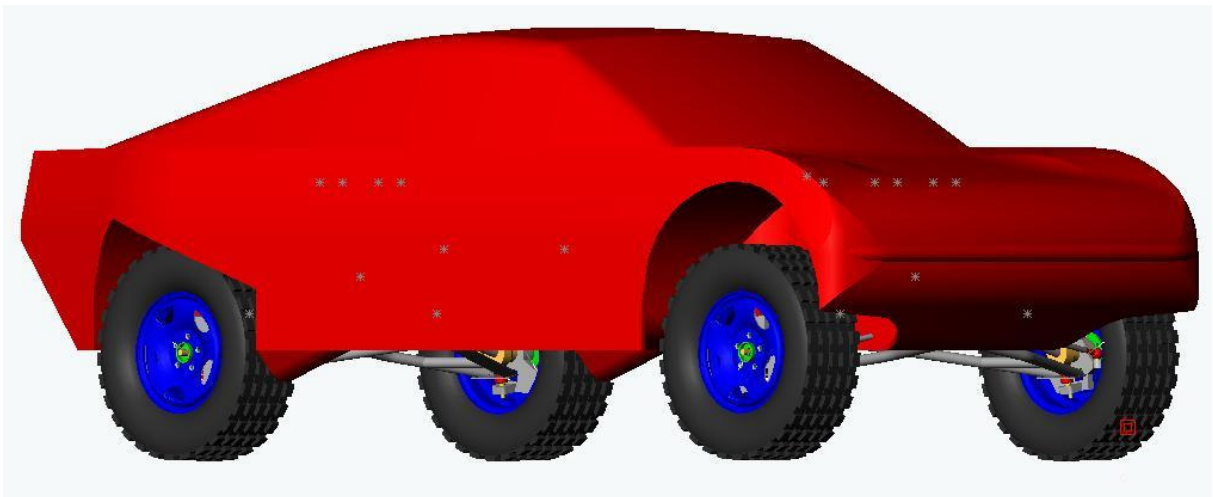


Figura 4.57: Defletor adiante das rodas traseiras.

4.2.9 Anexos

Os principais componentes considerados como anexos que com certeza serão adicionados à carroceria desse veículo são os retrovisores e captações de ar para alimentação ou arrefecimento de sistemas do veículo. Além desses, há a opção de utilização de *spoilers* ou aerofólios na dianteira e traseira, com função de tornar o

coeficiente de sustentação negativo e gerar melhor balanceamento deste entre os eixos dianteiro e traseiro em algumas situações específicas de atuação do veículo.

Os retrovisores, por exemplo, são de pequena interação com os demais itens da carroceria, e captações de ar são extremamente dependentes das características do fluxo e dos diagramas de pressão ao longo da carroceria, logo é interessante que sejam adicionados após as análises gerais iniciais. Já os *spoilers* e aerofólios podem ter significativa interação com outros itens, porém por questão de complexidade não são analisados nesse trabalho.

4.2.10 Desenho obtido

Somadas todas as decisões e soluções descritas acima, obteve-se um veículo apresentado nas figuras 4.58 e 4.59, com as seguintes características:

- Comprimento – 4176 mm
- Largura – 1820 mm
- Altura da carroceria – 1100 mm
- Altura total do veículo – 1470 mm
- Distância do extremo frontal a partir do eixo dianteiro – 572 mm
- Distância do extremo frontal a partir do limite do pneu dianteiro – 205 mm
- Distância do extremo traseiro a partir do eixo traseiro – 900 mm
- Distância do extremo traseiro a partir do limite do pneu traseiro – 533 mm

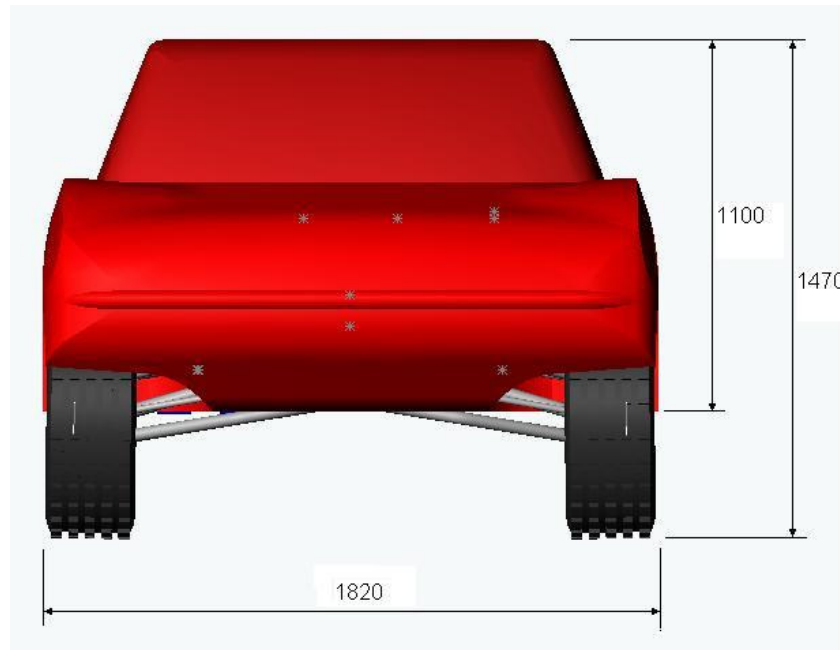


Figura 4.58: Dimensões transversais do veículo no seu desenho final.

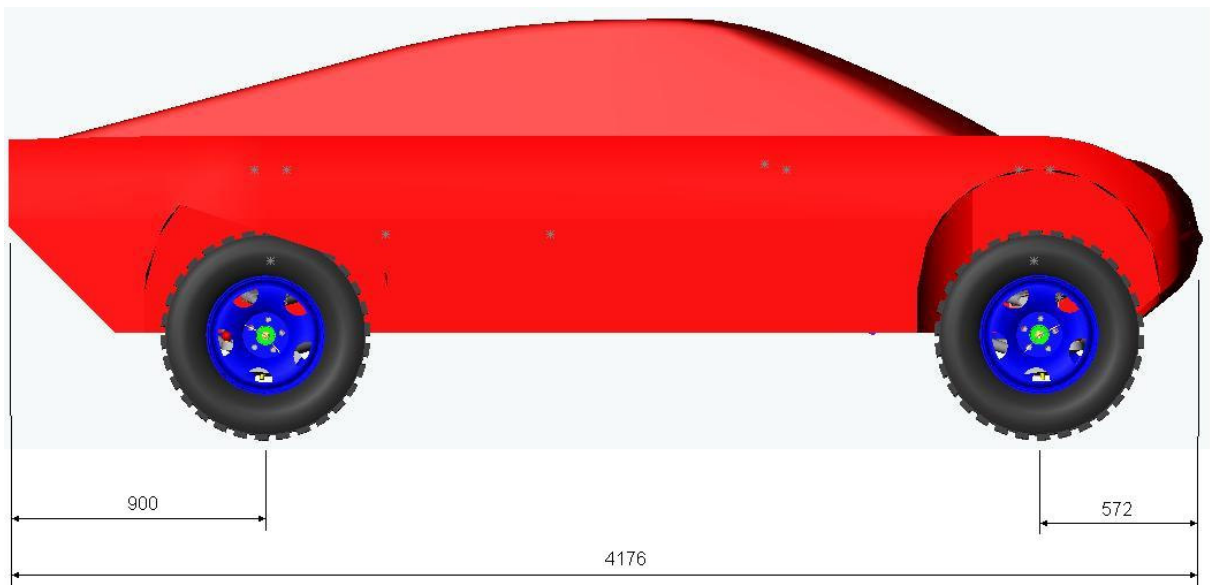


Figura 4.59: Dimensões longitudinais do veículo no seu desenho final.

4.3 Geração de malhas e condições de contorno

A partir desse item ocorre uma mudança significativa na metodologia usada ao longo desse estudo. De posse de um desenho, para cuja concepção foram usadas as teorias de mecânica de fluidos, passa-se agora pra uma fase de análises computacionais desse desenho. O método utilizado, como já citado no item 2.2, é chamado método dos volumes finitos, e a ferramenta computacional utilizada é um pacote de softwares que pode ser dividido em três blocos diferentes. O primeiro bloco é o pré-processador, onde o desenho é transformado num modelo com diversas condições de contorno. O segundo bloco, chamado de processador, é o que efetivamente realiza os cálculos necessários para a análise. Por fim, o terceiro bloco, chamado de pós-processador é a interface onde o usuário pode observar e analisar os resultados. No caso desse trabalho, o pré-processador é o software gerador de malha Gambit®, e o software que executa o papel do processador e pós-processador é o Fluent®.

4.3.1 Definição e geração das malhas

A função da malha na análise é de preencher com elementos todo o espaço onde se encontra o ar no volume analisado. É através desses elementos, pequenos volumes, que utilizando as equações de transporte descritas no item 2.2, é possível calcular o comportamento do fluxo de ar que os percorre. Conforme descrito também no item 2.2, por questões matemáticas o tamanho e a forma desses volumes é de extrema importância para a boa precisão dos resultados encontrados. Dessa forma, em uma conclusão simplista, pode-se dizer que quanto menores forem os elementos, mais fácil será a adequação deles às formas do desenho e mais preciso será o cálculo do fluxo. Por outro lado, elementos menores geram, para um mesmo volume analisado, um número muito maior de elementos, o que exige mais da capacidade de cálculo do software processador. Sendo assim, uma boa malha deve possuir elementos em formas muito proporcionais, tamanhos compatíveis com a

região do volume onde se encontram, considerando a importância e a complexidade do fluxo prevista para essa região, e não possuir um número elevado de elementos a fim de facilitar a execução dos cálculos.

O software Gambit® oferece uma grande flexibilidade para a geração de malhas, trabalhando com malhas não-estruturadas onde os elementos se ajustam a qualquer forma arbitrária de volume. O software oferece opções variadas de elementos, para superfícies elementos 2D em forma de triângulos e quadrilátero. Para volumes há opções de elementos 3D em forma de tetraedros, prismas, hexaedros, pirâmides e até mesmo poliedros.

O volume definido para a análise também é de grande importância. Como dito nos parágrafos anteriores, a malha deve preencher todo o espaço onde há ar, o que significa que deve preencher não o volume do desenho do veículo, mas sim o espaço que o envolve. Sendo assim, é preciso definir qual será esse espaço que envolverá o veículo, no qual será gerada a malha. Outro impasse surge nesse ponto, pois para que se certifique o volume de controle não interfira nas condições da análise, isto é, para que o volume de controle se aproxime da condição de um veículo rodando ao ar livre, ele deve ser grande o suficiente para que as perturbações do fluxo causadas pelo veículo não atinjam as paredes de delimitação. Novamente, em uma conclusão simplista, pode se dizer que esse volume então deve ser o maior possível. No entanto, um volume de controle maior necessita de mais elementos de um mesmo tamanho para preenchê-lo. Dessa forma é necessário que se estime um limite onde as perturbações não sejam mais significativas e considerá-lo como a fronteira desse volume. Estudos realizados por Ahmed (1984) com corpos genéricos em túnel de vento apontam uma proporção ideal entre as dimensões do corpo analisado e do volume de controle. Segundo ele, o comprimento do túnel de vento, real ou virtual, no caso o volume de controle criado pelo software, deve ser de oito vezes o comprimento do veículo. Já altura e largura devem ser ambas 2 vezes o comprimento do veículo, conforme observado na figura 4.60.

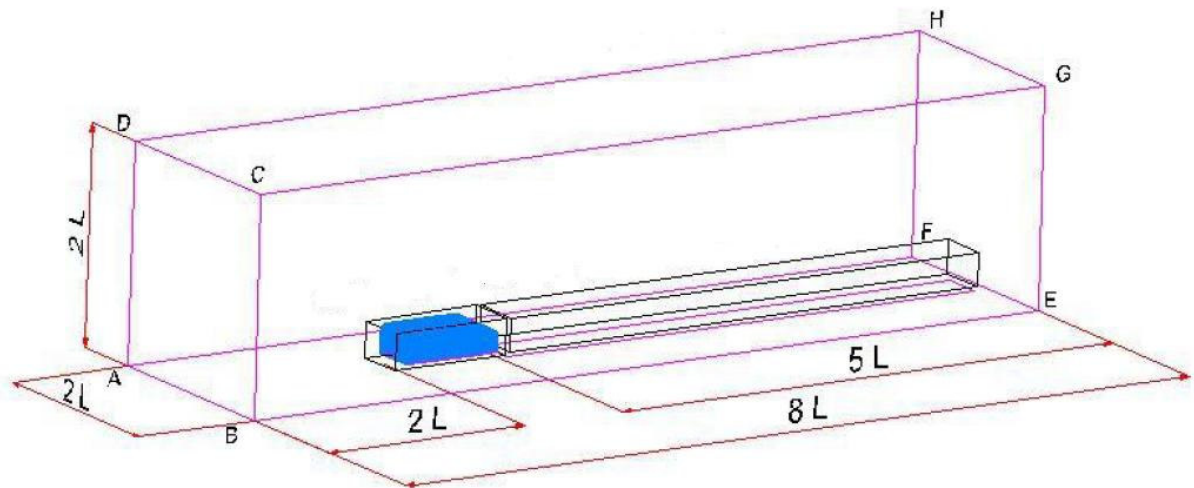


Figura 4.60: Dimensões do volume de controle em relação às dimensões do corpo.

Iniciando a confecção das malhas propriamente dita, uma das preocupações principais nessa fase das simulações iniciais era obter um modelo de malha que mais fielmente reproduzisse o problema real, gerando como resultado das simulações os valores mais precisos dos coeficientes de arrasto e sustentação. Para isso, algumas simulações de apoio foram realizadas, utilizando de um corpo genérico do qual os resultados dos coeficientes de arrasto e sustentação já eram conhecidos. Ahmed (1984) realizou uma série de simulações em túnel de vento com o corpo genérico no volume de controle apresentado na figura 4.61. Esse corpo é uma simplificação de um veículo, onde é possível variar a inclinação do que seria o plano do vidro traseiro criando diversas opções de traseira variando desde um *hatchback*, com o plano do vidro quase vertical, até um *fastback*, onde esse mesmo plano é quase horizontal. Como esses estudos apontam os valores dos coeficientes de arrasto e sustentação obtidos do ensaio desse corpo em diferentes ângulos, foi possível reproduzir as mesmas condições no ambiente virtual e comparar os resultados, ou seja, trabalhar as características da malha até que os resultados da simulação se aproximassem o máximo possível dos resultados práticos.

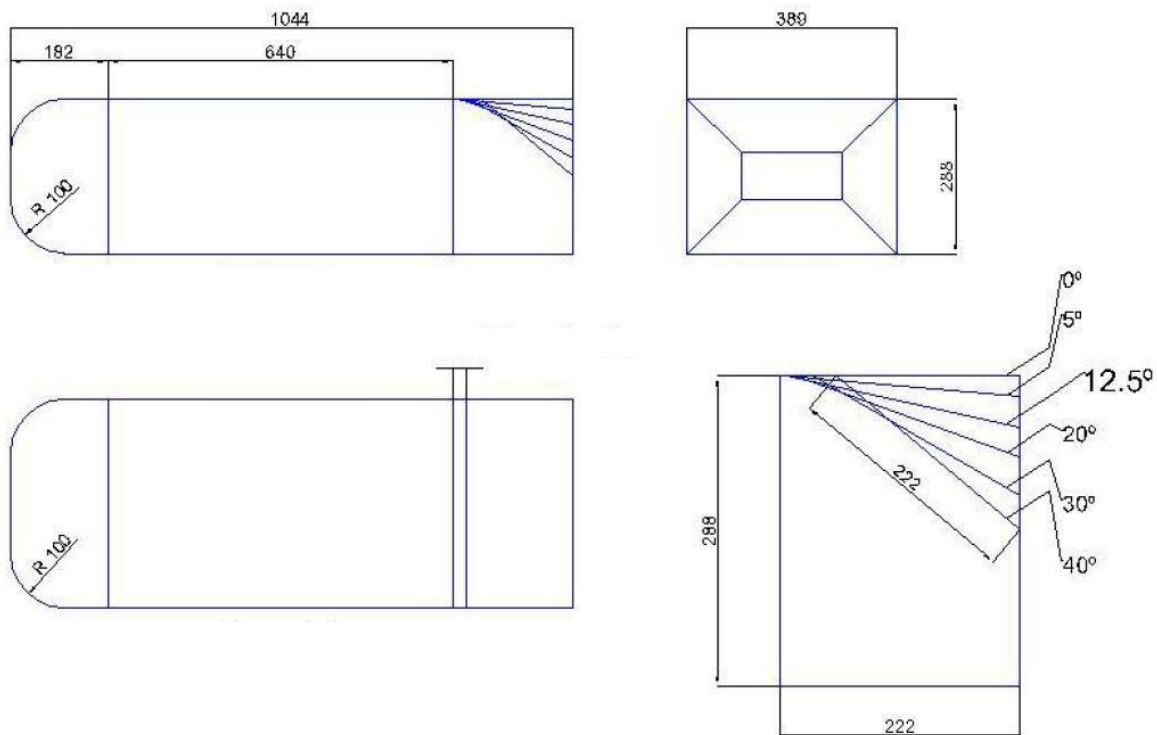


Figura 4.61: Dimensões do corpo genérico de Ahmed.

Após uma série de tentativas e erros foi possível chegar a algumas conclusões sobre as características da malha a serem trabalhadas para se atingir a opção mais viável. Em paralelo, as soluções adotadas na malha do corpo genérico eram reproduzidas na malha do veículo e observava-se a adequação das mesmas.

Pela facilidade de adequação à forma complexa da superfície do veículo, e também pela necessidade do trabalho de gerar inúmeras malhas, optou-se por trabalhar com uma malha totalmente tetraédrica. Nesse ponto há uma observação importante a se considerar: como o Gambit® gera as malhas 3D e os elementos são adequados automaticamente à forma, as proporções desses elementos são de grande variação em função da geometria do volume que está sendo preenchida. Ou seja, é possível encontrar elementos com proporções muito simétricas e outros com proporções entre as dimensões de algumas ordens de grandeza. O relevante sobre esse ponto é que a matriz criada pelo software processador utiliza no cálculo os valores dessas dimensões dos diferentes elementos, se esses valores possuem ordens de grandeza muito variadas as aproximações feitas pelo computador podem trazer certa imprecisão ao resultado. Para mensurar essa característica do elemento

utiliza-se um parâmetro chamado *Skewness*. A medida do *skewness* é dada pela equação:

$$skewness = \frac{tamanho_ótimo - tamanho_célula}{tamanho_ótimo}$$

Observando a equação, se vê que um elemento de boa qualidade, com dimensões perfeitamente proporcionais, tem *skewness* 0, e o elemento com pior proporção tem *skewness* 1. Como padrão, considera-se que elementos com *skewness* acima de 0,97 podem gerar imprecisões no cálculo. O próprio Gambit®, ao gerar a malha, avisa ao usuário o número de elementos encontrados com *skewness* acima desse valor. Para o projeto em questão, como o veículo possui diversos pontos com geometrias complexas, foi inevitável encontrar alguns elementos dentro dessa faixa. De qualquer forma, algum trabalho pode ser feito de maneira a limitar a formação desse tipo de elementos. Primeiramente, como o desenho é criado em um software CAD, há certas limitações quanto às geometrias que são possíveis de serem geradas. Isso implica que por mais fiel que seja o desenho, sempre haverá alguma imperfeição em relação ao modelo manufaturado. Só se deve tomar o cuidado para que esses detalhes tenham proporções desprezíveis em relação ao veículo, dessa forma não interferindo nas simulações. Pensando dessa maneira, já no desenho é possível ajustar certos traços que formem ângulos mais agudos ou dimensões tendendo a valores infinitesimais, os modificando de maneira a criar geometrias mais aceitáveis, mas que sejam insignificantes sob o ponto de vista da simulação. Outra maneira de amenizar o número de elementos com *skewness* elevado é não utilizar o recurso de geração automática de malha do Gambit® em todo o desenho. Nos pontos de geometria mais complexa é possível manualmente criar os elementos, ajustando suas dimensões de maneira adequada, e só então deixar o Gambit® realizar a geração automática do restante do desenho com geometrias mais simples.

Outro ponto notado durante a geração das malhas iniciais foi de que malhas com número de elementos acima de 2.000.000 ofereciam grande dificuldade de processamento pelo Fluent®, além de elevado tempo de processamento pelo Gambit® para a geração das mesmas. Dessa forma procurou-se gerar malhas que não ultrapassasse esse limite, para isso se constatou que seria necessário que os

elementos de superfície na carroceria do veículo tivessem dimensão média de no mínimo 40 mm. Logicamente, esse valor de 40 mm não é necessário ser utilizado nas fronteiras do volume de controle, nessa região verificou-se que elementos com um décimo da dimensão da aresta de entrada do volume de controle, ou seja, próximo a 800 mm, já apresentavam resultados satisfatórios. Com isso as malhas geradas possuem um aumento progressivo da dimensão do elemento à medida que se afastam da superfície do veículo. Um recurso utilizado para facilitar esse aumento progressivo da dimensão dos elementos a medida que se afasta da superfície do veículo é a divisão do volume de controle em diferentes sub-volumes, onde para cada um desses sub-volumes é possível atribuir uma ordem de grandeza para a dimensão dos elementos.

É nesse processo de refinamento da malha, ou melhor, a maneira com que os elementos de diferentes tamanhos são distribuídos ao longo do volume, que se encontraram as alterações mais significativas para a obtenção de bons resultados. Diferentes opções de malha foram geradas para um mesmo desenho, seja ele o corpo genérico de Ahmed ou o desenho inicial do veículo, de maneira que após a análise dos diversos resultados foi possível chegar à melhor opção de refinamento.

Um ponto de apoio fundamental nessa etapa foi o trabalho de Korkischko (2006), que entre outros estudos realizou a simulação do escoamento por um corpo de Ahmed em condições muito semelhantes às utilizadas por esse trabalho. Korkischko (2006) conseguiu um resultado muito bom em suas simulações, com discrepância menor do que 2% em relação aos valores práticos obtidos por Ahmed (1984). Baseado nas características de malha por ele utilizadas foi possível chegar com maior rapidez à condição considerada ideal para o presente trabalho. Essa condição final teve configuração de volumes e dimensões de elementos muito próximas à de Korkischko (2006), porém com certas simplificações que permitiam a sua construção de maneira rápida e eficiente, o que foi extremamente importante devido nesse trabalho devido à necessidade de geração de inúmeras malhas. Essa condição por sua vez foi validada na simulação de um corpo de Ahmed e depois replicada a todos os desenhos do veículo. Por fim, um recurso que se mostrou muito útil em certas fases do estudo foi a divisão da malha pela metade, exatamente no plano longitudinal vertical do volume de controle. Como o desenho é perfeitamente simétrico, o pacote de softwares Gambit® e Fluent® oferece a opção de definir uma

condição de simetria para o plano que divide o desenho ao meio, fazendo as aproximações necessárias para que o resultado seja o mesmo da condição onde o desenho é simulado por inteiro. Com isso a malha simulada possui a metade do número de elementos da original, o que simplifica bastante o cálculo e conseqüentemente reduz significativamente o tempo de simulação.

As características da malha final adotada, tanto para o corpo de Ahmed quanto para o veículo, são:

- medida de referência L igual ao comprimento do corpo, onde para o estudo do veículo adotou-se por arredondamento 4200mm (ao invés dos 4176mm obtidos);
- volume principal exterior com dimensões em x, y e z respectivamente 8L, 2L e 2L, posicionado 2L adiante do extremo frontal do corpo, resultando para o estudo do veículo 33600mm, 8400mm e 8400, com 8400mm adiante do corpo;
- volume intermediário com dimensões em x, y e z respectivamente 6.5L, L e L, posicionado 0.5L adiante do extremo frontal do corpo e se estendendo até a face posterior do volume principal, resultando para o estudo do veículo 27300mm, 4200mm e 4200, com 2100mm adiante do corpo;
- volume interior com dimensões em x, y e z respectivamente 1.75L, 1.25L e 1.6L, posicionado 0.06L adiante do extremo frontal do corpo, resultando para o estudo do veículo 7350mm, 2300mm e 1800, com 250mm adiante do corpo;
- dimensão de elementos de aproximadamente 20% de L nas faces do volume principal exterior, resultando para o estudo do veículo 800mm;
- dimensão de elementos de aproximadamente 5% de L nas faces do volume intermediário, resultando para o estudo do veículo 200mm;
- dimensão de elementos de aproximadamente 1.5% de L nas faces do volume interior, resultando para o estudo do veículo 60mm;
- dimensão de elementos de aproximadamente 1% de L nas faces do corpo, resultando para o estudo do veículo 40mm.

Exemplos das malhas para o corpo de Ahmed, para o veículo com malha completa e para o veículo com meia malha e condição de simetria são colocados nas figuras 4.62 a 4.67.

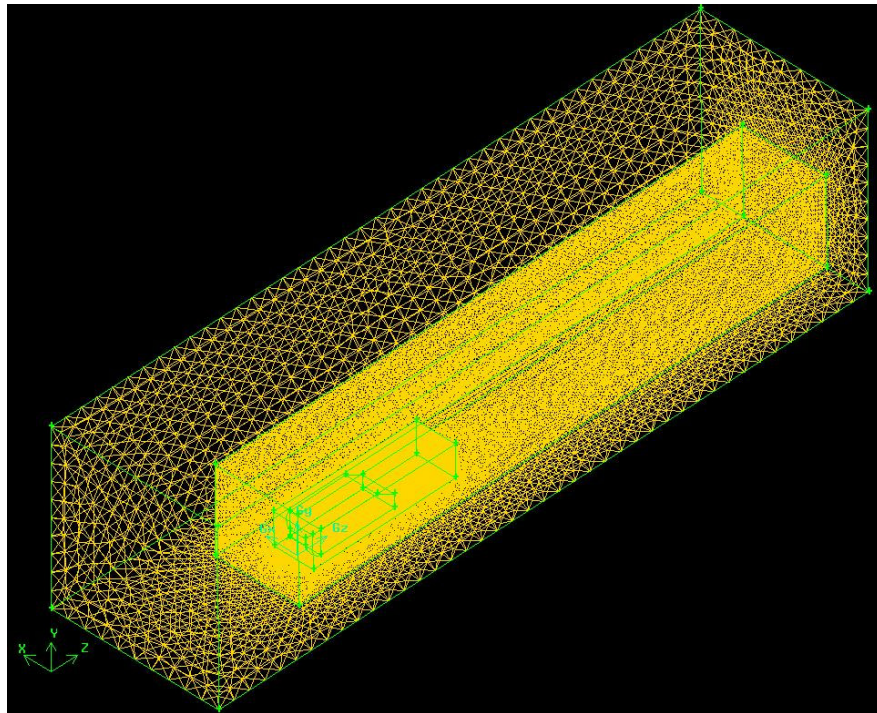


Figura 4.62: Malha final para o corpo de Ahmed, volume de controle.

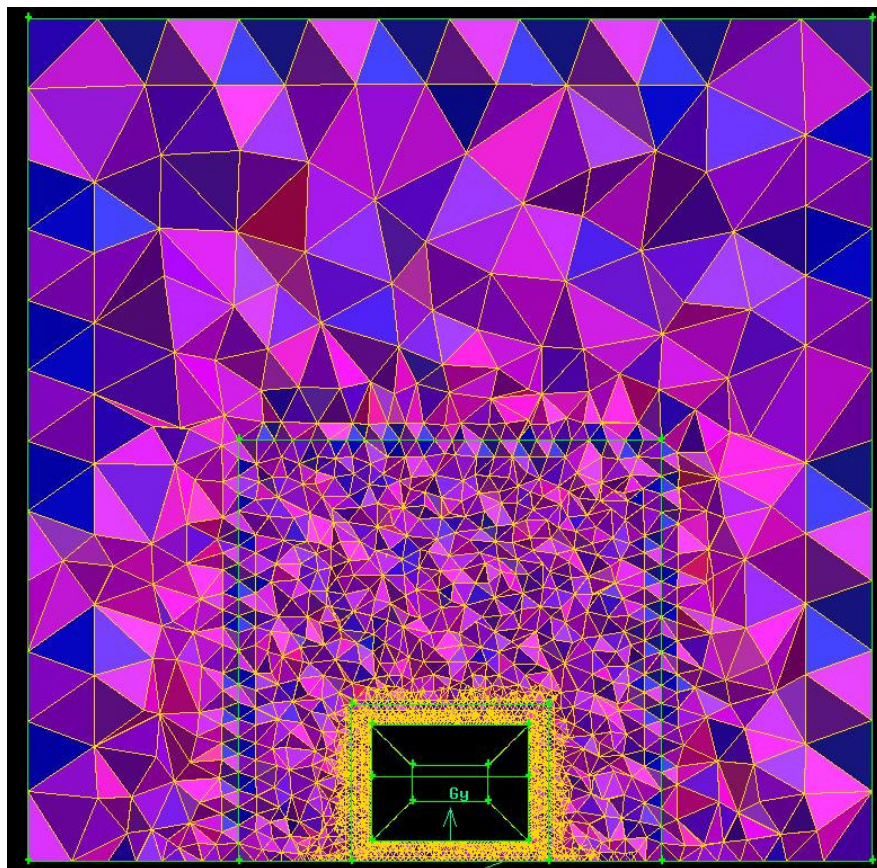


Figura 4.63: Malha final para o corpo de Ahmed, corte transversal.

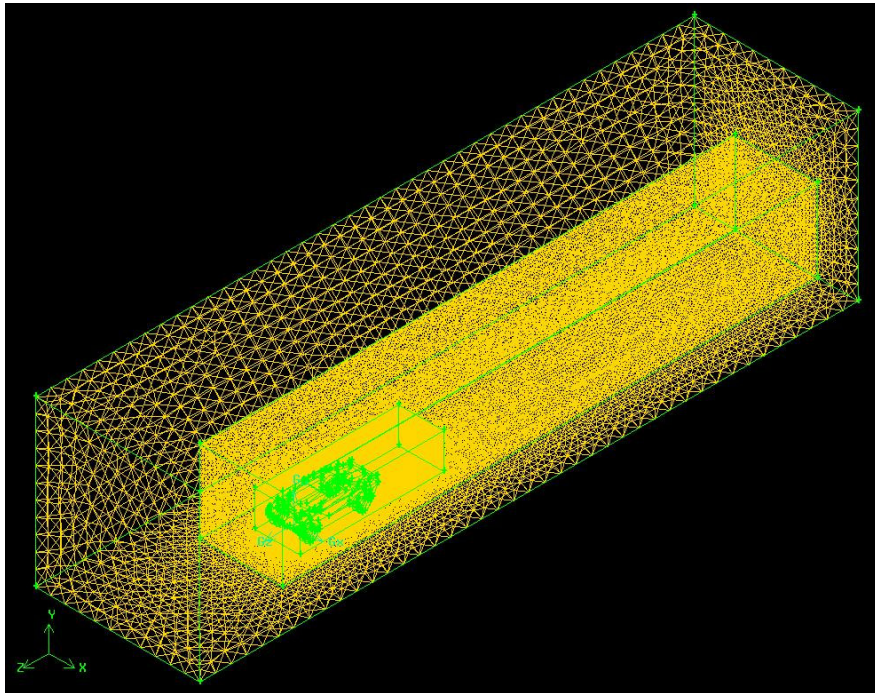


Figura 4.64: Malha final completa para o veículo, volume de controle.

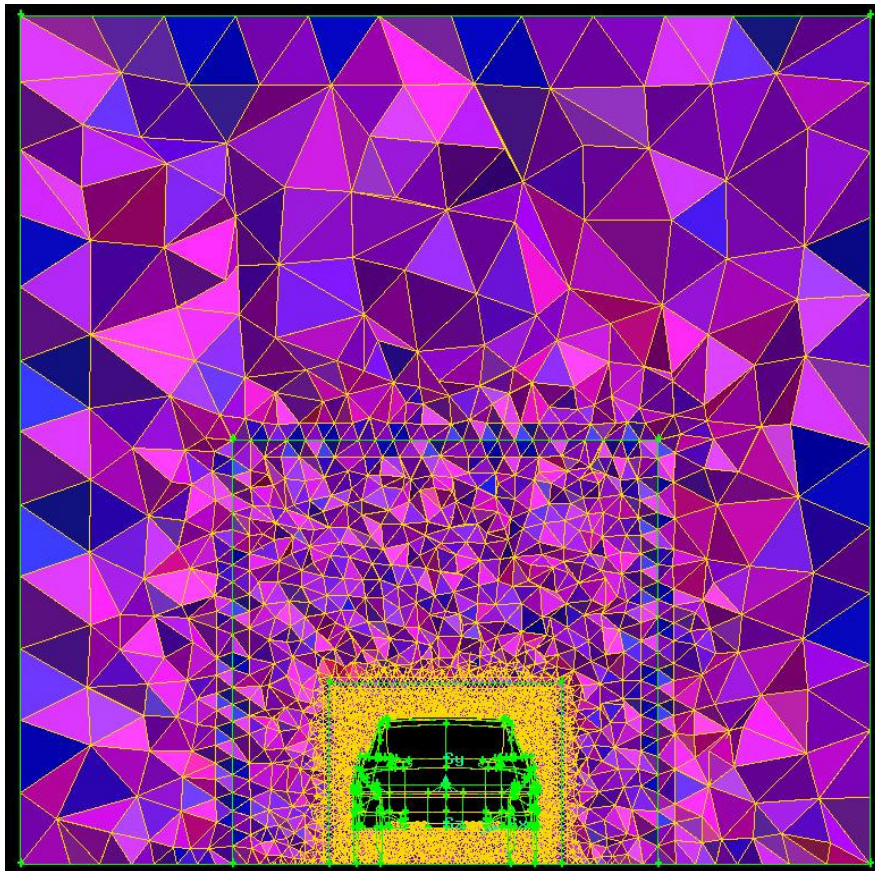


Figura 4.65: Malha final completa para o veículo, corte transversal.

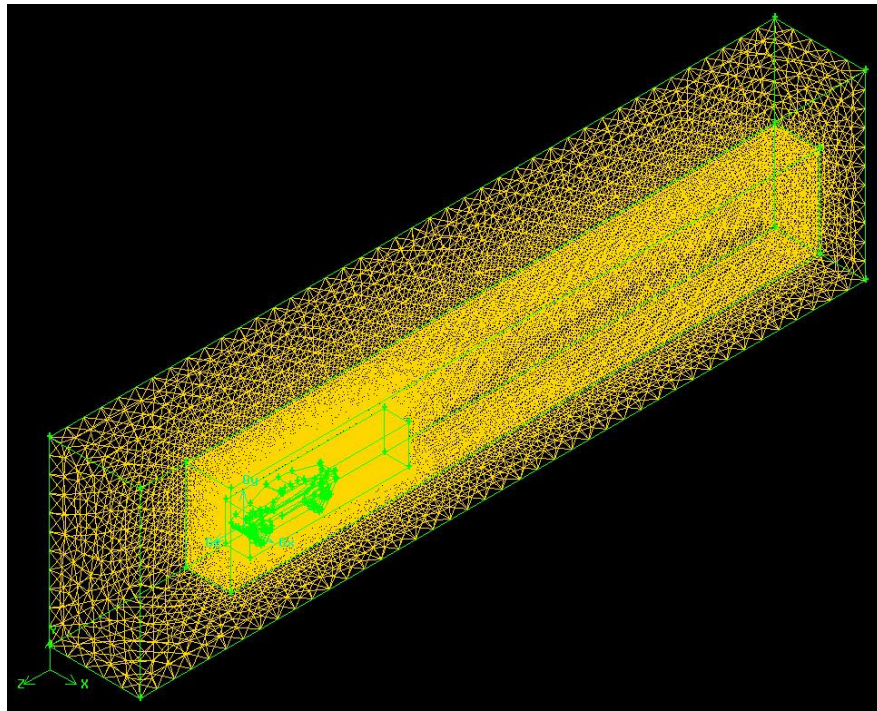


Figura 4.66: Malha final com corte e simetria para o veículo, volume de controle.

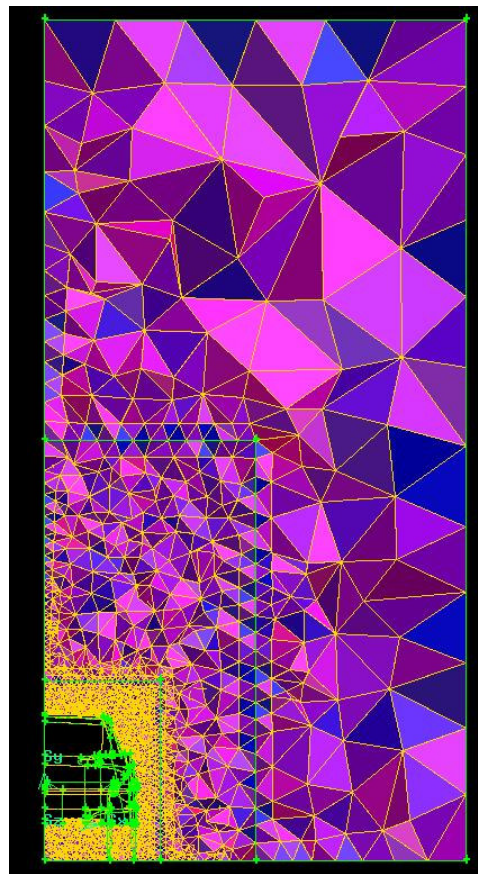


Figura 4.67: Malha final com corte e simetria para o veículo, corte transversal.

4.3.2 Condições de contorno

De posse de uma malha gerada, o próximo passo antes de executar a simulação é a definição das condições de contorno. A correta definição dos parâmetros para as diferentes superfícies é fundamental para garantir bons resultados na simulação. Esse passo é executado parcialmente no Gambit®, onde as superfícies que necessitam de configuração são definidas, e posteriormente no Fluent® onde os valores para cada parâmetro são atribuídos. Nos desenhos em questão basicamente foram definidas condições para as seguintes superfícies:

- Entrada do túnel
- Saída do túnel
- Paredes laterais e teto
- Solo
- Superfície do veículo
- Plano de simetria (para as malhas com corte e simetria)

Para a entrada do túnel o Fluent® permite que sejam definidos valores para a velocidade, densidade e turbulência. Para uma análise inicial, os valores de densidade e turbulência foram utilizados os padrões do próprio Fluent®, porém em seguida percebeu-se que a atribuição de valores incorretos de turbulência afetava significativamente a precisão dos resultados. Dessa forma o estudo baseou-se nos dados utilizados por Korkischko (2006), onde o método de especificação de turbulência utilizado foi um dos oferecidos pelo Fluent® chamado *Intensity and Viscosity Ratio*, com os valores *Turbulence Intensity* igual a 0,1% e *Turbulence Viscosity Ratio* igual a 1. Esses números foram atribuídos na simulação com corpo de Ahmed e os resultados se mostraram muito precisos em relação aos resultados práticos apontados por Ahmed (1984).

A velocidade foi um parâmetro bastante trabalhado, o qual é descrito em detalhes no item 4.4, mas assim como os parâmetros de densidade, por questão de simplificação, adotou-se que não havia qualquer perturbação inicial no fluxo de entrada, assumindo assim que a velocidade absoluta inicial do ar no infinito é zero, atuando dessa forma apenas a velocidade relativa sobre o veículo.

A saída do túnel foi dada como uma condição de pressão constante pelo Gambit®. Já no Fluent®, há a possibilidade de definição de parâmetros como pressão, e turbulência. Novamente, os valores adotados foram os padrões oferecidos pelo próprio Fluent®.

Para as paredes laterais e o teto do túnel foi dada a condição de simetria. Como o túnel definido é grande o suficiente para se esperar que as perturbações do fluxo causadas pelo veículo não atinjam com intensidade significativa suas paredes, é aceitável assumir que o fluxo nesse ponto é praticamente o mesmo que está ao infinito. Baseado nisso, para concluir a condição de que o veículo está submetido a um ambiente aberto, é aplicada a condição de simetria às paredes, que elimina a propriedade de aderência na superfície em questão. Não há nenhum parâmetro a ser definido no Fluent® para essa condição.

O solo, diferente das paredes laterais e teto do túnel, tem uma influência muito significativa na simulação. A condição real de um veículo é estar rodando sobre uma superfície com certo valor de rugosidade, como asfalto por exemplo, onde velocidade relativa em relação a ele é praticamente a mesma que sobre o ar. Ou seja, o ar e o solo estão parados e o veículo se move. Porém no software não é possível definir a condição exatamente dessa forma, o que é feito é considerar o veículo parado e todo o ambiente se movendo ao seu redor. Sendo assim, é necessário atribuir no Fluent® a propriedade de parede móvel para o solo, com seu valor de velocidade igual ao atribuído para o ar na entrada. Os outros parâmetros permitidos pelo Fluent®, como rugosidade, também por simplificação foram adotados como o padrão do software nessa fase das simulações.

A superfície do veículo é definida como parede, porém diferente das outras até então considerando a condição de aderência. Essa condição é necessária para que o Fluent®, através do modelo de turbulência, possa fazer o devido cálculo do fluxo dentro da camada limite, próximo a essa superfície. O Fluent® permite a atribuição de valor de rugosidade para essa condição, foi adotado para o caso o padrão do próprio Fluent®.

Por fim, na condição onde a malha é gerada dividida ao meio pelo plano longitudinal vertical, nessa parede do volume de controle é dada a condição de

simetria, de maneira que o Fluent® faça as suposições necessárias para que os resultados sejam os mesmos de uma simulação com a malha completa.

Há um detalhe importante dentre as condições de contorno que certamente possui influência significativa nos resultados, que é a condição de rotação das superfícies do conjunto de roda. Esse conjunto em rotação, segundo Katz (2005), tende a reduzir tanto o coeficiente de arrasto quanto o de sustentação quando comparado com rodas estáticas. A magnitude desse efeito depende de uma série de fatores, entre eles a exposição do conjunto de rodas ao fluxo, o que no caso do veículo em questão, que possui rodas bastante expostas, provavelmente haveria um ganho significativo nos coeficientes ao considerar esse efeito. Essa condição por simplificação não foi considerada nesse trabalho.

4.4 Simulação

Como descrito no item 2.2, é pelas equações de transporte aplicadas aos elementos da malha que se calcula a variação do fluxo do de ar entre eles. Quem executa esse cálculo é o software processador, nesse caso o Fluent®. De acordo com a literatura consultada, em particular Korkischko (2006), era sabido de antemão que o modelo de turbulência que provavelmente melhor se adequaria à necessidade do presente estudo e traria os resultados mais precisos é o $k-\omega$ SST. Ainda assim, como efeito didático e também de validação, algumas simulações foram feitas no início do estudo com outros modelos de turbulência, no caso $k-\epsilon$, $k-\omega$ Standard, porém realmente os resultados não se mostraram precisos, e essas opções foram definitivamente descartadas.

Dentro do modelo o software Fluent® ainda oferece algumas opções de configurações de detalhes do método numérico e dentre as disponíveis duas delas foram testadas. A primeira é a ativação do recurso *Transitional Flows*, que força o cálculo de maneira a não considerar escoamentos turbulentos próximos à camada limite. A segunda foi a modificação do modelo de interpolação da variável Φ do termo convectivo da equação de transporte, onde a opção padrão do Fluent® é trabalhar com *first order upwind* e a alternativa testada foi a *second order upwind*.

Nos testes executados observou-se que a ativação do recurso *Transitional Flows* não apresentava alterações significativas nos resultados, sendo assim também foi descartada sua utilização. Já utilização da opção *second order upwind*, apesar de ser teoricamente mais precisa que a *first order upwind*, dificultou a convergência da solução. Portanto foi então mantida também a opção padrão do Fluent® *first order upwind*.

Outro recurso que o Fluent® disponibiliza é a opção da ativação da equação de energia. Essa equação é necessária basicamente em duas situações, primeiramente quando se trata de escoamentos compressíveis, e segundo quando transferência de calor é considerada. Para os valores de velocidade considerados não há a ocorrência de escoamentos compressíveis, esses só estão presentes em velocidades próximas à velocidade do som. Sendo assim, por essa razão definitivamente não é necessário utilizar a equação de energia. Já a questão de transferência de calor, só seria utilizada nesse trabalho em uma condição aprimorada onde os sistemas de arrefecimento fossem considerados, o que não é proposta desse trabalho, logo a equação de energia não foi ativada.

Um parâmetro importante a ser declarado ao início da simulação é a velocidade do fluxo de ar à entrada do túnel. Algumas simulações do veículo inicialmente foram realizadas com diferentes velocidades a fim de obter o valor que apresentasse os melhores resultados. Os números obtidos para os coeficientes de arrasto e sustentação não apresentaram variações significativas em função das diferentes velocidades, porém a análise gráfica do comportamento do fluxo, os diagramas de pressão e velocidade, fica mais bem definida quando utilizadas velocidades mais altas. Porém essa opção de trabalhar com velocidades mais altas trouxe um empecilho, notou-se que para esses valores elevados a simulação apresentava dificuldade de convergência. Sendo assim, dentre as velocidades testadas de 20 m/s, 30 m/s, 40 m/s, 55 m/s e 60 m/s, optou-se por trabalhar com o valor de 30 m/s, que seria um valor mais alto que ainda mantivesse o número de Reynolds abaixo da faixa de 10^7 , a partir da qual o escoamento passaria a assumir característica predominantemente turbulenta. O número de Reynolds resultante é $8,56 \cdot 10^6$, para 30 m/s e o comprimento do veículo de 4176 mm. Nessa faixa ainda há uma mescla de escoamento laminar e turbulento.

5 RESULTADOS

Nesse trabalho foram realizadas 60 tentativas de simulações, onde 48 foram concluídas com sucesso e 36 apresentaram resultados consistentes. Dessas 36 simulações 3 foram realizadas com o corpo de Ahmed, e 33 com o veículo. São essas as simulações relevantes para o estudo, enquanto as 27 tentativas restantes corresponderam à fase de aprendizado necessária até atingir a consistência desejada nos resultados.

Todas as simulações relevantes possuíam malhas com características muito semelhantes, sendo a única variação a opção de trabalhar com a malha completa ou com meia malha e simetria. O número de elementos para as malhas completa girava em torno de 1700000 elementos, enquanto obviamente as versões com meia malha tinham cerca de 850000 elementos. Embora o número de elementos tenha sido muito constante, o tempo necessário para a convergência dos resultados das diversas simulações variou bastante. De maneira geral as simulações com malha completa tomavam cerca 4 a 6 horas para alcançar estabilidade na variação dos resíduos, porém nem todas atingiam a convergência nesse ponto. Ou melhor, os resíduos praticamente estabilizavam, mas em um valor mais alto que o colocado como critério de convergência. Com isso para, forçar a convergência, alterações nos valores dos coeficientes de sub-relaxação do modelo de turbulência utilizado pelo Fluent® foram necessárias, e a partir daí cada simulação tomou proporções diferentes de tempo para atingir a convergência. Algumas convergiram com pouco esforço, em um tempo próximo às 6 horas originais, em outras chegou-se a depender ao redor de 3 dias de processamento entre as diversas manobras nos valores dos coeficientes. Para as simulações com meia malha a estabilização dos resíduos ocorria com cerca de 2 horas, porém nesse caso a convergência se mostrou bem mais fácil atingir do que na opção de malha completa. O maior tempo necessário foi de aproximadamente 8 horas dentre poucas alterações nos valores dos coeficientes de sub-relaxação.

Basicamente duas máquinas foram utilizadas nas simulações, uma delas com processador Pentium D Dual Core, 3.4GHz, com 2GB de memória RAM; a outra com

processador Centrino Core 2 Duo com 2GHz e 2GB memória RAM. Não houve diferença significativa de tempo de processamento entre máquinas.

A primeira simulação relevante foi sobre um corpo de Ahmed, onde o valor obtido para o coeficiente de arrasto teve uma variação de apenas 4% sobre o apresentado por Ahmed (1984). Essa foi a simulação que validou as proporções da malha e os parâmetros da simulação, a partir de então todas as simulações com o veículo seguiram esse formato. Os valores obtidos foram:

- $C_d = 0,393$
- $C_l = 0,453$

As figuras 5.1 a 5.3 mostram respectivamente o diagrama de pressão na superfície, diagrama velocidade no plano vertical longitudinal e as linhas de fluxo sobre o corpo.

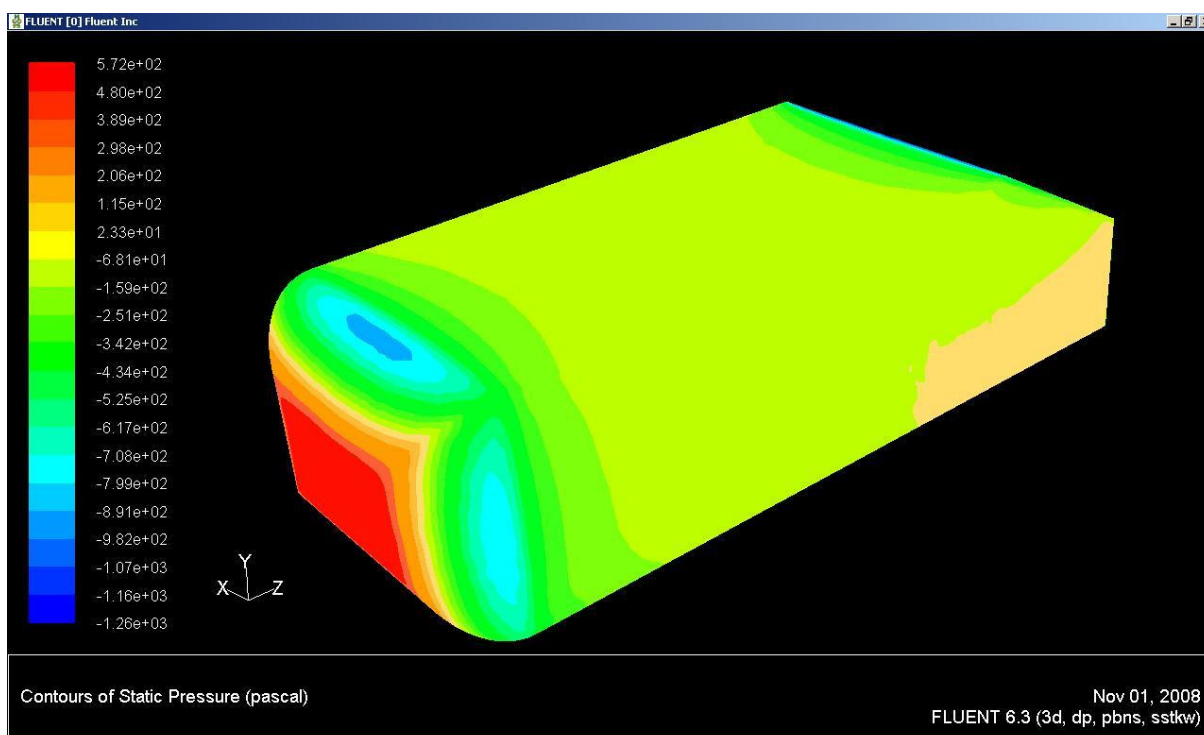


Figura 5.1: Diagrama de pressão na superfície do corpo de Ahmed.

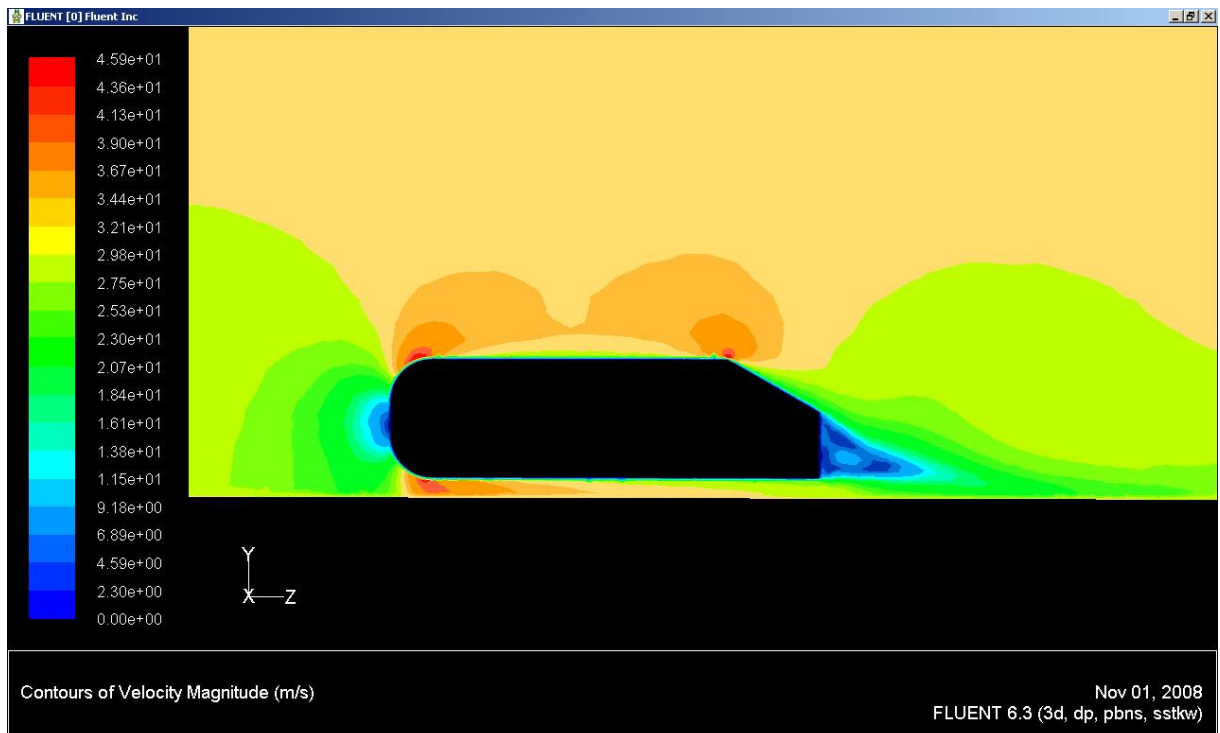


Figura 5.2: Diagrama de velocidade no plano vertical longitudinal do corpo de Ahmed.

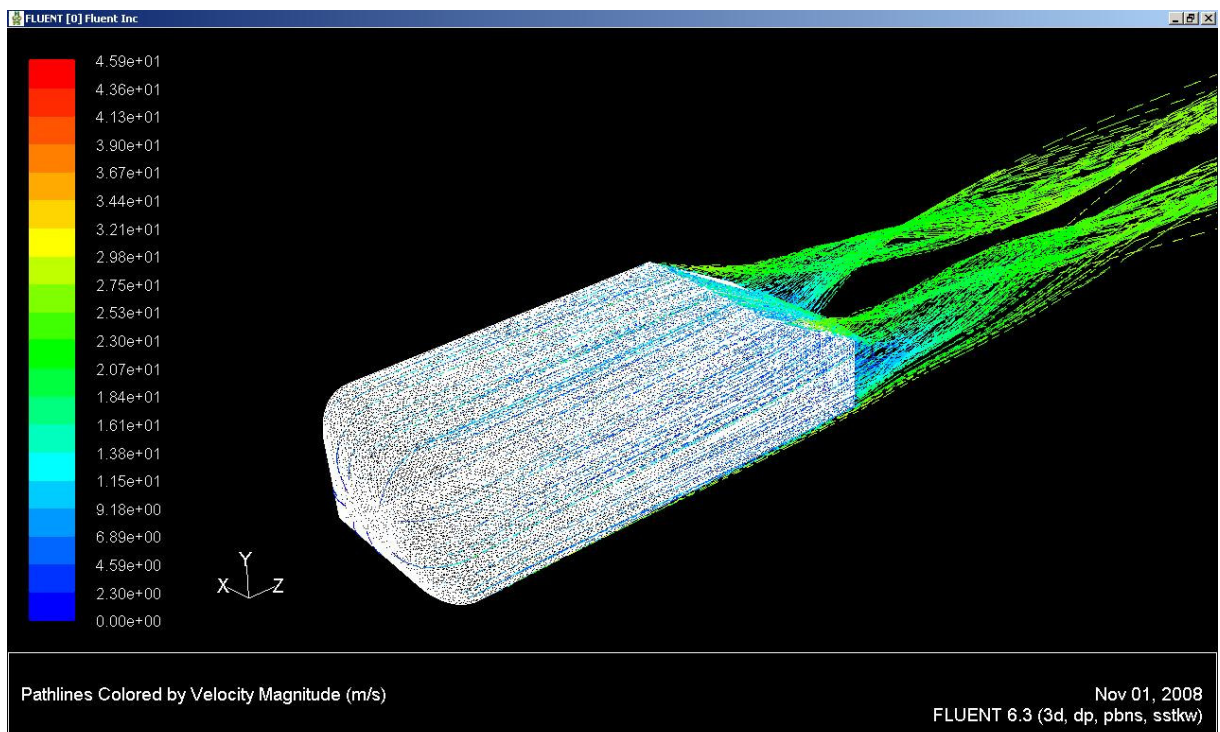


Figura 5.3: Linhas de fluxo sobre o corpo de Ahmed.

O chamado desenho inicial do veículo foi concebido logo no início dos estudos. Seu conceito já se apoiou fortemente nas teorias de aerodinâmica, entretanto uma série de detalhes recomendados no item 4.1 ainda não havia sido considerada nessa fase. Os resultados obtidos nessa simulação foram:

- $C_d = 0,485$
- $C_l = 0,318$
- $M_z = 243 \text{ N}$

O momento (M_z) foi atribuído sobre um eixo no sentido e orientação de Z positivo, localizado no plano do solo e exatamente no ponto médio entre os eixos do veículo. Com esse valor é possível calcular a transferência de peso entre o eixo dianteiro e traseiro gerada pelas forças de aerodinâmicas. Em conjunto com o valor do coeficiente de sustentação, é possível calcular qual a carga aerodinâmica vertical aplicada sobre cada eixo. Para esse caso, na velocidade de 30 m/s, obtiveram-se as normais para o eixo dianteiro e traseiro respectivamente:

- $N_d = 363 \text{ N}$
- $N_t = 3,8 \text{ N}$

Note que com o coeficiente de sustentação positivo o efeito no veículo é um alívio de peso. Para dar um exemplo mais detalhado, tenha que a massa do veículo em ordem de marcha, com piloto e navegador, é de aproximadamente 1900 Kg, divididas exatamente 50% em cada eixo, o que resulta 850 Kg por eixo. Considerando o veículo trafegando a 30 m/s, as forças aerodinâmicas provocam nesse veículo um alívio de peso tal que resultaria numa massa equivalente para os eixos dianteiro e traseiro respectivamente 812,94 Kg e 849,61 Kg. Hucho (1998) cita que sob o quesito de estabilidade direcional, principalmente em altas velocidades, é desejável que o veículo tenha para o eixo dianteiro sustentação zero, porém é aceitável certo valor positivo. Já para o eixo traseiro é aceitável sustentação zero, porém o recomendável é que esse valor seja negativo, ou seja, que o veículo possua *downforce* no eixo traseiro. Sendo assim o balanceamento obtido nessa primeira configuração está dentro do recomendável sob o quesito de estabilidade direcional, porém sob o quesito de aceleração lateral em curva é importante que os valores de sustentação nos eixos sejam negativos e com a maior intensidade

possível. Segundo Hucho (1998) é possível até certo ponto obter bons valores de sustentação negativa sem uma penalidade significativa no arrasto, porém a partir desse ponto é inevitável que para um maior incremento nesses valores se perca em arrasto. Nas simulações seguintes esse ponto foi bastante considerado, para escolha de uma solução houve sempre uma ponderação entre a proporção de ganho entre arrasto e sustentação, sem o favorecimento de um parâmetro ou outro. As figuras 5.4 a 5.6 mostram os diagramas obtidos na simulação com o desenho inicial do veículo.

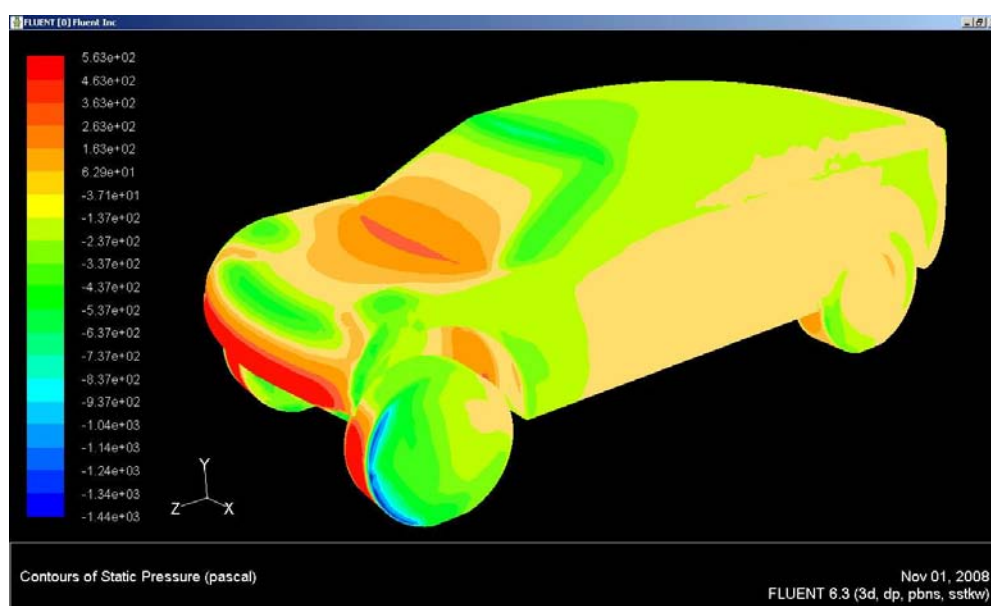


Figura 5.4: Diagrama de pressão na superfície do veículo inicial.

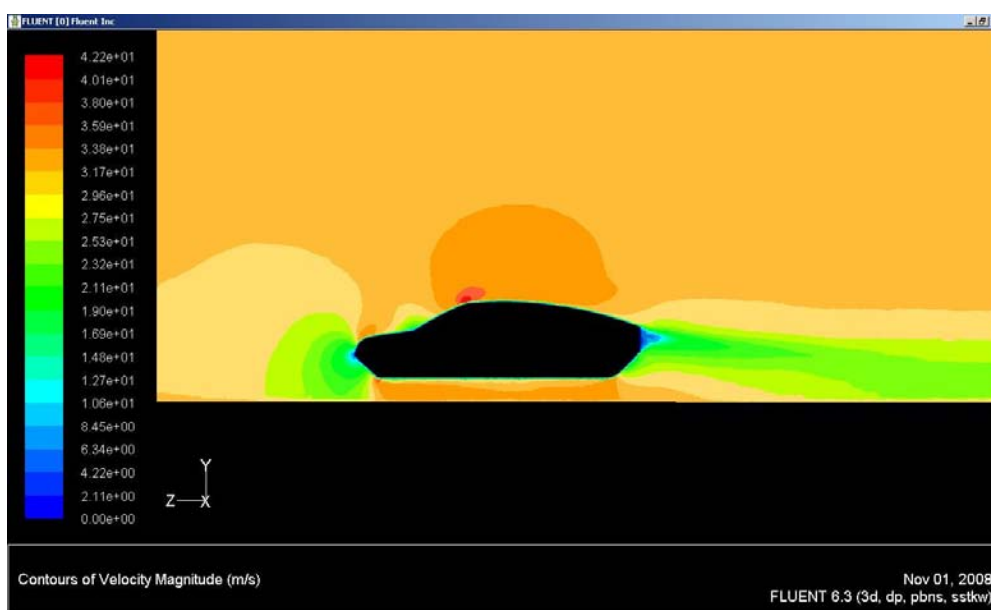


Figura 5.5: Diagrama de velocidade no plano vertical longitudinal do veículo inicial.

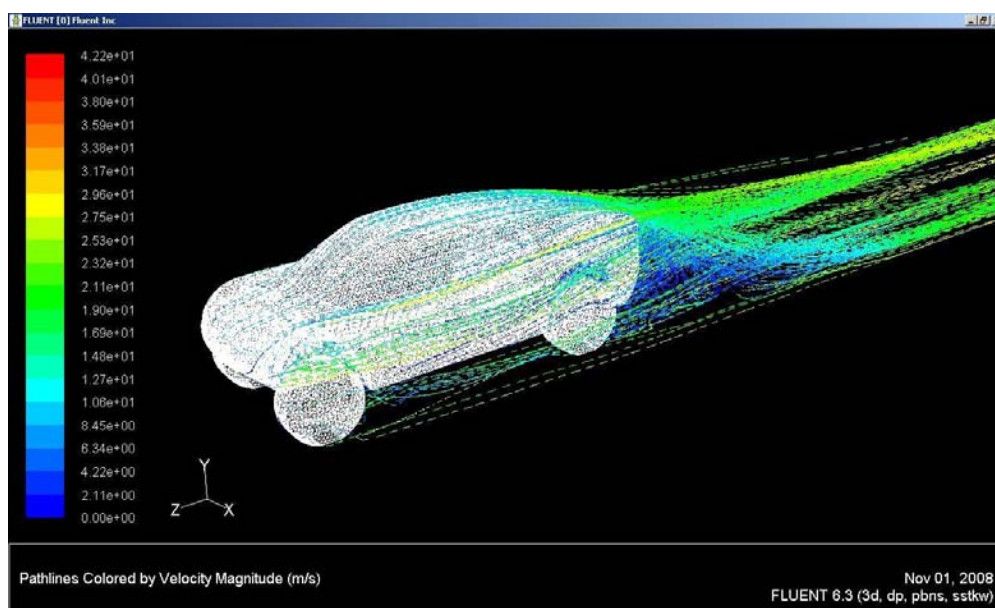


Figura 5.6: Linhas de fluxo sobre o veículo inicial.

Recordando o citado no início do item 4.2, o desenho do veículo se divide em dois blocos, corpo e teto. Iniciando com as modificações na traseira, expostas no item 4.2.5, duas modificações no teto foram realizadas, uma alterando a inclinação da traseira em 15 graus e outra com o *boat-tailing* a 10 graus. Os resultados obtidos são os expostos na tabela 5.1.

Modificação:	Cd	Cl	Mx (N)	Arrasto (N)	Sustentação (N)	Nd (N)	Nt (N)
Inicial	0,485	0,318	243	560	367	363	3,8
Inclinação	0,481	0,190	512	556	220	489	-269
<i>Boat-tailing</i>	0,486	0,196	530	562	227	506	-279

Tabela 5.1: resultados para as alterações na traseira no bloco do teto.

Observa-se que essas alterações não trouxeram variações significativas no coeficiente de arrasto, porém vê-se grande ganho no valor do coeficiente de sustentação. Comparando as duas modificações, observa-se que há uma diferença muito pequena entre elas, a qual se poderia colocar como insignificante perante a tolerância dos resultados. Sendo assim, a opção adotada foi apenas a inclinação,

por uma questão meramente mecânica de que sem o *boat-tailing* há maior espaço para acomodação de componentes mecânicos.

Novamente na traseira, porém agora no corpo do veículo, duas alterações foram feitas, uma delas retirando os arredondamentos da aresta vertical mantendo o mesmo ângulo de *boat-tailing* e a outra também sem os arredondamentos, porém aumentando o ângulo de *boat-tailing* para 15 graus. Os resultados são expostos na tabela 5.2.

Modificação:	Cd	Cl	Mx (N)	Arrasto (N)	Sustentação (N)	Nd (N)	Nt (N)
Inicial	0,485	0,318	243	560	367	363	3,8
Arredondamentos	0,492	0,285	259	569	329	356	-27
<i>Boat-tailing</i>	0,484	0,264	281	559	305	361	-55

Tabela 5.2: resultados para as alterações na traseira do corpo.

Observa-se que apenas a retirada dos arredondamentos prejudicou o coeficiente de arrasto, apesar de apresentar um ganho no coeficiente de sustentação. Já a opção de retirar os arredondamentos com o aumento do ângulo de *boat-tailing* trouxe a melhoria no coeficiente de sustentação sem alteração no coeficiente de arrasto, o que fez com que fosse adotada.

Ainda na traseira, agora na parte inferior do corpo, quatro alterações individuais foram feitas no difusor, conforme também relatado no item 4.2.5, sendo elas a retirada completa do difusor, difusor de 15 graus partindo abaixo dos acentos, difusor de 15 graus partindo abaixo dos tanques de combustível e a modificação das arestas. Os resultados são expostos na tabela 5.3.

Modificação:	Cd	Cl	Mx (N)	Arrasto (N)	Sustentação (N)	Nd (N)	Nt (N)
Inicial	0,485	0,318	243	560	367	363	3,8
Sem difusor	0,505	0,401	144	584	463	338	125
Sob acentos	0,452	0,246	62	522	284	188	196
Sob tanques	0,483	0,283	224	588	327	330	-3
Arestas	0,487	0,299	217	563	3546	333	12
Soma	0,440	0,245	76	509	283	198	85

Tabela 5.3: Resultados para as alterações no difusor.

A melhor opção do difusor foi o de maior dimensão, partindo abaixo dos acentos, fato esse já colocado por Hucho (1998) como teoricamente a melhor opção. A modificação das arestas também apresentou pequena contribuição, portanto a versão final do difusor foi a soma dessas duas alterações, onde os resultados são indicados na última linha da tabela 5.3. Vê-se que as contribuições tanto em arrasto quanto em sustentação foram muito significativas, da ordem de 10% e 20% respectivamente.

Partindo para as alterações na dianteira, devido à característica do desenho, não foi possível alterar individualmente cada ponto desejado, mas sim a criação de um novo desenho completo da frente com todas as alterações, o qual pode ser observado no item 4.2.2. O resultado desse novo desenho em comparação com o desenho inicial é exposto na tabela 5.4.

Modificação:	Cd	Cl	Mx (N)	Arrasto (N)	Sustentação (N)	Nd (N)	Nt (N)
Inicial	0,485	0,318	243	560	367	363	3,8
Frente	0,445	0,248	136	514	287	244	43

Tabela 5.4: Resultados para as alterações na dianteira.

Para essa alteração é possível fazer uma constatação prática de algumas colocações teóricas apontadas no item 4.1.2. É recomendado que as diversas arestas tenham um raio de arredondamento mínimo, necessário para evitar o descolamento do fluxo, solução essa que não foi explorada em alguns pontos no veículo inicial. Sendo assim, é possível observar na figura 5.7, pelo diagrama de pressão, que há o indício desses descolamentos indicado pelos focos de baixa pressão em alguns pontos. Com as alterações realizadas, vê-se que no novo diagrama de pressão apresentado na figura 5.8 que houve significativa redução dos focos de baixa pressão.

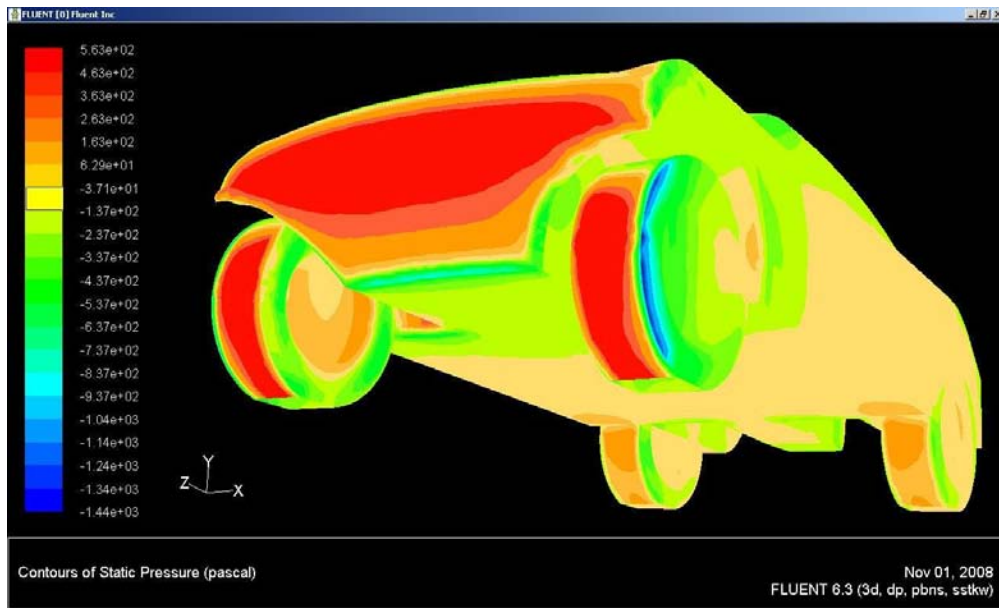


Figura 5.7: Focos de baixa pressão nas arestas da dianteira no veículo inicial.

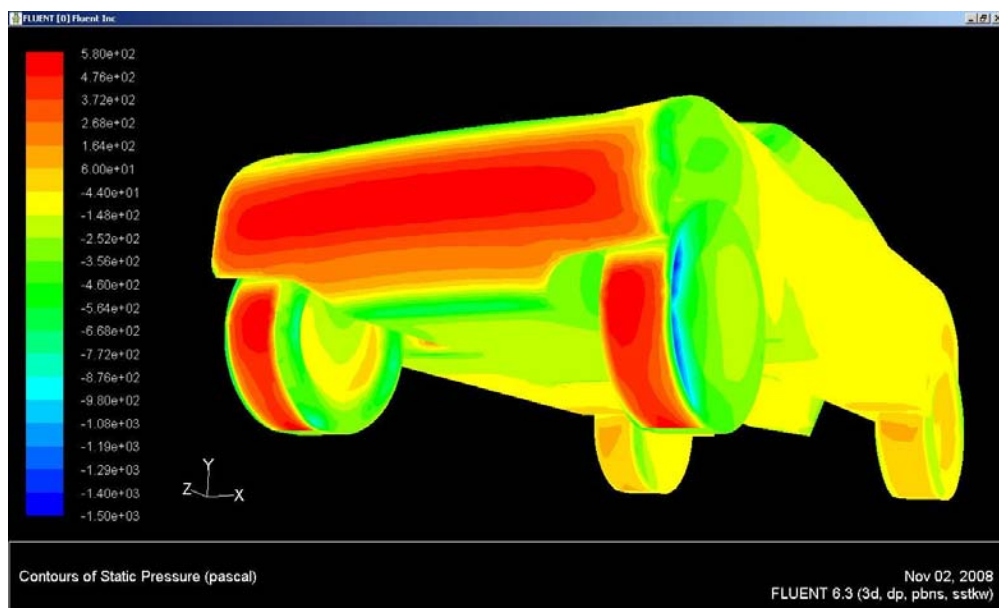


Figura 5.8: Redução dos focos de baixa pressão com as alterações na dianteira.

Novamente as alterações promoveram um ganho muito significativo no arrasto e na sustentação, também da ordem de 10% e 20% respectivamente.

A partir desse ponto algumas combinações entre as diferentes alterações que trouxeram resultados positivos foram simuladas. Essas combinações foram feitas uma a uma, de maneira a constatar que, apesar de individualmente eficientes, a

interação entre elas não apresentasse um resultado negativo. Nessa fase são apresentadas apenas as combinações que trouxeram resultados positivos. Os valores podem ser observados na tabela 5.5.

Modificação:	Cd	Cl	Mx (N)	Arrasto (N)	Sustentação (N)	Nd (N)	Nt (N)
Inicial	0,485	0,318	243	560	367	363	3,8
Tras. Difusor	0,450	0,220	123	520	254	218	36
Teto Tras. Dif.	0,452	0,125	400	522	144	368	-224
Dia. Teto Tras. Dif.	0,426	0,097	306	492	112	283	-170

Tabela 5.5: Resultados para as combinações das alterações.

Como era de se esperar a combinação dos resultados das modificações foi significativamente eficiente. Note que em uma das alterações houve pequena variação com efeito negativo no arrasto, porém a melhoria na sustentação foi muito grande. O resultado final nesse ponto chegou a um ganho de 12% no arrasto e 70% na sustentação. Nesse ponto os resultados já chegam próximos de um dos objetivos do projeto, que é de possuir coeficiente de sustentação negativo principalmente na traseira. Com a combinação final dessa tabela já há certo *downforce* na traseira, porém ainda não foi possível obter esse efeito na dianteira.

Há uma alteração que trouxe pequeno incremento nos valores dos coeficientes, porém apesar desse resultado ligeiramente pior ela foi necessária. Trata-se da adaptação da aresta de interface entre capô e pára-brisas de maneira que ofereça uma área para acomodação dos limpadores de pára-brisas. Os valores são apresentados na tabela 5.6.

Modificação	Cd	Cl	Mx (N)	Arrasto (N)	Sustentação (N)	Nd (N)	Nt (N)
Último resultado	0,426	0,097	306	492	112	283	-170
Capô / Pára-brisas	0,432	0,105	334	499	121	308	-187

Tabela 5.6: Alteração da aresta de interface entre capô e pára-brisas.

As alterações realizadas até o momento foram predominantemente advindas de fundamentações teóricas, logicamente seus efeitos antes e depois foram observados nos diagramas oferecidos pelas simulações, porém até então nenhuma delas foi unicamente proposta devido a questões negativas observadas nesses diagramas. No entanto, já de posse de um desenho bastante otimizado, praticamente esgotadas as possibilidades teóricas de melhorias, foi necessário analisar em detalhes os resultados das simulações para encontrar novos pontos possíveis de melhorias.

A seguir são citados alguns desses detalhes que foram observados e tratados, porém é necessário nesse ponto citar uma constatação importante. Em todas as simulações expostas anteriormente, mesmo que com a convergência do resultado, com valor dos resíduos bem abaixo do nível estipulado como critério de convergência, se pode observar uma pequena imprecisão nos resultados, uma pequena variação nos valores dos coeficientes de arrasto e sustentação, da ordem de até 3 % para mais ou para menos em alguns casos. Com isso, se o resultado de uma pequena alteração trazer uma variação nos valores dentro dessa ordem, se torna complicado constatar a efetividade da solução. Por outro lado, nesse nível do projeto dificilmente alterações trarão ganhos acima dessa ordem de grandeza, dessa forma, para que as simulações não se encerrassem nesse ponto, uma nova forma de análise foi tomada: as simulações com meia malha e simetria. Esse tipo de simulação teve resultados bastante coerentes com os resultados da simulação de malha completa, porém a variação nos valores se mostrou significativamente menor, da ordem de 1% para mais ou para menos, além de apresentar maior facilidade de convergência. Sendo assim, antes de iniciar com alguma alteração, foi tomado como referência o último desenho apontado na tabela 5.5, com a combinação de todas as alterações até o momento, e simulado novamente com a configuração de meia malha. Os novos resultados trouxeram pequena variação nos valores dos coeficientes de arrasto e sustentação, como demonstrados na tabela 5.7.

Versão	Cd	Cl	Mx (N)	Arrasto (N)	Sustentação (N)	Nd (N)	Nt (N)
Melhor resultado	0,425	0,100	345	491	116	313	-198
Capô / Pára-brisas	0,431	0,111	353	498	128	326	-197

Tabela 5.7: Novos resultados das duas últimas versões simuladas com opção de meia malha com simetria.

Considerando então a versão de meia malha, foi possível observar algumas regiões passíveis de alteração, basicamente focos de alta pressão. Um deles é a parede posterior da caixa de rodas dianteira, que devido aos cortes na carenagem frontal, o fluxo de ar que entra na caixa de rodas ataca de frente essa parede, formando a concentração de pressão, como pode ser observado na figura 5.9.

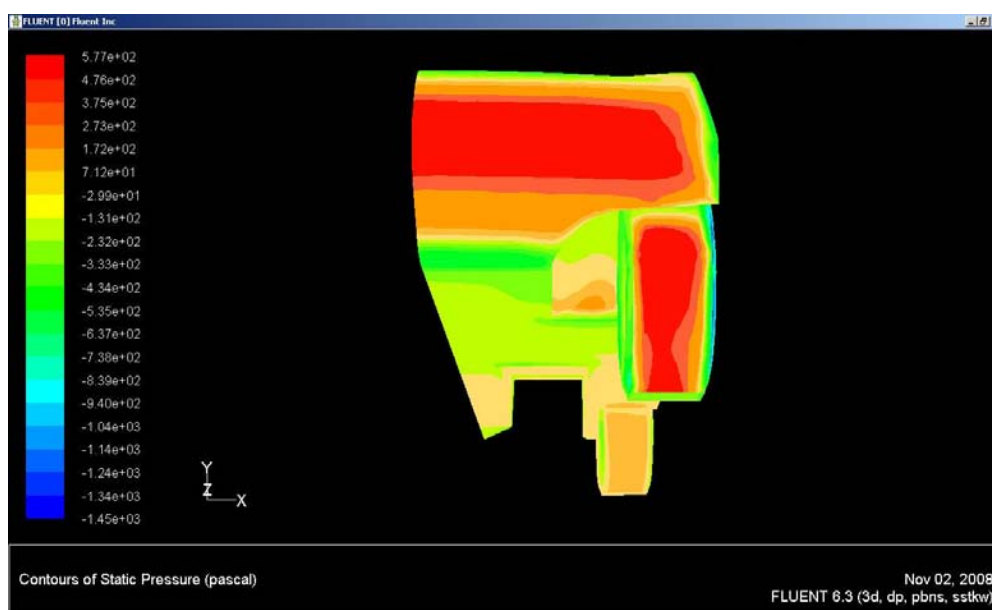


Figura 5.9: Concentração de pressão dentro da caixa de rodas dianteira.

Algumas soluções foram propostas para amenizar essa condição, conforme descrito no item 4.2.8. Uma delas foi o arredondamento da aresta vertical dentro da caixa de rodas, outra foi além desse arredondamento a criação de um canal que direcionasse o fluxo para uma região de baixa pressão na lateral e por fim além do arredondamento da aresta vertical também o arredondamento da aresta horizontal.

As comparações foram feitas em relação à versão sem a alteração da interface entre capô e pára-brisas, e os resultados de cada opção são demonstrados na tabela 5.8.

Modificação	Cd	Cl	Mx (N)	Arrasto (N)	Sustentação (N)	Nd (N)	Nt (N)
Sem alterações	0,425	0,100	345	491	116	313	-198
Vertical	0,422	0,088	338	488	102	301	-200
Canal	0,434	0,115	348	502	133	324	-191
Horizontal	0,431	0,026	386	491	30	301	-271

Tabela 5.8: Resultados para as alterações na caixa de rodas dianteira.

Pode-se observar que o melhor resultado foi a opção com arredondamento apenas da aresta vertical, as duas outras opções pioraram os valores. Fazendo uma análise das linhas de fluxo dessa alteração foi possível entender porque a alteração do canal não trouxe bons resultados. O arredondamento da aresta vertical criou um vórtice que direciona o fluxo para o solo, ao invés de divergir o fluxo na horizontal acompanhando a curvatura da parede e o direcionando para a lateral da carroceria. As figuras 5.10 e 5.11 mostram respectivamente o diagrama de pressão e as linhas de fluxo da opção com alteração da aresta vertical apenas.

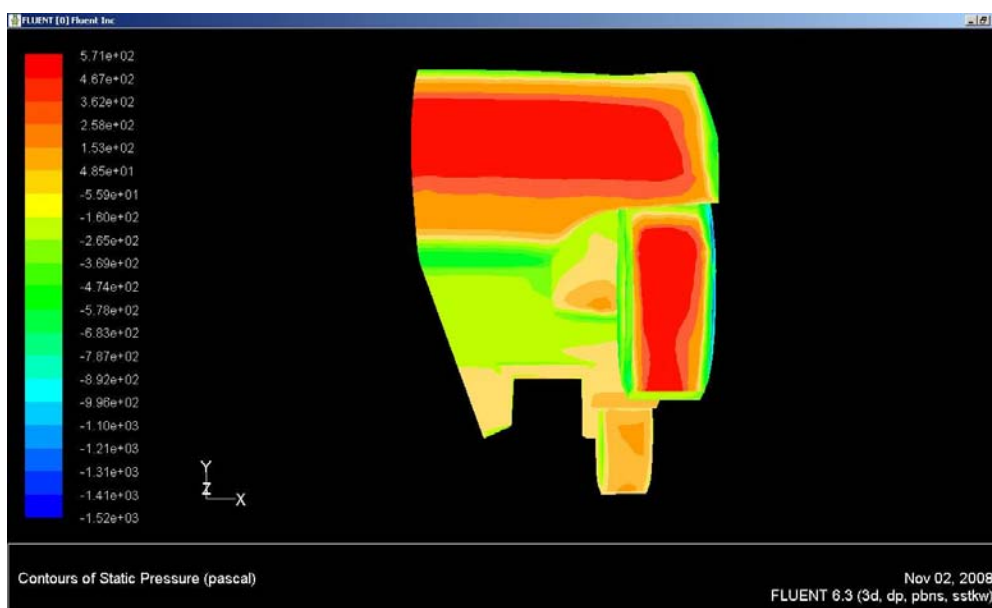


Figura 5.10: Nova forma da concentração de pressão dentro da caixa de rodas.

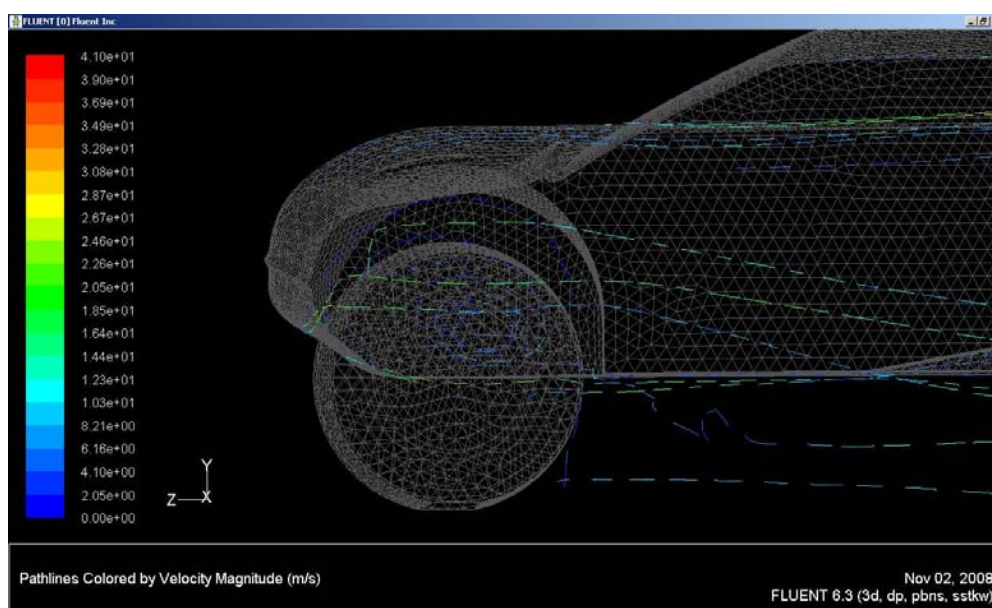


Figura 5.11: Vórtice em direção ao solo do fluxo que encontra a parede posterior da caixa de rodas.

Nesse ponto foi feita a substituição do desenho completo do teto pela versão que trazia as modificações indicadas no capítulo 4.2.3 e 4.2.4. Essa nova versão trouxe os resultados apresentados na tabela 5.9. Observa-se que o coeficiente de pressão está um pouco acima do melhor valor obtido até então, porém esse novo desenho já contempla a alteração necessária na interface entre capô e pára-brisas, sendo assim deve ser comparada com a versão anterior que também contemplava essa alteração.

Modificação	Cd	Cl	Mx (N)	Arrasto (N)	Sustentação (N)	Nd (N)	Nt (N)
Melhor resultado	0,426	0,097	306	492	112	283	-170
Capô / Pára-brisas	0,431	0,111	353	498	128	326	-197
Novo teto	0,432	0,057	406	493	65	333	-268

Tabela 5.9: Comparação dos valores com as modificações introduzidas do novo teto.

Como se pode observar o valor do coeficiente de arrasto para o novo teto é ligeiramente maior que o melhor resultado obtido até então, e praticamente igual ao valor da alteração da interface entre capô e pára-brisas. Porém observando os

valores absolutos de arrasto, se vê que o novo valor é praticamente idêntico ao valor da modificação de melhor resultado, fato possível dado à pequena redução da área frontal dessa nova versão. Somado a isso, observa-se uma significativa melhoria no valor do coeficiente de sustentação, o que torna então essa nova versão a melhor obtida até esse ponto.

A solução proposta anteriormente para a caixa de rodas dianteira foi replicada nessa nova versão do desenho, seu resultado é apresentado na tabela 5.10.

Outro ponto com característica semelhante a essa da caixa de rodas dianteira é a parede posterior da caixa de rodas traseira. Nesse caso, o fluxo de ar que ataca a parede formando a concentração de pressão entra pelas laterais da caixa de rodas, pela abertura dos pára-lamas. De certa forma é possível dizer que essa questão vem de encontro com a idéia proposta no item 4.2.8, onde é recomendável evitar ao máximo o fluxo de ar dentro da caixa de rodas. Esse fenômeno pode ser observado no diagrama de pressão apresentado na figura 5.12.

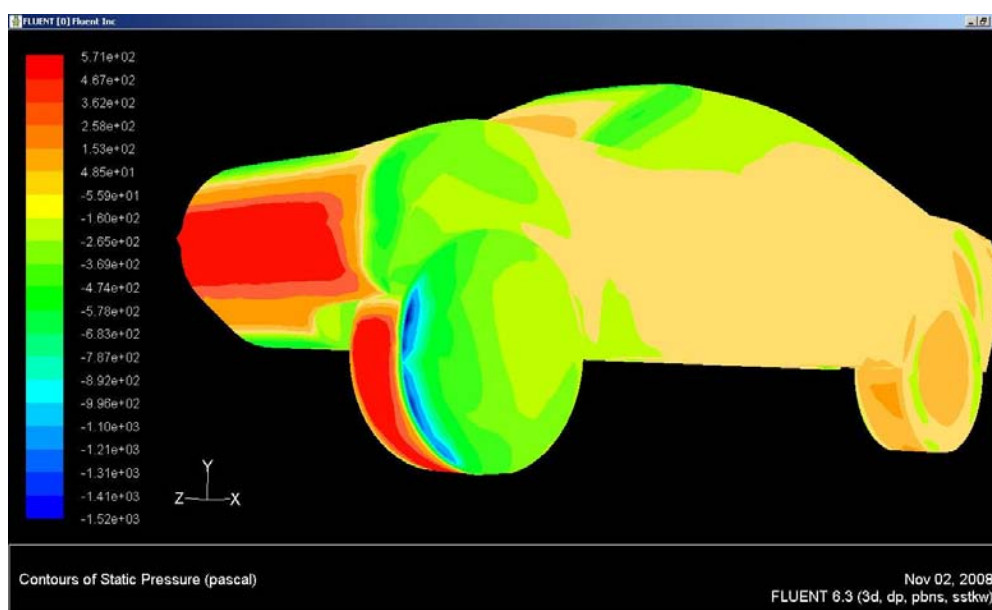


Figura 5.12: Concentração de pressão dentro da caixa de rodas traseira e adiante dos pneus dianteiro e traseiro.

A solução proposta para esse item foi a diminuição da altura da borda dos pára-lamas, como apresentado no item 4.2.8, e o resultado é o apresentado na tabela 5.10.

Mais um ponto de alta pressão observado é na frente das rodas, tanto dianteiras quanto traseiras. Essa é uma questão que vem de encontro com as fundamentações teóricas e pode ser também observada pelo diagrama de pressão apresentado na figura 5.12. Uma solução proposta para essa questão é o uso de defletores para o direcionamento do fluxo, de maneira a contornar as rodas. No entanto, como já citado no item 4.2.2, é complicado adicionar qualquer acessório na dianteira do veículo, sendo assim só foi possível a colocação de um pequeno defletor na frente das rodas traseiras, conforme descrito no item 4.2.8. O novo resultado é apresentado na tabela 5.10.

Modificação	Cd	Cl	Mx (N)	Arrasto (N)	Sustentação (N)	Nd (N)	Nt (N)
Novo teto	0,432	0,057	406	493	65	333	-268
Caixa de rodas	0,427	0,067	416	487	76	346	-270
Pára-lamas	0,421	0,059	428	480	67	351	-283
Defletor	0,426	0,066	440	486	75	364	-288

Tabela 5.10: Resultados das modificações nas caixas de rodas dianteira e traseira.

As três alterações citadas foram realizadas uma sobre a outra, sendo assim os valores apresentados na tabela 5.10 devem ser comparados com o imediatamente anterior. Observa-se que a alteração da aresta vertical da caixa de rodas dianteira trouxe uma melhoria, como já era de se esperar pelo resultado obtido dessa alteração em outra versão do desenho. Sobre essa alteração observa-se o ganho obtido pela alteração no pára-lamas traseiro. Por fim, o defletor adicionado adiante das rodas traseiras não trouxe um resultado positivo, sendo assim, não será adotado.

Após essa seqüência de pequenos detalhes foi feita ainda uma tentativa de melhoria dos coeficientes alterando a forma da traseira do veículo. Conforme indicado no capítulo 4.2.5, ao invés de manter o topo do corpo plano até sua

extremidade traseira, inseriu-se uma inclinação em 15 graus logo após a caixa de rodas traseira. Essa modificação trouxe um ótimo ganho no coeficiente de arrasto, porém com uma perda muito significativa no coeficiente de sustentação. Na tentativa de amenizar essa deficiência de sustentação, foi feita uma modificação no desenho do teto em sua extremidade posterior inserindo um *spoiler* com ângulo de 15 graus. Essa modificação não trouxe bons resultados, com uma piora nos valores de ambos os coeficientes. Por fim, em uma tentativa intermediária foi modificado o *spoiler* para que sua superfície ficasse horizontal, porém novamente a perda em sustentação foi mais significativa que o ganho em arrasto. Os resultados dessas três modificações são apresentados na tabela 5.11.

Modificação	Cd	Cl	Mx (N)	Arrasto (N)	Sustentação (N)	Nd (N)	Nt (N)
Melhor resultado	0,421	0,059	428	480	67	351	-283
Inclinação	0,401	0,216	192	457	246	265	-19
<i>Spoiler</i> 15 graus	0,442	0,064	492	504	73	401	-328
<i>Spoiler</i> horizontal	0,419	0,151	342	478	172	339	-167

Tabela 5.11: Resultados das alterações na traseira.

Em uma análise final dessas três modificações, a única delas que pode ser eficiente de alguma forma é a inclinação do plano superior do corpo apenas, sem a adição dos *spoilers*. Essa modificação trouxe uma melhoria da ordem de 5% no arrasto, com a penalidade de mais de 260% na sustentação. Apesar do alto valor em porcentagem sobre a sustentação, o valor absoluto não chega a ser impeditivo, o balanço entre os eixos dianteiro e traseiro ainda está favorável, com sustentação ligeiramente negativa no eixo traseiro. Essa configuração pode ser útil em uma situação específica, considerando uma prova onde a velocidade em retas tivesse prioridade sobre a capacidade de fazer curvas, os 5% de ganho em arrasto podem fazer diferença significativa. Um estudo mais aprofundado baseado nas características das provas poderia auxiliar a determinação de um bom compromisso entre arrasto e sustentação, porém nesse instante, sem maiores teorias sobre o

assunto e baseando-se apenas na proporção dos números, adotou-se como melhor opção o resultado anterior, sem a alteração na traseira.

Com isso chegou-se ao resultado final desse trabalho, onde os números obtidos foram:

- $C_d = 0,421$
- $C_l = 0,059$
- $M_z = 428 \text{ N.m}$
- $D = 480 \text{ N}$
- $L = 67 \text{ N}$
- $L_D = 351 \text{ N}$
- $L_T = -283 \text{ N}$

As coordenadas do centro de pressão apontadas pelo Fluent®, relativas à origem no centro do eixo dianteiro na altura do assoalho, foram:

- $x = 847 \text{ mm}$
- $z = 371 \text{ mm}$

Essas coordenadas correspondem a um ponto a uma altura próxima à dos joelhos dos ocupantes e aproximadamente 100 mm adiante.

Apenas a título de comparação, uma simulação adicional foi realizada com o mesmo desenho do resultado final, porém alterando uma característica que é a altura livre do solo. Todas as simulações até então consideravam o veículo com essa dimensão ajustada em seu limite máximo, 370 mm, o que segundo a teoria essa dimensão elevada contribui negativamente tanto no arrasto quanto na sustentação. Como o veículo na prática possui possibilidade de ajuste dessa altura de acordo com a necessidade de uma prova em específico, foi simulada uma opção com 250 mm, o que ainda é aceitável para um veículo com vocação *off-road*. Os resultados dessa análise são demonstrados na tabela 5.12. Observa-se que há significativa redução no coeficiente de arrasto, que somada à pequena redução na área frontal gerou um ganho de mais de 10% no arrasto.

Modificação	Cd	Cl	Mx (N)	Área	Arrasto (N)	Sustentação (N)	Nd (N)	Nt (N)
370 mm	0,421	0,059	428	2,08	480	67	351	-283
250 mm	0,390	0,112	149	2,00	428	123	172	-49

Tabela 5.12: Resultados para o veículo com altura livre do solo de 250 mm.

Importante lembrar mais uma vez que os valores obtidos não necessariamente possuem grande precisão quando comparados com um estudo do referido veículo em túnel de vento. Porém, independente da precisão desses resultados, em uma análise com o veículo físico há outras variáveis que certamente trarão alterações nos valores. Por exemplo, os componentes de suspensão e outros detalhes mecânicos que ficam expostos ao fluxo com certeza trariam um incremento no valor do coeficiente de arrasto. As captações e rejeições de ar para os sistemas de arrefecimento do veículo também trariam um provável incremento desse valor. Em compensação, o efeito das rodas em rotação teoricamente traria uma melhoria nos coeficientes tanto de arrasto quanto de sustentação. Enfim, há ainda uma série de outros fatores de influência, positiva ou negativa, o que torna difícil estimar que tipo de variação teria o valor prático em relação ao obtido pelas simulações.

Os diagramas de pressão, velocidade e as linhas de fluxo da versão final, em diferentes vistas, são apresentados nas figuras 5.13 a 5.20.

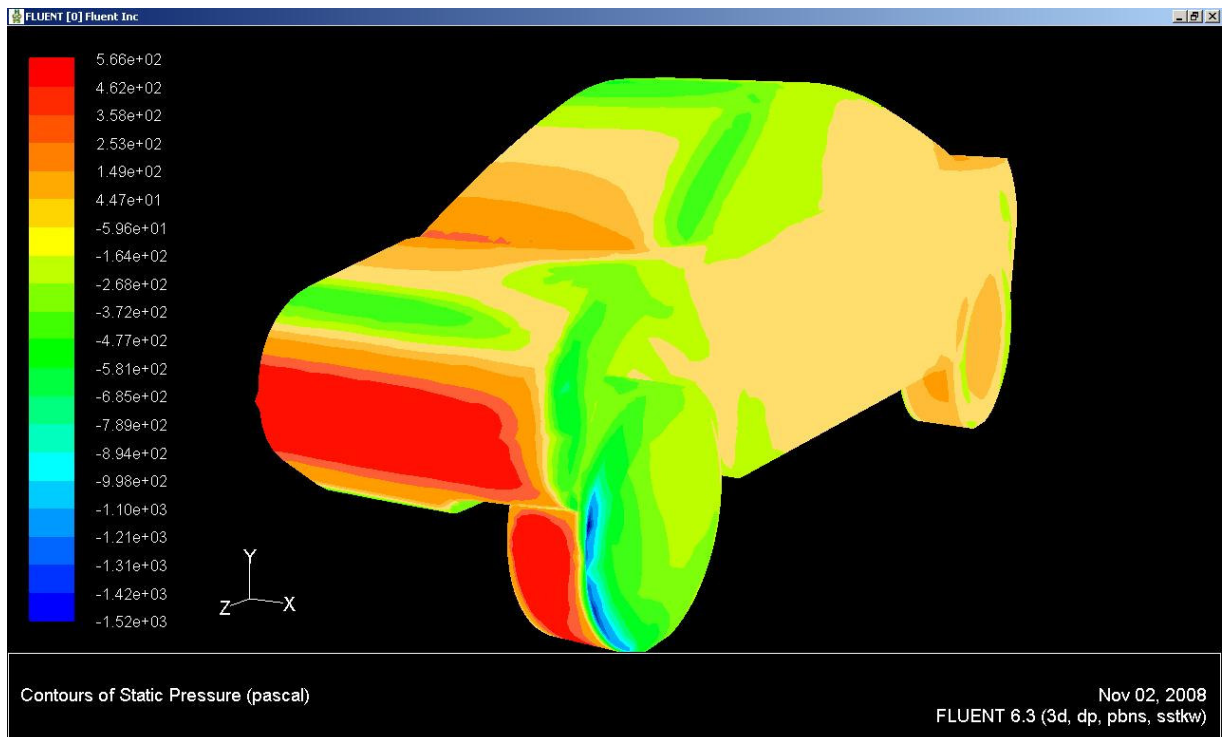


Figura 5.13: Diagrama de pressão na superfície do veículo, vista frontal superior.



Figura 5.14: Diagrama de pressão na superfície do veículo, vista traseira superior.

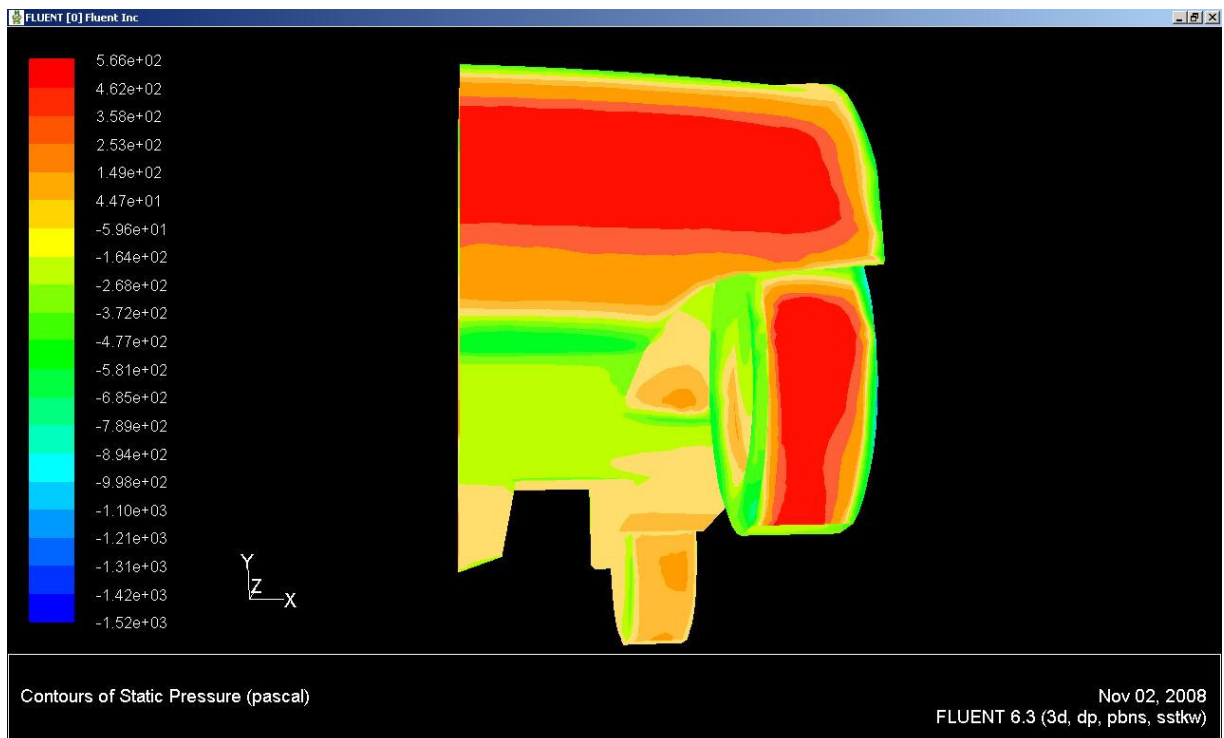


Figura 5.15: Diagrama de pressão na superfície do veículo, vista frontal inferior.



Figura 5.16: Diagrama de pressão na superfície do veículo, vista traseira inferior.

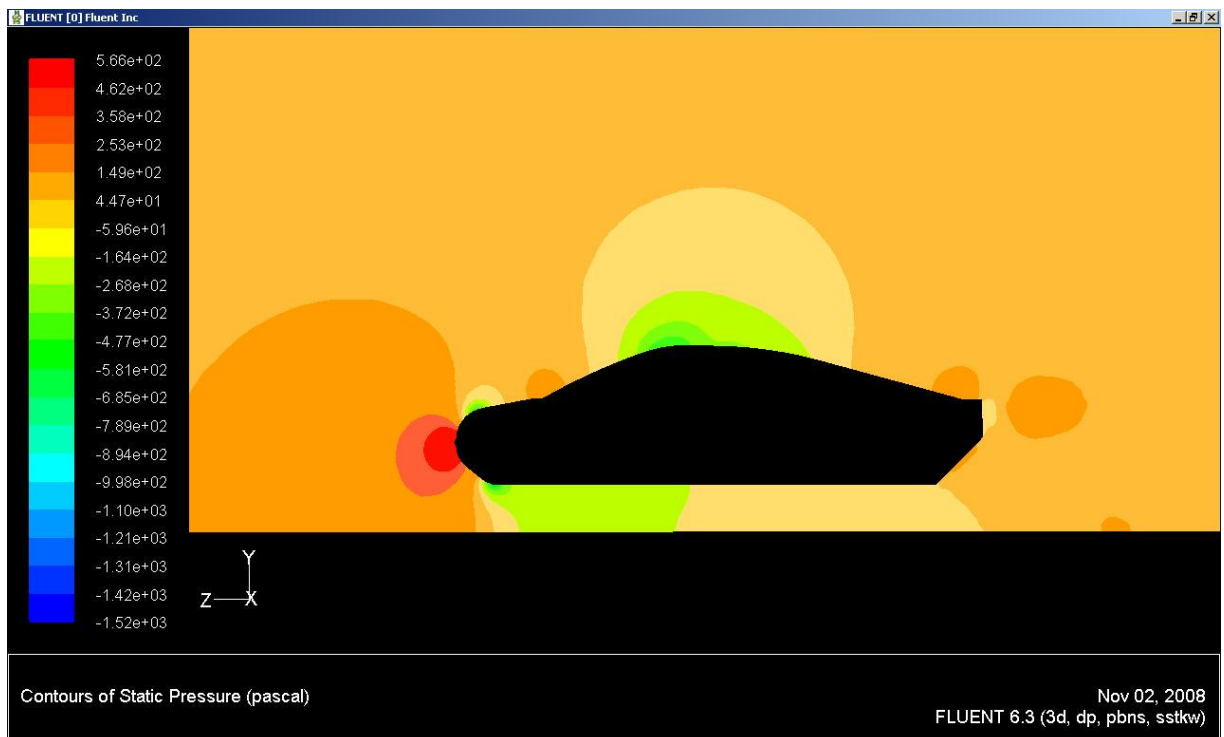


Figura 5.17: Diagrama de pressão no plano vertical longitudinal.



Figura 5.18: Diagrama de pressão no plano horizontal longitudinal.



Figura 5.19: Diagrama de velocidade no plano vertical longitudinal.

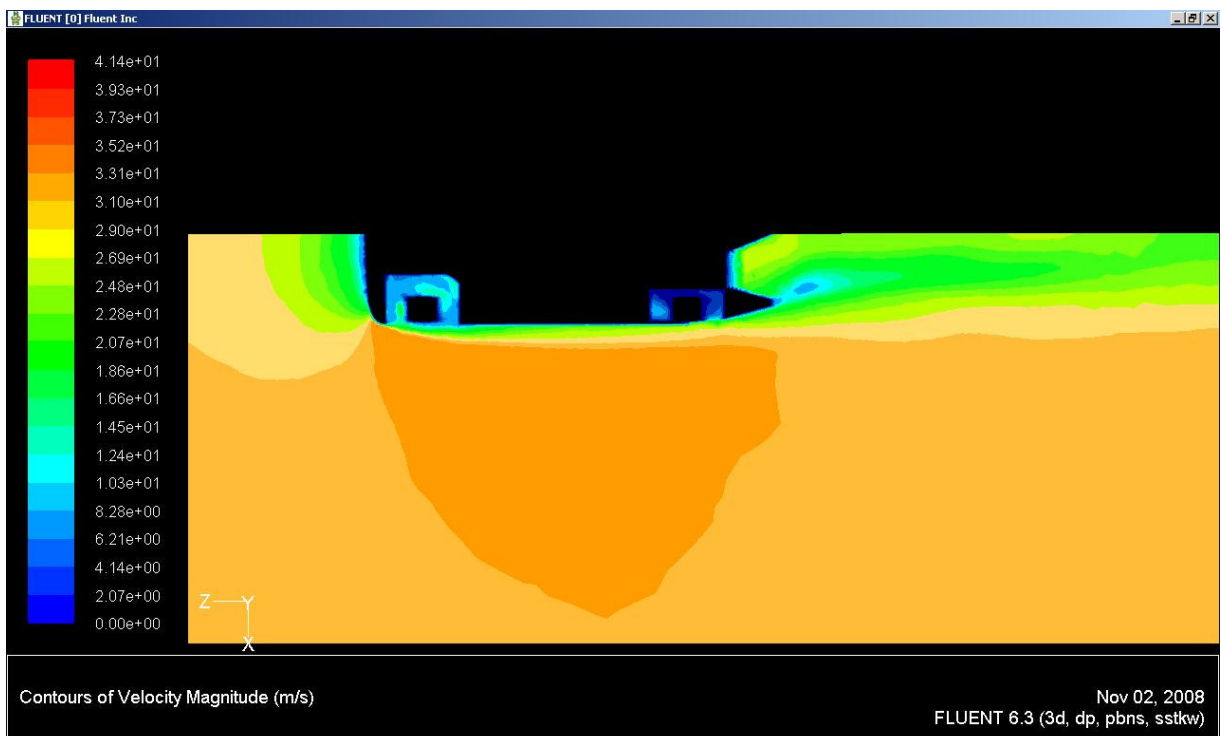


Figura 5.20: Diagrama de velocidade no plano horizontal longitudinal.

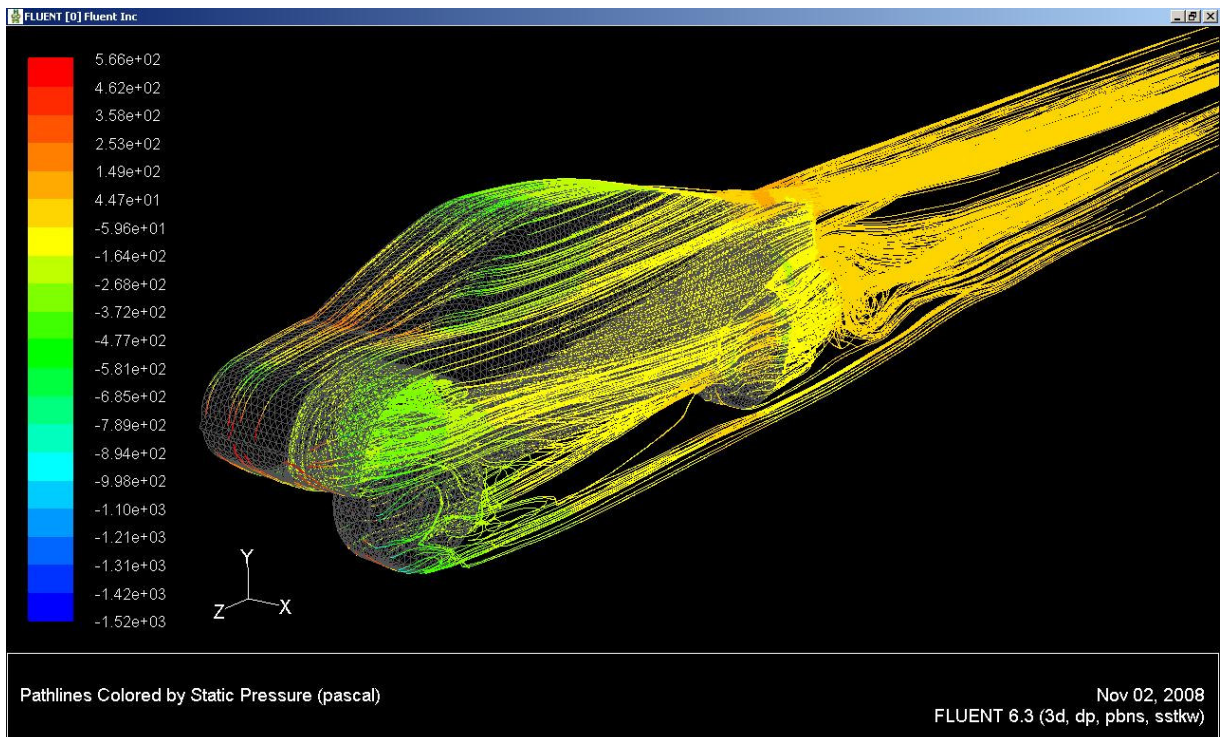


Figura 5.21: Linhas de fluxo na superfície do veículo, vista frontal.

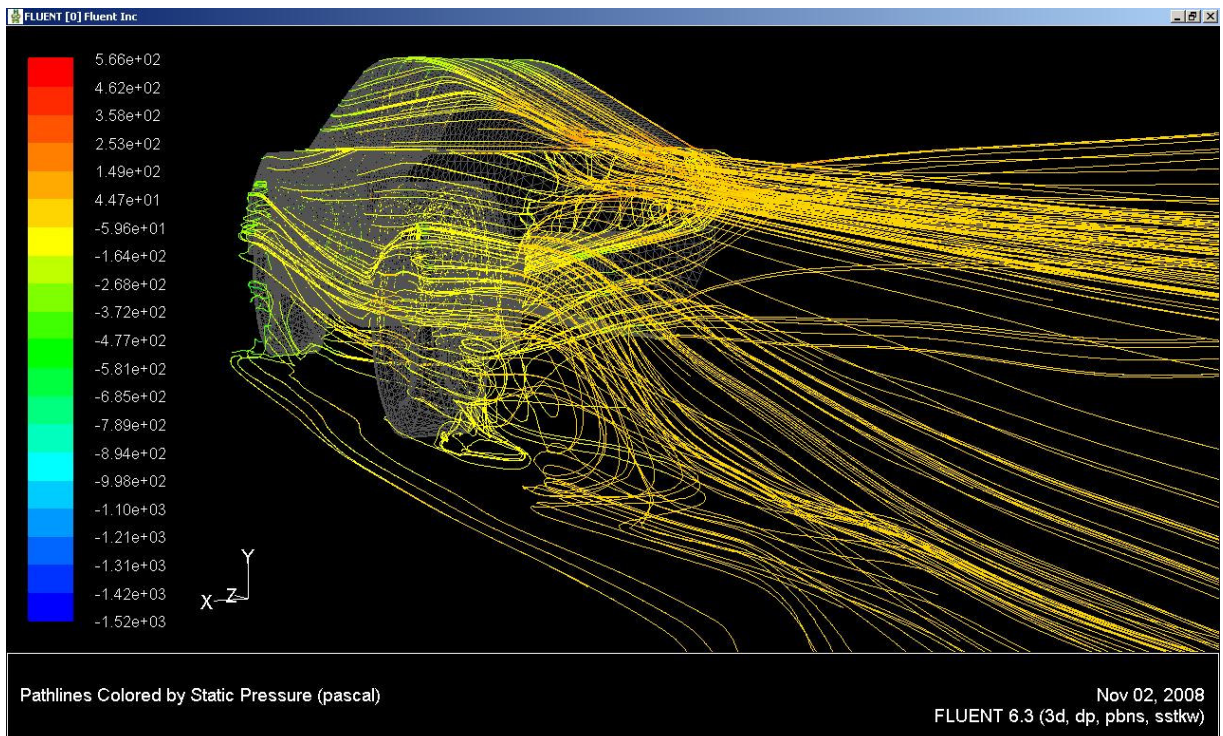


Figura 5.22: Linhas de fluxo na superfície do veículo, vista traseira.

6 CONCLUSÃO E SUGESTÃO PARA TRABALHOS POSTERIORES

O presente trabalho não trouxe resultados brilhantes pensando em uma aplicação comercial de larga escala, mas foi sim um ótimo passo inicial para a obtenção dos mesmos, além de ter sido extremamente produtivo em termos didáticos. Pode-se observar também pela evolução dos resultados que o projeto aerodinâmico desse veículo realmente apresentou características muito específicas, diferindo significativamente do projeto de um veículo comercial de passeio ou de um veículo de competição para uso em pistas.

Sob ponto de vista de aerodinâmica veicular, devido à característica *off-road* e a orientação a uma categoria específica de competição que esse veículo possui, alguns pontos de sua carroceria possuem forte influência em seu desempenho aerodinâmico. Um dos pontos principais, inclusive já esperado segundo a teoria, é que a elevada altura livre do solo influencia negativamente no arrasto e na sustentação. Conforme observado no capítulo 5, uma pequena redução nessa altura traz ganhos significativos nos valores dos dois coeficientes. Esse fato porém não pode ser atribuído apenas à questão da altura, um outro ponto que se mostrou muito influente é a exposição das rodas e das caixas de rodas ao fluxo de ar. Foi possível observar que boa parte dos ganhos obtidos nos coeficientes ao longo do projeto foi proveniente de alterações que reduziam esse fluxo sobre as rodas e caixas de rodas. Comparando o valor final do coeficiente de arrasto obtido para o protótipo com o de um moderno e eficiente sedã de passeio, temos 0,42 contra cerca de 0,30, o que representa uma diferença significativa. Porém se fosse possível modificar essas limitações da altura e da exposição das rodas e caixas de rodas, muito possivelmente os resultados desse protótipo se aproximariam bastante desse valor de referência para bons projetos aerodinâmicos.

Sob o ponto de vista das análises computacionais, diversas são as literaturas que apontam CFD como uma ferramenta ainda não madura o suficiente para oferecer valores precisos, resultados que possam sozinhos validar uma aplicação. Não por ser tecnicamente impossível, mas sim porque simulações com alto nível de complexidade e precisão demandariam a utilização de recursos

computacionais extremamente potentes e avançados, o que torna inviável a aplicação em nível comercial. Mesmo quando comparado com ensaios em túnel de vento que também são extremamente custosos. Por outro lado, em uma fase inicial onde a análise qualitativa é mais importante, e ainda não se necessita de uma grande precisão nos valores absolutos, as análises CFD têm tomado cada vez mais espaço na área de aerodinâmica automotiva, se tornando uma ferramenta complementar às simulações em túnel de vento. Utilizam-se as menos precisas análises CFD, porém mais rápidas e mais baratas, na fase inicial, deixando as custosas, porém precisas, simulações em túnel de vento apenas para fase final de validação.

E no presente trabalho isso não poderia ser diferente, se for considerado o protótipo em questão como um veículo de produção limitada, onde apenas um, dois ou três veículos possam ser construídos, sua análise e otimização por simulações em túnel de vento é financeiramente impraticável. Porém através das análises em CFD foi possível obter uma excelente otimização do projeto, visto que sobre o desenho original, já desenvolvido sob fortes conceitos aerodinâmicos, ainda conseguiu-se obter um ganho ao redor de 15% para o coeficiente de arrasto e praticamente eliminar completamente o efeito de sustentação.

Se no futuro houver uma evolução tecnológica desse protótipo, que demande análises mais apuradas em termos aerodinâmicos, ainda é possível evoluir bastante através da ferramenta CFD. Uma série de detalhes não explorados pode ser listada nesse ponto, o que é inclusive colocado como sugestão para trabalhos posteriores.

Uma constatação importante que foi feita é de que o refinamento do desenho é extremamente importante para a geração de uma boa malha. A criação de um desenho extremamente fiel ao modelo físico nem sempre é interessante, em muitos casos é necessária uma adaptação nas formas geométricas obtidas para que ao gerar a malha não se produzam muitos elementos com grau de *skewness* elevado. Deve-se apenas tomar o cuidado para que a dimensão dessa adaptação tenha ordem de grandeza desprezível perante as dimensões do veículo, de maneira que não chegue a induzir variações no fluxo.

Outra constatação importante é de que a qualidade da malha não só influencia na precisão dos resultados como também na facilidade de convergência e estabilidade da simulação. Uma malha com muitos elementos de maneira geral, com muitos elementos com grau de *skewnees* elevado e com variação muito grande e brusca da dimensão de elementos torna o trabalho do software Fluent® mais complicado, com dificuldade de convergência e conseqüentemente um tempo necessário muito maior.

Com base então em todos os resultados e constatações, é possível deixar algumas sugestões para continuidade desse trabalho e outros trabalhos posteriores na mesma linha:

1- Detalhamento do desenho:

O desenho utilizado foi uma simplificação da carroceria do veículo, contemplando apenas as linhas que formam sua silhueta. Não foram considerados detalhes como: rebaixos e ressaltos de portas e janelas, componentes mecânicos, principalmente de suspensão, que ficam expostos ao fluxo, maior detalhamento de regiões internas do veículo como as caixas de rodas e os compartimentos dianteiro e traseiro onde se localizam o motor e outros componentes mecânicos, e, principalmente, as captações e rejeições para arrefecimento dos diversos componentes do veículo. Embora seja necessário ter um dimensionamento do fluxo ao redor do veículo para depois melhor analisar as possibilidades para captações e rejeições de arrefecimento, ao realizar esse segundo passo ocorre uma alteração dos valores obtidos, sendo possivelmente necessária uma reavaliação do conjunto como um todo para otimização do resultado. Como os sistemas de arrefecimento não foram considerados nesse trabalho, um próximo passo seria a inclusão desses sistemas nas análises.

2- Detalhamento da malha:

Para um uso do tempo mais eficiente ao longo do trabalho, optou-se pela utilização de uma malha relativamente simples e homogênea, com geração de malhas 2D apenas nas faces do veículo e todo o restante das faces e volumes feitos automaticamente pelo Gambit®. Para o caso de uma análise mais detalhada, seria importante a geração de uma malha mais refinada, para isso o trabalho manual seria muito maior, atribuindo dimensões de elementos quase que individualmente para

cada aresta e face do veículo, de maneira que nas regiões mais críticas a malha tivesse elementos de dimensão suficientemente pequena para dar a precisão necessária. De outro lado, em regiões de menor preocupação, poderia se estabelecer um menor número de elementos, tornando a malha menor e facilitando o trabalho de simulação. Com isso não somente se evitaria possíveis imprecisões devidas à malha como também se facilitaria a convergência da simulação e a estabilidade dos resultados. Logicamente, para que o trabalho fosse feito dessa forma se despenderia muito mais tempo para cada versão gerada. Para um estudo posterior esse tipo de trabalho poderia ser feito, pois já de posse de um desenho bem estabelecido, sem grandes alterações a se fazer, seria possível dedicar mais tempo em cada análise.

3- Detalhamento de outras variáveis envolvidas na simulação:

Nesse trabalho, por simplificação, não foram considerados detalhes sobre algumas variáveis envolvendo a simulação. Um deles é a rotação das rodas, nas simulações realizadas definidas como estáticas, solidárias ao veículo. Segundo Katz (2005) a rotação das rodas proporciona uma alteração significativa nos valores dos coeficientes de arrasto e sustentação, sendo em geral uma alteração para melhor. Outro exemplo foi a desconsideração da rugosidade das superfícies envolvidas, como o asfalto, a carroceria do veículo e até mesmo a banda de rolagem dos pneus, que na prática se difere muito do cilindro liso utilizado. De qualquer forma, detalhes desse tipo, ao serem considerados, trariam maior precisão para o resultado final de arrasto e sustentação, porém possivelmente não influenciaria significativamente a análise qualitativa das alterações que foi a proposta desse trabalho.

4- Análise mais criteriosa dos resultados:

Da mesma maneira como foi identificado um pequeno vórtice gerado na parede posterior das caixas de rodas, apontado no capítulo 5, uma série de outros pontos do veículo pode estar sofrendo com ocorrências como esta. Para a identificação de todos esses pontos possíveis seria necessária uma análise mais longa e criteriosa dos resultados da simulação, observando diversos pontos em diferentes planos nos diagramas de pressão e velocidade, bem como uma seleção minuciosa da apresentação das linhas de fluxo ao longo de toda a superfície do veículo. No entanto, da maneira como foi feito o estudo, se chegou a um ponto onde

a correção desse tipo de detalhe traria uma melhoria nos resultados provavelmente menor que a variação mínima dos mesmos, ou seja, a tolerância dos resultados é maior do que o possível ganho obtido, se tornando difícil validar se a alteração foi positiva ou não. Sendo assim, não basta simplesmente realizar uma análise mais criteriosa e correções sobre os resultados atuais, mas sim sobre simulações mais precisas geradas com a combinação das outras recomendações acima.

5- Utilização de um modelo de turbulência mais preciso:

Já se encontra hoje na bibliografia disponível casos de análise com sucesso utilizando modelos de turbulência mais preciso. Uma forte opção que chegou a ser considerada nesse estudo é o uso de LES (*Large Eddy Simulation*), o qual diferente do modelo $k-\omega$ SST simula grandes turbilhões, modelando apenas os de pequena dimensão. No entanto esse tipo de análise demanda recursos computacionais muito mais sofisticados, além de necessitar de um tempo muito maior para a realização de cada simulação. Essa opção pode ser considerada em uma fase final de validação dos resultados, mas na fase de melhorias onde a análise qualitativa importa mais ainda há muito que se pode fazer com o modelo atual. Enfim, é válida a utilização desse recurso após esgotada a exploração das outras alternativas acima.

REFERÊNCIAS

FARES, Ehab. Unsteady Flow Simulation of Ahmed Body Reference using a Lattice Boltzmann Approach. **Elsevier Paper**, 2002.

FLUENT 6.2.16. User's Manual. Fluent, Inc., 2003.

GAMBIT 2.2.30. User's Manual. Fluent, Inc., 2001.

GERARDO, Franck. CFD Modeling of the Flow Around the Ahmed Body. **Paper**. 2003.

HUCHO, W. H. **Aerodynamics of Road Vehicles**. 4. ed. Warrendale, SAE International, 1998.

KATZ, J. **Race Car Aerodynamics: Designing for Speed**. 2.ed. Massachusetts. Bentley Publishers, 1995.

KORKISCHKO, I. **Investigação Experimental e Simulação Numérica do Escoamento ao Redor de um Modelo Automobilístico: Corpo de Ahmed**. 84p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2006.

LAWRENCE, V. **Simulação do Escoamento de Ar Através do Compartimento do Motor de um Veículo de Passeio**. 123p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2003.

MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica de Fluidos Computacional**. Rio de Janeiro, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1995.

PUHN, F. **How To Make Your Car Handle**. 1.ed. New York. HP Books, 1981.