

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

65

**CRIAÇÃO DA EQUIPE E PROJETO DE UM VEÍCULO PARA
COMPETIÇÃO FÓRMULA SAE**

Visto
MM
14/12/05

Rodolfo Bernardes Faustino da Silva
Saulo Rodrigues

São Paulo
2005

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**CRIAÇÃO DA EQUIPE E PROJETO DE UM VEÍCULO PARA
COMPETIÇÃO FÓRMULA SAE**

Trabalho de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Rodolfo Bernardes Faustino da Silva
Saulo Rodrigues

Orientador: Prof.Dr. Marcelo Augusto Leal Alves

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo
2005

TF_05
Si38c

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600011121

Rodrigues, Saulo

Criação da equipe e projeto de um veículo para competição
fórmula SAE / S. Rodrigues, R.B.F. Silva. -- São Paulo, 2005.
p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Veículos especiais 2.Projeto automotivo I.Silva, Rodolfo
Bernardes Faustino da I.Universidade de São Paulo. Escola
Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

A nossos pais que nos deram a vida e os
exemplos de como vivê-la corretamente.

Aos integrantes da Equipe Poli de Mini-Baja
que tanto nos auxiliou.

Agradecimentos

Agradeço a todas as pessoas e instituições que através do fornecimento de dados, materiais bibliográficos ou informações colaboraram para realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Marcelo Augusto Leal Alves por ter nos orientado nos primeiros passos da Equipe Poli de Fórmula SAE.

Aos Ronnie Rodrigo Rego, Leandro Tadao Miura, Guilherme Pierre Paiva, Felipe Marchesin, Danilo Koji Nomura, Mario Zan Ferreira Junior, Rodrigo Motoharu Kobayashi, Pedro Evanil Zanelatto e Silva e Arthur Reimpel, da equipe Poli de Mini-Baja, agradecemos as trocas de experiências ao longo destes anos de convívio.

E a todos aqueles que de alguma forma colaboraram na nossa formação profissional.

Não dá para se ganhar todas!
Mário Zan Ferreira Junior

Resumo

Este documento tem como objetivo servir de guia para futuros projetos de um veículo fórmula SAE. A intenção é dar o primeiro passo para a construção do veículo que irá representar a Escola Politécnica em uma futura competição fórmula SAE. Esta competição é realizada há 20 anos nos EUA e foi realizada pela primeira vez no Brasil no ano de 2004.

O tema do trabalho exposto é um projeto para o Formula SAE, se referindo ao estudo do comportamento dinâmico e estático dos sistemas que constituem o veículo.

Percebida a falta de referências bibliográficas e arquivos para tal projeto dentro da Escola Politécnica, o trabalho visa apresentar estudos pertencentes a diversas obras e deixar arquivado para as próximas equipes todo o procedimento desenvolvido para o projeto e construção do veículo Fórmula SAE, de tal forma que o tempo direcionado para os mesmos estudos aqui entregues diminua e que aumente o tempo para o aprimoramento e desenvolvimento de tecnologias novas.

O projeto se inicia com um estudo de viabilidade de uma equipe e ao estudo do regulamento da competição, de forma a determinar os critérios principais a serem seguidos, dentro dos parâmetros restritivos do projeto. A partir de então, o trabalho visa selecionar e dimensionar os sistemas que compõem o veículo.

Será introduzido também o conceito de método dos elementos finitos, que será fundamental no dimensionamento dos sistemas como a estrutura, conjunto de rodas e alívios de peso em geral.

Abstract

This document has as objective to serve of guide for future projects of a vehicle Formula SAE. The intention is to give the first step for the construction of the vehicle that will represent the Escola Politécnica in one future competition formula SAE. This competition happens through 20 years in U.S.A. and has happened for the first time in Brazil in the year of 2004.

The subject of the work is a project formula SAE, relating it to the dynamic study and static behavior of the systems that constitute the vehicle.

Perceived the lack of bibliographical references and archives for such project inside of Escola Politécnica, the work will present studies of several bibliographies and will archive it for the next teams, the procedure developed for the project and construction of a vehicle Formula SAE, in order to make smaller the time you deliver for the same studies and to increase the time for the improvement and development of new technologies.

The project initiates with a viability study of a team and the study of the rules of the competition, to determine the main criteria to be followed, inside of the restrictive parameters of the project. From now on, the work will select and project the systems that compose the vehicle.

The concept of method of the finite elements will also be introduced, that will be basic in the sizing of the systems as the structure, set of wheels and relief of weight in general.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE FIGURAS	13
1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS	18
3. ESTABELECIMENTO DA NECESSIDADE	19
4. AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA	21
4.1. Sistema de direção e conjunto de rodas	21
4.2. Sistema de suspensão.....	22
4.3 Sistema do motor e da transmissão.....	29
4.3.1 Motor.....	29
4.3.2. Diferencial	35
4.3.3. Conjunto Homocinético	36
4.3.4. Caixa de transmissão.....	38
4.4 Sistema de freios.....	41
4.5 Estrutura	41
4.6 Aerodinâmica	43
5. INFRA-ESTRUTURA NECESSÁRIA	55
5.1 Recrutamento, Seleção e Manutenção do Pessoal.....	55
5.2 Perfil da Equipe	57
5.3 Patrocínio	58
5.4 Ferramentas	61
5.5 Local Físico	61
5.6 Testes	62
6. VIABILIDADE ECONÔMICA.....	64
7. O PRÉ-PROJETO	83
7.1. Metas da equipe	83
8. A COMPETIÇÃO	85
8.1. Provas Estáticas	85
8.2. Provas Dinâmicas	86

9. PARÂMETROS DO VEÍCULO.....	87
10. PROJETO DA DIREÇÃO	90
10.1 Objetivos do projeto da direção.....	90
10.2 Restrições da regra.....	90
10.3 Embasamento teórico.....	91
10.3.1. Modelo de direção – plataforma de direção	91
10.3.2. Geometria de Ackerman.....	92
10.3.3. Força lateral e ângulo de deriva.....	96
10.3.4. Convergência e divergência.....	97
10.3.5. Características de esterçamento	98
10.3.6. Direção nas quatro rodas	99
10.4. Mecanismo de acionamento da direção	101
10.5. Restrições e parâmetros do projeto	104
10.5.1. Volante	104
10.5.2. Restrições da suspensão	104
10.5.3. Inclinação do eixo “King pin” e “offset”	104
10.5.4. Restrições do freio	105
10.5.5. Peso	106
10.5.6. Conjunto rodas e pneus	106
10.6. Pinhão-cremalheira	108
10.7. Metodologia de simulação numérica	112
10.7.1. Carregando um modelo	112
10.7.2. Ajustando o modelo ao projeto.....	114
10.7.3. Simulando a direção.....	117
10.7.4. Análise dos resultados	118
11. PROJETO DA ESTRUTURA	123
11.1 Introdução do projeto.....	123
11.2 Objetivos do projeto.....	124
11.3 Critérios de projeto	125
11.3.1 Determinação das restrições físicas	125
11.3.2 Exigências do veículo.....	125

11.4. Embasamento Teórico.....	129
11.4.1. História das estruturas veiculares.....	129
11.4.2 A Estrutura Atual	130
11.4.3 A Tecnologia de estruturas.....	131
11.4.4 Técnicas de fabricação	132
12. DINÂMICA DO VEÍCULO FÓRMULA SAE	133
12.1 Estruturas.....	134
12.2 Estruturas das competições	136
12.3 Crashworthiness.....	137
13. DETERMINAÇÃO DAS CARGAS	138
13.1 Cargas Estáticas	138
13.2 Cargas Dinâmicas	138
13.4 Definição das cargas	144
13.5 Critérios de Tensão	146
13.5.1 Tensão Axial ou Normal	147
13.5.2 Deflexão	149
13.5.3 Dobras	149
14. SELEÇÃO DE MATERIAL	152
14.2 Especificação dos materiais.....	152
14.3 Seleção de material	154
14.3.1 Aço	154
14.3.2 Alumínio.....	156
14.4 Produção do tubo	157
14.4.1 Tubos extraídos a frio sem emenda.....	157
14.4.2 Tubos Soldados à resistência elétrica.....	157
14.4.3 Processo de Trefilação a Frio	158
15. METODOLOGIA DE CONSTRUÇÃO	171
15.1 Metodologia de projeto	171
15.1.1 O desenvolvimento do trabalho	171
15.1.2 O desenho preliminar	173
15.1.3 Construção do protótipo e redesenhar.....	174

15.1.4 Projeto Detalhado.....	176
15.1.5 Planejamento da construção da estrutura	179
15.1.6 Construção	180
16. AVALIAÇÃO DO CHASSI	187
17. CONCLUSÕES.....	199
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	201

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela de Decisão (Notas e Pesos de 0 a 10)	39
Tabela 2 – Cálculo estimado das horas demandadas	60
Tabela 3 – Custos gerais do protótipo	65
Tabela 4 – Custo do subsistema do motor	66
Tabela 5 - Custo do subsistema da transmissão.....	67
Tabela 6 – Custo do transmissor de torque para as rodas.....	68
Tabela 7 - Custo das rodas e pneus	69
Tabela 8 - Custo do subsistema da direção.....	70
Tabela 9 – Custo do subsistema de suspensão.....	71
Tabela 10 – Custo do subsistema da estrutura	72
Tabela 11 – Custo do subsistema de miscelânea	73
Tabela 12 – Custo do subsistema dos freios	74
Tabela 13 – Custo dos equipamentos de segurança	75
Tabela 14 – Custo da parte elétrica	76
Tabela 15 - Custo dos elementos de fixação.....	77
Tabela 16 - Custo do acabamento	78
Tabela 17 – Empresas patrocinadoras do projeto	81
Tabela 18 – Fatores para o cálculo da largura do dente pelo critério de Hertz	111
Tabela 19 - Escalas da porcentagem de carbono para o aço carbono liso.....	153
Tabela 20 - Estado de Fornecimento.....	160
Tabela 21 - Tipos de Aço e Composição Química, conforme NBR 5599/95	162
Tabela 22 - Propriedades Mecânicas, conforme NBR 5599/95.....	163
Tabela 23 - Tipos de Aço e Composição Química, conforme NBR 8476/84	164
Tabela 24 – Propriedades Mecânicas, conforme NBR 8476/84	165
Tabela 25 - Tolerâncias dimensionais (conforme NBR 8261)	167
Tabela 26 - Propriedades de Tração em Função do Grau.....	169
Tabela 27: Propriedades do material Isotrópico trefilado a frio	187

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração de um veículo fórmula SAE	18
Figura 2 - Parâmetros para o projeto de direção	22
Figura 3 - Componentes da suspensão	24
Figura 4 - Desenho da suspensão dianteira.....	26
Figura 5 - Esquema da cambagem e KPI	27
Figura 6 - Esquema do centro de rolagem	28
Figura 7 - Esquema do Caster, Anti-dive e Anti-squat	28
Figura 8 - Esquema da suspensão utilizada no fórmula SAE	29
Figura 9 - Ilustração do motor aberto e o sistema de escape	32
Figura 10 - Viscosidade x Temperatura (Fonte Texaco).....	35
Figura 11 - Resposta da homocinética deslizante para o curso da suspensão	37
Figura 12 - Vista Superior de uma estrutura do fórmula SAE.....	43
Figura 13 - Efeito solo.....	46
Figura 14 - Modelo de uma carenagem para fórmula SAE	49
Figura 15 - Vista inferior do carro	49
Figura 16 - Vista lateral da carenagem do veículo fórmula SAE	50
Figura 17 - Vista isométrica da carenagem do veículo formula SAE	51
Figura 18 - Malha da carenagem do veículo formula SAE feita no Gambit	52
Figura 19 - Resultado de pressão no veículo formula SAE feita no Fluent	53
Figura 20 - Resultado de velocidade no contorno do veículo formula SAE feita no Fluent	54
Figura 21 - Modelo de carroça.....	92
Figura 22 - Braços paralelos que produzem um centro real de rotação apenas em linha reta.....	93
Figura 23 – Braços de acionamento inclinados dando centro real de rotação em 3 posições.....	94
Figura 24 – As rodas internas giram um ângulo maior que as externas.....	94
Figura 25 – Geometria de Ackerman com braços inclinados	95
Figura 26 – Ângulo de Deriva	96

Figura 27 – Deslizamento lateral	96
Figura 28 – Convergente	97
Figura 29 – Divergente	97
Figura 30 – Efeitos de dois modos do sistema de direção do Nissan HICAS	99
Figura 31 – Mecanismos de direção nas quadro rodas.....	100
Figura 32 – Mecanismo de acionamento da direção	102
Figura 33 – Pinhão-cremalheira helicoidal.....	103
Figura 34 – Ângulo e “offset” do “King pin”	105
Figura 35 – Carregando um modelo.....	113
Figura 36 - Modelo virtual.....	114
Figura 37 – Ponto da caixa de direção e suas identificações	115
Figura 38 – Hardpoint Modification Table.....	116
Figura 39 – Parâmetros da suspensão.....	117
Figura 40 – Simulação da direção	118
Figura 41 – Janela de pós processamento.....	119
Figura 42 – Eixo X	120
Figura 43 – Selecionando os parâmetros para a plotagem	120
Figura 44 – Ângulo de esterçamento por deslocamento da cremalheira.....	121
Figura 45 – Raio de curvatura do veículo por deslocamento da cremalheira.....	122
Figura 46 - Layout básico de um veículo Formula SAE	124
Figura 47 – Restrições do Chassi pela regra do Formula SAE.....	128
Figura 48 – Barra de proteção lateral	128
Figura 49 - Chassis Monobloco de aço soldado	130
Figura 50 - Spaceframe moderno, mostrado sem os painéis do corpo externo	131
Figura 51 – Junção de tubos redondos e retangulares	132
Figura 52 - Box não triangularizado.....	135
Figura 53 - Box triangularizado	135
Figura 54 – Alcançando os mesmos resultados com estrutura tubular e materiais compostos.....	136
Figura 55 – Esquema das relações de transmissão de um veículo Formula SAE....	142
Figura 56 - Tensão da dobra	150

Figura 57 - Tensão e dureza de aços carbono lisos	154
Figura 58 - Processo de emenda por soldagem.....	158
Figura 59 - Esquema do ferramental utilizado na trefilação.....	159
Figura 60 - Protótipos de estruturas de formula SAE	174
Figura 61 - Mudanças feitas no arco dianteiro.....	175
Figura 62 - Mudanças feitas no arco de proteção principal.....	175
Figura 63 – Ilustração do sub-assembly de subsistemas	177
Figura 64 – Desenho da estrutura em Solidworks.	178
Figura 65 – Esquema da bancada de fixação da serra copo	180
Figura 66 – Programa Tubemiter	181
Figura 67: Ilustração da fixação das barras sobre o desenho em escala 1:1.....	182
Figura 68: Ilustração da preparação dos planos da dianteira do veículo para soldagem	183
Figura 69: Exemplo de fixação dos tubos.....	184
Figura 70: Exemplos de fabricação de bandejas.....	185
Figura 71 – Desenho em solidworks da mesa para construção de bandejas	186
Figura 72: Centro de Gravidade do chassi.....	188
Figura 73: Centro de gravidade incluindo piloto, motor e transmissão	188
Figura 74 - Teste de inclinação de 60° do veículo	189
Figura 75 – Distância do CG das rodas dianteiras e traseiras.....	190
Figura 76 – Estrutura alocada no ANSYS	191
Figura 77 - Malha gerada no ANSYS	191
Figura 78 - Geometria do Pipe 16	191
Figura 79 - Ilustração das condições de contorno (Binário de forças).....	191
Figura 80 - Ilustração da deformação (Von mises) ampliado em 100 vezes.....	191
Figura 81 - Ilustração frontal da deformação(Von Mises) ampliado em 100 vezes.	191
Figura 82 - Condições extremas de um esmagamento da estrutura (valor de 4 G)..	191
Figura 83 - mostrando o esmagamento frontal da estrutura – aumentado 200 vezes	197
Figura 84 - Estrutura frontal para absorção de impacto	1918

1. INTRODUÇÃO

Atualmente as indústrias automotivas investem no aperfeiçoamento de seus produtos, devido a grande concorrência existente no setor. Diversas multinacionais do ramo automotivo já estão instaladas no Brasil, porém observa-se que poucas são as universidades que oferecem a preparação adequada para os futuros profissionais desta atividade. No Brasil também não há uma indústria nacional neste segmento, que possua uma expressiva parcela do mercado atual, devido à tecnologia essencialmente estrangeira, poucos profissionais atuantes no desenvolvimento de pesquisas em projeto e fabricação de veículos e escassez em investimentos.

Visando a difusão e intercâmbio de técnicas e conhecimentos de engenharia automobilística entre estudantes, a SAE BRASIL – Sociedade de Engenheiros da Tecnologia da Mobilidade é uma associação sem fins lucrativos que congrega pessoas físicas (engenheiros, técnicos e executivos) constituindo-se hoje na mais importante sociedade de engenharia do Brasil – promoverá este ano o segundo evento brasileiro “Fórmula SAE”. Este é um programa de fins educacionais, onde futuros profissionais deste importante segmento terão a oportunidade de projetar e desenvolver um veículo automotivo que será avaliado não só quanto ao seu desempenho como também a engenharia envolvida no projeto. Ainda é bom lembrar que o Setor Automotivo é responsável por boa parte das inovações tecnológicas de nossa sociedade, bem como estas atividades empregam muitos engenheiros no mundo.

O FÓRMULA SAE

A SAE promove um dos mais importantes eventos do ramo automotivo no mundo, a Fórmula SAE, que possui alto prestígio nos países onde se realiza. Esse evento trata-se de uma competição de caráter educacional. As universidades participantes estarão projetando, construindo e desenvolvendo um carro tipo fórmula. Com estas características esse evento torna-se uma competição de "fórmula universitária nacional".

2. OBJETIVOS

O objetivo geral do projeto é fazer com que os alunos de engenharia projetem e construam um veículo de corrida, segundo as especificações do regulamento estabelecido pelos organizadores do evento, no estilo Fórmula tendo assim cockpit aberto e pneus expostos.

Como decorrência do projeto e construção do veículo, os estudantes têm a oportunidade de: adquirir conhecimentos além da grade curricular, desenvolver projetos, divulgar idéias e exercitar suas habilidades aprendendo a unir forças; iniciativas fundamentais no mercado competitivo.



Figura 1 - Ilustração de um veículo fórmula SAE

3. ESTABELECIMENTO DA NECESSIDADE

Teve-se a observação que os estudantes precisam ter uma aproximação do mercado mundial automotivo. Pois neste mercado existe um público de muitas centenas de milhões de pessoas envolvidas com, estudos, desenvolvimento, consumo, fornecimento e manutenção.

O mercado automotivo é cada vez mais competitivo, e ao mesmo tempo cada vez mais promissor graças ao seu crescimento ligado à presença constante na vida de praticamente todos os seres humanos.

O formula SAE foi criado para estimular nos estudantes o desafio de projetar, construir e competir. O formula SAE funciona como uma empresa, a qual tem que contratar um grupo de engenheiros para construir um veículo fórmula SAE. Ao se engajarem em um projeto complexo como esse, os estudantes são obrigados a desenvolver habilidades e capacidades de resolução de problemas reais, com criatividade e competência administrativa, pois os custos do projeto têm de ser respeitados. Além disso, um veículo tipo Fórmula tem como característica a alta performance e isso requer engenharia de precisão e altamente qualificada. Nessa área, não há espaço para amadores.

Além disso, a Escola Politécnica visa implementar um centro de excelência na simulação dinâmica de veículos e enxergamos no Formula SAE um motivador para nossas pesquisas. A competição é a oportunidade de demonstrar na prática o resultado de nosso trabalho. Até lá, espero que possa ser desenvolvido soluções próprias de sistemas de simulação de dinâmica veicular, aplicáveis em diversas situações reais, desde a análise de colisões para seguradoras, até a própria simulação virtual do comportamento do veículo Fórmula SAE.

A equipe terá que estudar conceitos que serão aplicados no veículo, principalmente relativos à modelagem das suspensões dianteira e traseira, do sistema propulsor, o sistema de freios, o ensaio da parte aerodinâmica e os elementos finitos da estrutura tubular. Paralelamente, diversas empresas terão que ser convidadas a patrocinar a equipe.

A primeira edição da Formula foi durante o XIII Congresso SAE Brasil, visitado por mais de 8 mil pessoas, com 90 empresas expositoras, debates em 45 fóruns e apresentação de 260 trabalhos técnicos.

De acordo com Luso Ventura, presidente da SAE Brasil, a Formula SAE tem como objetivo o fomento da especialização técnica da engenharia da mobilidade brasileira.

4. AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA

4.1. Sistema de direção e conjunto de rodas

O sistema deve garantir a Geometria de Ackerman, de maneira a minimizar o arraste dos pneus nas curvas, melhorando o desempenho e reduzido o desgaste do sistema a geometria de Ackerman, indica que o centro de curvatura de cada uma das rodas deve ser o mesmo, para qualquer raio de giro obtido.

O sistema de direção usado será o pinhão cremalheira. Este sistema é composto por um sistema de engrenagens, uma cilíndrica (pinhão) e uma plana (cremalheira), sendo que o torque aplicado ao volante transmite o movimento longitudinalmente à engrenagem plana, movimentando as rodas.

A concepção do sistema de direção depende de uma análise do chão onde o veículo será testado, podendo então prever uma resposta para determinada entrada do sistema.

Para conforto do piloto e precisão da manobra, o curso do volante geralmente é definido em 320° , sendo metade para cada lado, resultando 28 mm de curso de cremalheira para cada lado também.

Segundo Madureira [8] o veículo se movimenta em solo elasto-plástico, portanto em altas velocidades deve-se considerar os ângulos de deriva dos pneus resultantes da força centrífuga e desconsiderar os ângulos provocados pela deformação do pneu, pois o coeficiente de atrito do solo, a velocidade máxima de curva e a carga vertical na roda são baixos. Esse comportamento pode ser analisado no equilíbrio de forças no plano horizontal, onde é possível analisar os ângulos de deriva.

Para baixas velocidades, os ângulos das rodas dianteiras podem ser calculados de acordo com a geometria do Ackerman [1]. Definindo um raio de curva pode-se determinar os ângulos de esterçamento das rodas dianteiras, de forma que todas as rodas possuam o mesmo centro de giro. Esses ângulos servem de entrada para o cálculo do mecanismo de direção.

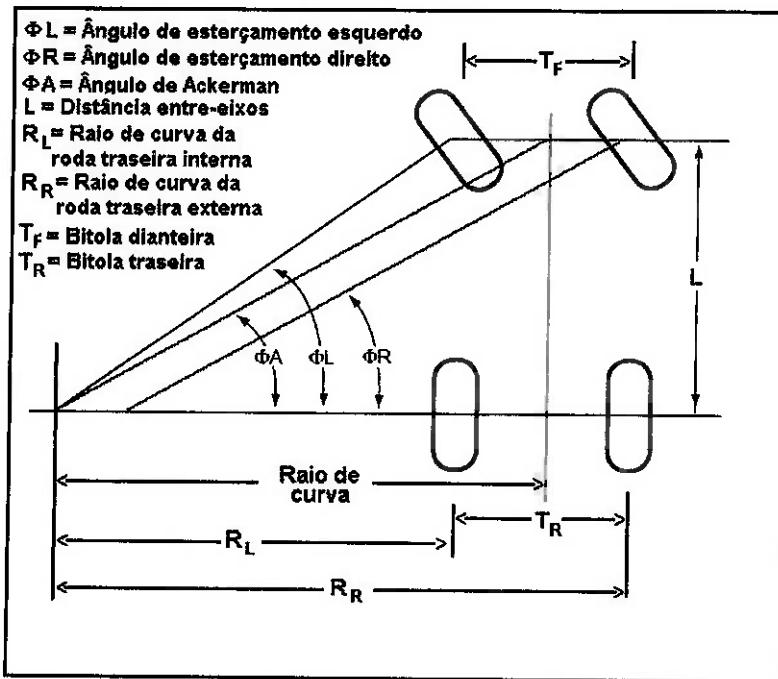


Figura 2 - Parâmetros para o projeto de direção

Os elementos que compõem o sistema de direção (cubos de roda, mangas de eixo, barras de direção) devem ser dimensionados para suportar esforços de até 12000 N na direção vertical (simulação de um buraco), e de 5000 N na direção longitudinal do veículo (simulação de um choque frontal e traseiro), garantido integridade ao conjunto. São feitas análises em elementos finitos destas peças no software Algor, FEMPRO.

4.2. Sistema de suspensão

O projeto da suspensão se divide em três etapas:

- Determinação do comportamento dinâmico esperado para o veículo e cálculo dos elementos do modelo matemático - dureza(s) de mola(s) e amortecedor(es);
- Escolha da maneira de se vincular as rodas ao carro com posterior síntese de um mecanismo adequado;

- Composição dos esforços do mecanismo da suspensão de forma a se obter aqueles esforços que resultem o comportamento dinâmico esperado.

A suspensão é o dispositivo que faz a interface entre as rodas e o carro.

O sistema de suspensão geralmente selecionado para veículos de corrida, tanto para a dianteira quanto para a traseira, é do tipo duplo A (double wishbone). Esse sistema é escolhido dentre todos os outros (MacPherson, Hotchkiss, Swing Arm, etc.) devido a sua robustez, independência de sistemas e sua facilidade de configuração. O sistema duplo A pode ser aproximado, para fins de simulação numérica, por um quadrilátero articulado, o que facilita sua configuração.

Na modelagem devem ser consideradas três posições da roda: na extensão máxima, na deflexão estática e na compressão máxima. Em cada posição é considerado o curso da roda, a cambagem e o deslocamento transversal (variação de bitola). O curso utilizado é definido no comportamento dinâmico, a cambagem é utilizada para compensar a rolagem do veículo (o ângulo máximo é calculado na análise de capotamento) e o deslocamento transversal é utilizado para definir a altura do centro instantâneo de rotação (os dois fatores são diretamente proporcionais) de forma a coincidir com o ótimo calculado.

Como toda a análise dinâmica é realizada usando como referência o ponto de contato do pneu com o solo, os valores de rigidez da mola e do amortecedor têm que ser definidos de forma a proporcionarem os valores requeridos nesse ponto, dada a posição do conjunto mola-amortecedor.

Como restrição no sistema de suspensão tem-se que o carro deve ser equipado com suspensão totalmente operacional, com amortecedores nas rodas dianteiras e traseiras e curso total mínimo de 50,8 mm, sendo 25,4 mm em jounce e 25,4 mm em rebound.

A finalidade da suspensão primeiramente é manter o chassis apoiado nas rodas, que devem estar em contato com a pista o máximo possível. Posteriormente uma suspensão bem projetada deve absorver a transferência de massa e os impactos causados pelas irregularidades de uma pista sem causar movimentos bruscos no chassi, propiciando suavidade em curvas, frenagens e acelerações. Os componentes

básicos de uma suspensão são: braços móveis, molas, amortecedores e barras estabilizadoras.

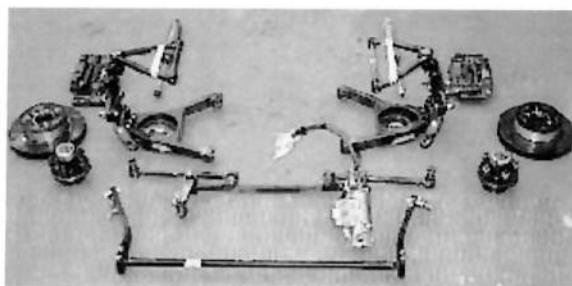


Figura 3 - Componentes da suspensão

Em qualquer carro, em particular os de alta performance e de corridas, é essencial manter a estabilidade em todas as condições. A suspensão é influenciada por vários fatores incluindo peso e distribuição de peso; transferência de peso; posição do centro de gravidade; centros de rolagem e a relação entre o da frente e o de trás; entre eixos; bitola; geometria da suspensão; forças envolvidas; a secção, resistência, pressão e deformação dos pneus; rodas e balanço.

- Transferência de Massa:

Quando seu carro está em repouso, o apoio dos pneus do lado direito e esquerdo são iguais. Toda vez você muda a direção do seu carro ou acelera, você altera a distribuição de peso dinâmica. Quando você vira uma curva, acontece uma troca de peso dos pneus internos para os pneus externos. Esta troca resulta em redução de aderência.

- Molas:

São elas que devem suportar o peso do veículo. As molas como podemos ver, são comprimidas ou distendidas, conforme as irregularidades encontradas no solo.

MOLAS MACIAS	MOLAS DURAS
mais aderência	Menos aderência
Menor desgaste de pneus	Maior desgaste de pneu
Altura alta	Altura baixa
chassi mais lento, respostas mais lentas	Chassi mais rápido, respostas mais rápidas

- Amortecedores:

Quando a mola é comprimida, o amortecedor deve fechar-se e não oferecer resistência maior que a oferecida pela mola. Nessa ação temos que considerar que a mola está comprimida pelo peso do carro. Quando a roda transpõe um obstáculo, a mola deve comprimir-se ainda mais. O amortecedor, por sua vez, deve suavizar esse movimento, sem impedi-lo, para não forçar a carroceria para cima. Na distensão, porém, é necessário que ele exerça mais força, para atenuar a força de distensão da mola. E por isso que, na maioria das vezes, quando acionado com as mãos, é muito mais fácil fechar do que abrir um amortecedor.

- Barras estabilizadoras:

Barra fabricada em aço, que liga elasticamente as rodas de um mesmo eixo. Chama-se "estabilizadora" porque limita a inclinação lateral do carro nas curvas (rolling). Normalmente, tem uma parte central retilínea, que gira em mancais montados na estrutura do carro, e duas extremidades curvas, de forma apropriada para ligá-la às rodas. De modo geral, barra e suspensões ligam-se através de braços. É fixada em ambos os lados da suspensão e conduz o movimento da suspensão de um lado para o outro. Quando um lado da suspensão muda de posição, ora compressão ora distensão, a anti-roll bar é torcida. A anti-roll bar estando torcida naturalmente tenta se distorcer provocando o outro lado do carro adaptar-se a

posição inicial do primeiro e sua eficiência depende da rigidez com que são regulados.

- Aspectos Geométricos

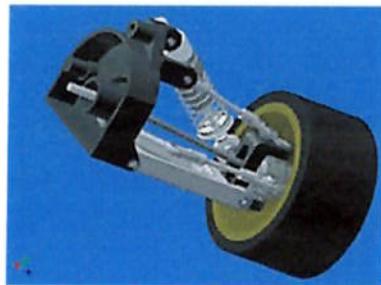


Figura 4 - Desenho da suspensão dianteira

- Entre-eixos: é a distância entre os centros das rodas traseira e dianteira e influência a transferência de peso no sentido longitudinal, somente em carros com características anti-dive e anti-squat a sua relação com a localização do centro de gravidade provoca efeito na cinética da suspensão.
- Bitola: é a distância entre as duas rodas dianteiras ou traseiras, e influência a transferência de peso no sentido lateral, normalmente se utiliza a bitola traseira menor que a dianteira para aumentar tração em curvas, reduzindo assim a resistência a rolagem dos pneus traseiros em relação ao dianteiro.
- Pneus e rodas: para a especificação da geometria de uma suspensão é importante conhecermos as dimensões dos pneus e rodas, pois assim podem-se definir as posições dos braços de suspensão.
- Raio de atrito: é a distância entre o centro da roda e o prolongamento da linha dos encaixes dos braços de suspensão nas rodas ao solo. É necessário para sentimento de inclinação da roda ao piloto. Costuma-se ser interno ao pneu e com baixo valor, pois quando a distância é grande o piloto terá uma constante disputa com as rodas.

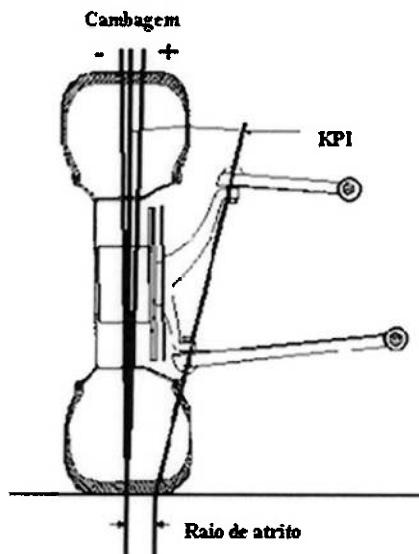


Figura 5 - Esquema da cambagem e KPI

- KPI: Pode ser incorporado ao projeto de um carro para reduzir o raio de atrito, devido a ser uma inclinação lateral entre as posições dos encaixes dos braços de suspensão nas rodas. Também favorece o auto alinhamento das rodas.
- Cambagem: é mensurada pelo ângulo da roda com a vertical. Para otimizar o carro para curvas, deve-se alterar a cambagem para o pneu estar ao máximo em contato com a pista, permitindo a máxima velocidade em curvas.
- Cáster: Promove uma diminuição na mudança de cambagem durante uma curva, porém o efeito é desprezível em curva de grande raio.
- Centro de rolagem: A SAE define como centro de rolagem o ponto que a força lateral é aplicada sem causar rolamento do chassis, se o ponto coincidir com o centro de massa. Você calcula o centro de rolagem, a partir um prolongamento dos braços de suspensão, quando estes se encontram traça-se uma reta até o centro do contato do pneu com o solo e prolonga-se até uma linha vertical do centro de massa do carro se a reta não estiver cruzado o carro, este ponto de intersecção é o centro de

rolagem. Caso de braços paralelos o centro coincide com um ponto no solo. Como os centros de rolagens traseiro e dianteiro podem ser diferentes, podemos traçar uma linha os ligando, chamada de eixo de rolamento, a literatura diz que o eixo de rolamento deve ser posicionado paralelamente ao eixo de distribuição de massa.

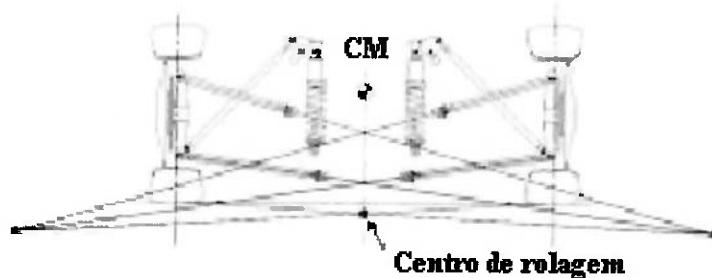


Figura 6 - Esquema do centro de rolagem

- Anti-Dive e Anti-squat: Quando falamos em anti-geometria e centro de rolamento, estamos trabalhando com os mesmos princípios, quando uma transferência de peso ocorre, parte da força é absorvida pelas barras, molas e amortecedores; contudo ao mesmo tempo, parte é transferida para a geometria sólida do carro. Neste sentido o Anti-squat ajuda a prevenir o afundamento quando o carro acelera em uma curva reduzindo a transferência de peso para a traseira. Mais Anti-squat lhe fornece melhor tração e estabilidade para a traseira quando se acelera para fora de uma curva e reduz a estabilidade quando se entra em curvas, a redução provoca efeito contrário. O Anti-dive possui explicação semelhante, visto que reduz a transferência de peso em frenagens.

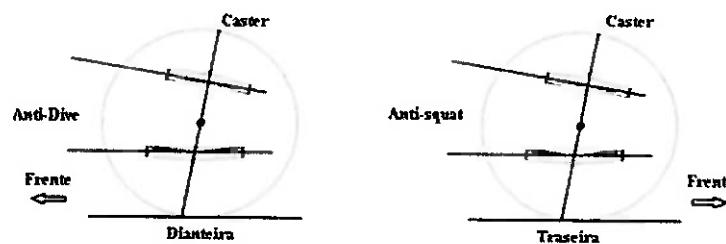


Figura 7 - Esquema do Caster, Anti-dive e Anti-squat

- Convergência: É o ângulo que o par de rodas fazem entre elas seja as da frente ou as de trás, se você olhar o carro de cima e as rodas estiverem paralelas, não há nenhuma convergência. Se ela é para dentro do carro, este possuirá maior estabilidade em retas e reduzirá a capacidade de giro do carro. Se é para fora terá efeito oposto. É recomendado iniciar treinos de um carro desconhecido com 0 em convergência.

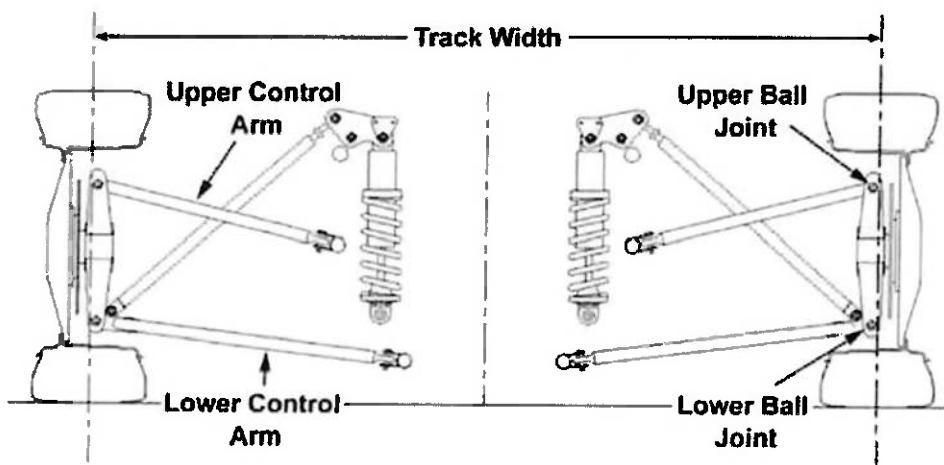


Figura 8 - Esquema da suspensão utilizada no fórmula SAE

O desenvolvimento do estudo aprofundado da suspensão do fórmula SAE será o tema do trabalho de formatura do aluno Daniel Custódio Lopes Trigo.

4.3 Sistema do motor e da transmissão

O sistema é basicamente composto por motor, caixa de transmissão, caixa de redução, conjunto homocinético e diferencial.

4.3.1 Motor

Este subsistema é dividido em:

Refrigeração;

Admissão e exaustão;

Injeção;

Configuração do motor.

- Refrigeração

O sistema de arrefecimento é constituído basicamente de:

-Radiador: faz o resfriamento da água que vem aquecida do motor. Pode ser tubular, de colméia, faixas plissadas (lâmina d'água), vertical ou horizontal.

-Vaso de expansão: recipiente suplementar destinado a recolher o excesso de volume de água que se dilatou ao esquentar. Pode ser pressurizado ou selado (praticamente elimina o fenômeno de evaporação, tornando a tarefa de verificação de nível um ato esporádico). É um compensador para as dilatações que a solução arrefecedora sofre. Quando a temperatura da solução sobe, fazendo-a expandir-se no sistema, o excesso é conduzido ao vaso de expansão. A diminuição da temperatura e da pressão, no processo de resfriamento do motor, cria depressão e a água é novamente aspirada para o radiador.

-Tampa de pressão: eleva o ponto de ebulação da água. Possui molas calibradas que estabelecem pressões ao sistema entre 0,5 e 1 kg/cm², o que dá os parâmetros de fervura d'água por volta dos 112°C, ao nível do mar. Uma segunda válvula é também responsável pelo alívio da pressão interna, através do trabalho das molas calibradas na tampa do reservatório -- as válvulas de sobrepressão, que se encontram na tampa do reservatório. Em caso de defeito, podem gerar problemas de grandes proporções. São um componente de baixo custo que leva muita gente para a oficina.

-Ventilador ou hélice: tem como principal tarefa forçar a passagem do ar externo através das galerias do radiador (dutos, lâminas ou faixas, de acordo com o projeto), refrigerando assim o fluxo de água em seu interior. Pode ser acionado pelo próprio motor (através de correias), por acoplamento viscoso (através de aplicação de um fluido viscoso de alta resistência, geralmente silicone, no interior do cubo do ventilador -- nas baixas rotações, sua resistência trava o cubo de encontro ao rotor, desligando o ventilador; assim ele gira acoplado só quando houver necessidade de retirar calor, sem consumir energia do motor) ou ter seu acionamento por comando elétrico (acionado por um interruptor térmico).

-Mangueiras: condutos externos pelos quais circula o líquido de arrefecimento. Devem ser observadas quanto a fissuras (trincas), enrijecimento e flexibilidade exagerada, pois podem comprometer o motor, levando-o ao processo de fusão dos componentes internos.

-Bomba centrífuga (de recalque): recalca a água do bloco ao radiador, isto é, um acelerador de circulação. Geralmente acionada de forma mecânica, pelo virabrequim através de correia, faz com que haja circulação constante de líquido ou solução por todo o circuito.

-Termostato ou válvula termostática: agente controlador da temperatura de funcionamento do motor. É o responsável pela manutenção dos coeficientes de dilatação do motor, fazendo com que o conjunto opere em uma faixa de grau térmico definido. Quando a água está fria, o termostato permanece fechado e a solução refrigerante não circula através do radiador, mas apenas nas galerias do bloco e cabeçote, proporcionando um rápido aquecimento do motor. Age controlando a velocidade com que a água circulará pelo circuito. Exemplificando: se a velocidade de passagem da água pelo radiador for muito rápida, a solução esfria e, ao retornar ao motor, ocorre um choque térmico e a contração do material. Na ausência da válvula termostática, a água passará muito rapidamente pelos componentes internos, não havendo tempo para a realização da troca de calor.

- Admissão e Exaustão

A admissão utilizará uma válvula reguladora de pressão do tipo borboleta com camo variado. Deverá ser utilizado um restritor do tipo venturi, seguindo a regra.

A exaustão será feita com um escapamento padrão 4:1 e com um sistema silencioso modificado de motocicletas. Pois o sistema de escapamento deve limitar o ruído ao nível aceitável descrito na regra (110 dBA, por pouco tempo).

- Injeção

Será usado um sistema eletrônico de injeção de combustível que se utilizará de retro-informações do motor e de informações pré-programadas para injetar medidas otimizadas de combustível a cada ciclo. Ainda, controla o acendimento da faísca da vela nos cilindros para otimizar o tempo e melhorar o desempenho do sistema de transmissão. Deverá ser usada uma injeção eletrônica totalmente programável com um restritor de 20mm.

- Configuração do motor

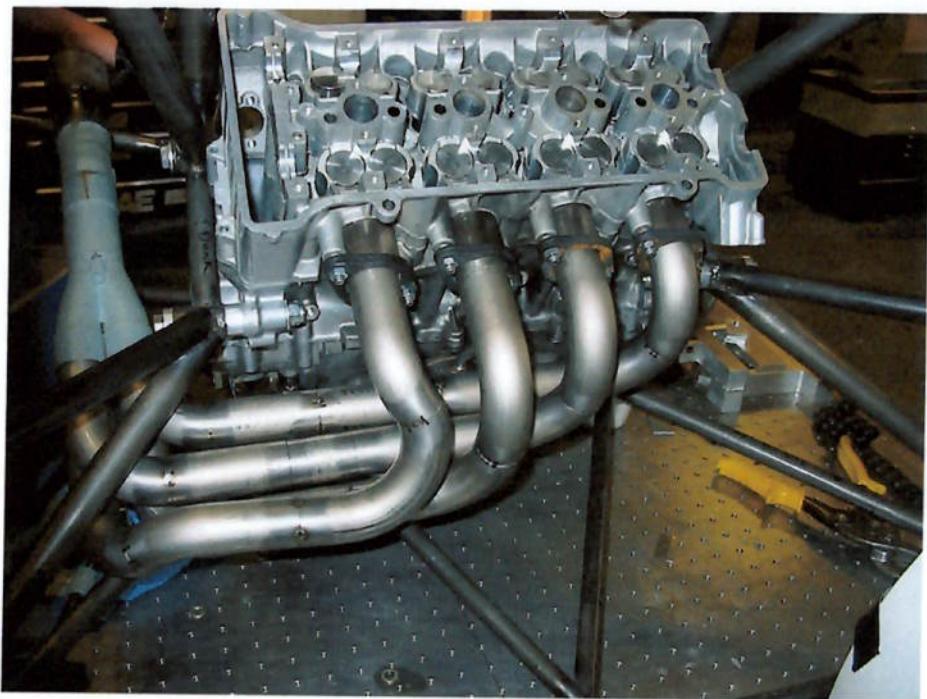


Figura 9 - Ilustração do motor aberto e o sistema de escape

Os parâmetros devem ser estudados de acordo com o motor escolhido, sendo que suas restrições são:

O motor de 4 tempos deve ter deslocamento máximo de 610 cc. A admissão de ar do motor é limitada em 20 mm no seu diâmetro quando o combustível utilizado for gasolina e 19 mm quando utilizado o E-85. O carburador poderá ser de qualquer

conceito e tamanho. Não é permitida a utilização de aditivos e alteração de temperatura do combustível. Turbochargers e superchargers são permitidos.

- Configuração

Usualmente as configurações do motor são:

Tipo: Honda CBR600F4(i), com bloco e cabeçote de alumínio, com 4 pistões em linha naturalmente aspirado, de 599cc.

Controle de válvulas: DOHC 4 válvulas/cilindro, com atuação mecânica

Diâmetro X Curso do pistão: 67 x 42,5 mm

Taxa de compressão: 13,6: 1

Máxima rotação do motor: 12000 rpm

No gráfico 1 está representada uma curva de torque e potência pela rotação do motor escolhido. As curvas em vermelho representam uma curva normal de um motor com as configurações originais. E as curvas em preto caracterizam o mesmo motor, após um melhor ajuste do comando de válvulas, isto é, otimizando o tempo de abertura e fechamento das válvulas de admissão e escape para as condições de um veículo Fórmula SAE, conseguiu-se tais resultados.

Nota-se uma forte elevação do torque em baixas rotações, entre 6500 e 9500rpm (cerca de 10ftlb) e consequentemente um aumento da potência nestas rotações. A potência máxima foi diminuída, mas a melhoria do rendimento em rotações mais baixas supera esta perda, já que na competição o motor trabalhará em rotações mais baixas na maioria do tempo.

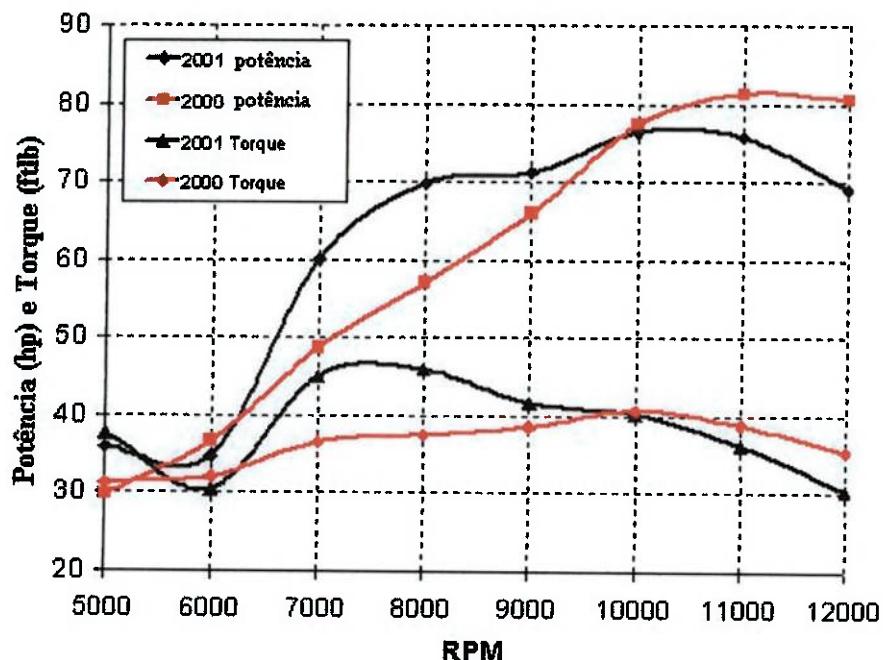


Gráfico 1 – Torque e Potência pela rotação

Posicionamento e fixação do motor - O motor é alojado de forma a se adequar ao atual sistema de transmissão (sendo este explicado mais adiante) e a alguns resultados exigidos em situações de uso.

Escolha do lubrificante – Por se tratar de um motor refrigerado a água, considerando as médias de temperatura da pista (em torno de 50°C) e somando a elevação da rotação máxima para 15000rpm, é necessário realizar uma pesquisa para escolher um lubrificante que garanta proteção aos componentes, estabilidade da viscosidade em elevadas temperaturas e efetiva economia de combustível alcançada com a redução do atrito interno do motor.

A partir dessas necessidades, constata-se a eficiência do lubrificante da Texaco de fórmula mineral chamado Havoline Energy 5W30. Este óleo possui alta estabilidade entre 40°C e 150°C, o qual traz um acréscimo de potência.

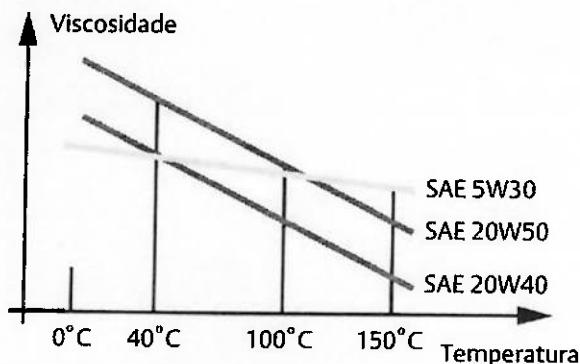


Figura 10 - Viscosidade x Temperatura (Fonte Texaco)

A gasolina Podium oferece maior rendimento, pois possui maior octanagem, 91 octanas contra 87 da outras (Gasolina aditivada Esso e Gasolina V-Power Shell). O tanque de combustível deve ser de no máximo 7,57 l para gasolina e 10,6 l para E-85.

4.3.2. Diferencial

O diferencial permite a transmissão do torque às rodas traseiras, permitindo que elas tenham rotações diferentes; este apresenta uma certa redução de transmissão.

O diferencial fica instalado na caixa de transferência e sua função é atuar nas curvas transferindo torque e velocidades diferentes para as rodas no eixo traseiro.

Numa curva, cada roda percorre distâncias diferentes e algum recurso deverá entrar em ação para compensar essa diferença. Quando o veículo iniciar uma curva, uma das rodas oferecerá menor resistência para desenvolver maior velocidade, e através do diferencial receberá mais torque do que a outra roda.

Mas o diferencial funciona permanentemente, e em situações em que uma das rodas não encontrar resistências transferirá todo o torque para a roda que estiver girando solta, sem contato com o piso. O diferencial deixará sem nenhum torque a outra roda que tem condições de tração e transferirá tudo para a roda que está

patinando. Deste modo, terá seu diferencial retirando o torque da roda que tem tração, transferindo tudo para a roda que está girando no ar. O resultado é um veículo imóvel e sem condições de seguir adiante.

Para evitar esse problema, o diferencial conta com o recurso do bloqueio, que anula seu funcionamento transferindo continuamente o torque do motor para a roda em contato com o solo.

O acionamento do bloqueio do diferencial é feito por comando elétrico no painel ou através de uma alavanca pequena, situada ao lado da alavanca de troca de marchas. Para desengatar o blocante, pare o veículo e desligue a chave no painel, ou coloque a alavanca na posição anterior.

4.3.3. Conjunto Homocinético

O conjunto homocinético permite que o torque seja transmitido acompanhando o funcionamento da suspensão. Talvez seja necessário um torque final maior que o produzido pelo motor e amplificado pela caixa de câmbio e pelo diferencial, portanto uma caixa de redução fixa deva ser acoplada ao sistema.

Partindo-se da opção pela suspensão do tipo duplo A (double-wishbone) para a suspensão traseira (critérios de decisão tratados posteriormente), o eixo de transmissão entre o cubo e o eixo de saída da caixa de transmissão apresenta a necessidade de um determinado curso axial. Desta forma são estudadas diversas configurações de pares de acoplamentos de desalinhamento paralelo apresentadas em FENTON.

As juntas deslizantes selecionadas se mostram mais leves que eixos telescópicos. Juntas universais são evitadas por transmitirem mais vibrações que as juntas homocinéticas fixas. Dentre os pares homocinéticos automobilísticos nacionais, são comparados o tipo Rzeppa - VL (VW-Gol) e Rzeppa - "Tripoid" (Ford-Ka), modelos com preços de mercado mais favoráveis.

A inibição de qualquer situação conflitante entre transmissão, suspensão e estrutura é o requisito primário para o projeto da homocinética. É realizada uma análise do conjunto homocinético por meio de uma rotina de otimização proposta por

ERDMAN através do software Scilab. A alocação da caixa de redução e do diferencial na estrutura do carro, a altura livre do solo na parte traseira e os dados de posicionamento angular e posicionamento do semi-eixo definem os parâmetros de saída do estudo. O programa elaborado analisa a alocação do semi-eixo para diversas posições do mecanismo da suspensão dentro do curso proposto apontando limites de angulação e o curso axial do semi-eixo. Como resultado final é obtida uma faixa angular de $+7^\circ$ até -22° e um curso total de 30mm do semi-eixo deslizante. Tais valores podem ser visualizados abaixo:

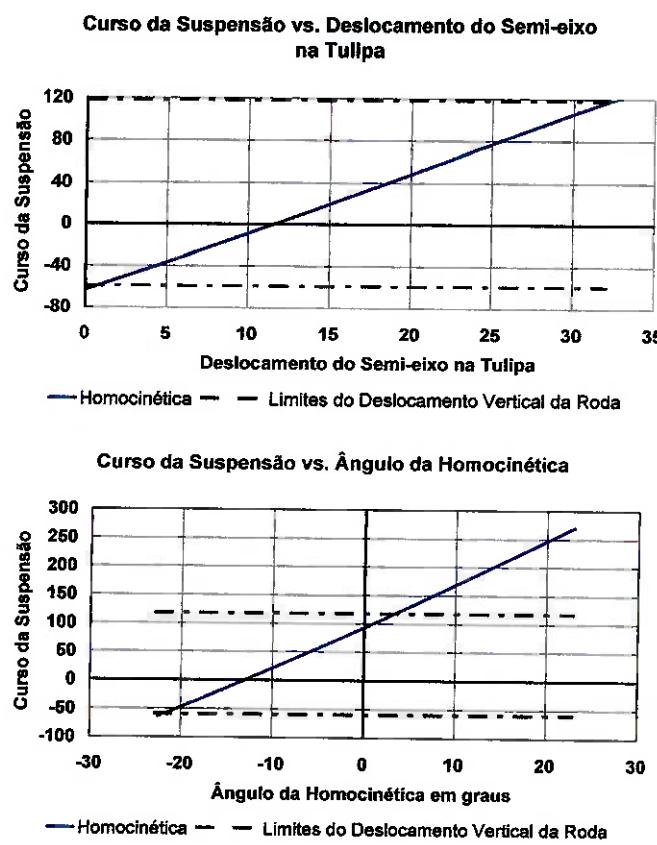


Figura 11 - Resposta da homocinética deslizante para o curso da suspensão

O estudo aponta a junta Rzeppa - “Tripoid” (Ford-Ka) como a mais adequada para o projeto. A perda do conjunto homocinético é estimada em 10%, tendo como base a referência FENTON.

A velocidade máxima do veículo é calculada através de:

$$v_{\max} = \frac{\omega \cdot r}{i_t} * C_h \quad (1)$$

Onde: v_{\max} – velocidade máxima;

ω - rotação de velocidade máxima do motor;

r – raio da roda;

i_t – redução do conjunto (caixa de câmbio + caixa de transmissão + diferencial);

C_h – coeficiente de perda das homocinéticas.

O cálculo da aceleração, por sua vez, é obtido pelas equações (2) e (3).

$$a = \frac{v_{\max}^2}{2 * d} \quad (2)$$

$$t = \sqrt{\frac{2 * d}{a}} \quad (3)$$

Onde:

d – distância de aceleração (75m);

t – tempo de aceleração.

4.3.4. Caixa de transmissão

Consiste na escolha do sistema de transmissão da potência do motor para as rodas. Para tanto, elabora-se uma tabela de decisão onde os elementos corrente, correia e engrenagem são avaliados segundo critérios distintos e, conforme a Tabela 1, o sistema de transmissão por engrenagens é o escolhido para o projeto.

Tabela 1 - Tabela de Decisão (Notas e Pesos de 0 a 10)

CRITÉRIO	Corrente	Correia	Engrenagem
	nota*peso	nota*peso	nota*peso
Rendimento	81	86	88
Confiabilidade	58	65	97
Resistência à sobrecarga	38	54	33
Espaço	56	44	93
Peso	50	50	40
Variação de relação	40	25	23
Manutenção	36	57	71
Complexidade de projeto	73	53	51
Custo do projeto	27	36	18
Capacidade de reposição	43	30	20
	502	500	534

Os valores ideais das reduções da caixa podem ser encontrados impondo que a força motriz do veículo, apontada em (1), deve ser maior ou igual à somatória das resistências impostas, segundo HEISLER.

$$F_{mot} \geq \frac{2}{d_r} * (T_{motor} * i_{câmbio} * i_{caixa} * i_{diferencial}) \quad (4)$$

Onde:

F_{mot} – força motriz;

d_r – diâmetro da roda;

T_{motor} – torque máximo do motor;

$i_{câmbio}$ – relação de redução do câmbio;

i_{caixa} – relação de redução da caixa;

$i_{diferencial}$ – relação de redução do diferencial.

As resistências para o enduro são representadas pelas forças de rolamento, rampa e de aceleração, e podem ser respectivamente listadas pelas equações (5), (6) e (7).

$$R_{rolamento} = C_r * W \quad (5)$$

$$R_{rampa} = W * \operatorname{sen} \theta \quad (6)$$

$$R_{transitória} = \frac{W}{g} * a \quad (7)$$

Onde:

W – peso do conjunto (veículo + piloto);

C_r – coeficiente de rolamento;

θ - inclinação da rampa;

g – aceleração da gravidade;

a – aceleração do veículo

As engrenagens são então dimensionadas pelos critérios de tensão de flexão e de pressão de contato, segundo as normas AGMA ou DIN. Para reduzir os esforços radiais e as vibrações e ruídos do engrenamento, opta-se por engrenagens de dentes helicoidais. Para aplicar alívios de massa a cada uma das coroas, usa-se a teoria de Dubbel. O material escolhido para fabricação das engrenagens é o aço SAE 8620, posteriormente tratado termicamente e ainda retificado.

O dimensionamento dos eixos consta como base para a maioria das definições tomadas com relação à caixa. Entrando com os esforços e a geometria das engrenagens, com o torque do motor e a redução da caixa de câmbio, e ainda considerando as concentrações de tensão criadas por rasgos de chaveta e estrangulamentos, chega-se às tensões admissíveis de cada eixo. Os eixos ainda são verificados pelo critério de Soderberg em relação à falha por fadiga e, enfim, é selecionado o aço, correspondendo aos objetivos de redução máxima de peso.

Os rolamentos selecionados são rolamentos de esferas de uma carreira, vedados e que, em conjunto com retentores instalados na caixa, não são prejudicados

pelas árduas condições que uma competição Formula SAE impõe. A seleção é feita com base no procedimento proposto pelo catálogo do fabricante NSK.

4.4 Sistema de freios

O sistema de freios tem como objetivo, possibilitar a completa parada do veículo no menor espaço possível, sendo que esta distância não pode ser superior a 15m, por questões de segurança.

O sistema de freios do veículo deve ser composto por um cilindro mestre acionado através de uma alavanca ligada ao pedal esquerdo. Este cilindro possui internamente dois sistemas independentes (um à frente do outro) garantindo assim o funcionamento, ao menos parcial, dos freios em caso de uma eventual falha em algum dos dois sistemas. Ligadas ao cilindro mestre se encontram as pinças de freio, que, através da pressão recebida do mesmo, pressionam as pastilhas contra os discos de freio que estão presos aos cubos de roda, fazendo assim com que o protótipo desacelere.

4.5 Estrutura

Os principais objetivos da estrutura são:

- Garantir a integridade do piloto, mesmo no caso de possíveis choques e/ou capotagens, e garantir a rápida saída do piloto em caso de alguma emergência;
- Possuir rigidez e resistência estrutural suficiente e geometria adequada para que sirva como estrutura de fixação e/ou apoio para os demais subsistemas, como suspensão, trem de força, direção, etc.

O desenvolvimento do projeto prima pelo atendimento de todos os objetivos propostos, de modo a otimizar a segurança e a funcionalidade.

Tendo isso em vista, inicia-se por atender as exigências do regulamento, atentando principalmente para a geometria dos tubos e as exigências funcionais.

Para aumentar a rigidez estrutural do veículo, todos os nós devem ser posicionados onde as forças significativas oriundas dos subsistemas atuariam. A

geometria da porção traseira deve ser adequada tanto para a fixação da suspensão quanto para a acomodação do conjunto de motor e transmissão.

A estrutura do carro bem projetado é o ultimo e maior item a constar em um desenho. Como um meio de conectar a montagem das partes, deve ser projetado para localizar cada uma das peças em posições nas quais elas sirvam com maior vantagem, e nas quais as forças envolvidas possam ser retiradas da maneira mais simples possível.

Considerando dessa maneira o chassi, sua finalidade principal é prover a montagem conveniente de todos os componentes do carro. Em ordem decrescente de magnitude, as principais forças envolvidas no carro, são:

- Suspensão traseira e o torque máximo;
- Suspensão dianteira e curvas;
- Motor e cambio;
- Tanque de combustível;
- Assentos e ocupantes, coluna de direção, pedais, e outros controles;
- Radiador;
- Bateria.

É o layout desses componentes que determina em grande parte o desenho do chassi, e nos primeiros estágios do planejamento a maior atenção deve ser dada à suspensão traseira e dianteira que deve caracterizar os pontos de aplicação de força dentro da estrutura.

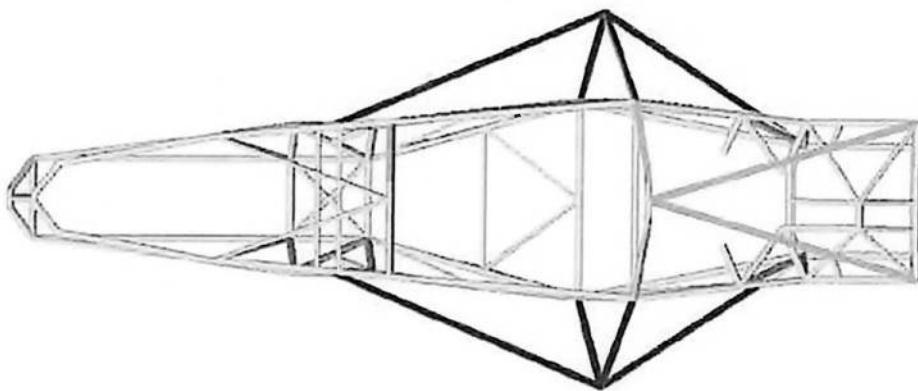


Figura 12 - Vista Superior de uma estrutura do fórmula SAE

4.6 Aerodinâmica

Nada tem recebido mais importância do que a aerodinâmica no esporte a motor, nas últimas décadas. Muitos são os engenheiros chefes de grandes equipes que confirmam ser esta o principal caminho pro topo do pódio.

Uma boa dica é conhecer sobre a aerodinâmica das aeronaves, pois muito dela é usado em competições automobilísticas. Todavia existe uma diferença considerável entre o ar encontrado a altas altitudes pelos aviões e o turbulento ar encontrado na terra, sendo perturbado por vários obstáculos.

Concepções básicas sobre aerodinâmica que precisam ser assimiladas são:

1. quando a velocidade do ar é dobrada as forças geradas pela ação do fluido nos corpos quadruplica;
2. o que ocorre entre o ar e um corpo que se move, é que o corpo desloca cada partícula de ar perpendicularmente à sua superfície, e com a ausência de contato com a superfície do corpo (skin friction) a partícula deve retornar aproximadamente para a sua posição original, depois da passagem do corpo.

O projetista da aerodinâmica tem dois principais interesses: a criação de efeito solo, que ajuda a fixar os pneus do carro contra a pista influenciando muito nas

curvas; e a minimização do arrasto (arrasto aerodinâmico) que é provocado pela turbulência e age inibindo a sua velocidade final e consumo.

Algumas inovadoras equipes começaram a experimentação com as agora familiares asas no fim dos anos 60. As asas dos carros de competição operam exatamente no mesmo princípio que as asas das aeronaves, apenas em sentido contrário. O ar flui a velocidades diferentes nos dois lados da asa (por ter contornos de diferentes extensões- em cima e em baixo) e isto gera diferença de pressão, uma regra física conhecida como princípio de Bernoulli. Como a pressão tende a estar sempre em equilíbrio, a asa tenta mover-se em direção de menor pressão. Os aviões usam suas asas para criar lift (sustentação), carros de corrida usam as suas para criar efeito solo.

Pela metade dos anos 70 ground effect (efeito solo) foi descoberto. Os engenheiros da equipe Lotus de fórmula 1 descobriram que o carro inteiro podia ser usado para agir como uma asa pela criação de uma asa gigante no seu piso, o que ajudaria a puxar o carro para o chão, utilizando-se de um tubo de Venturi, entre o piso e a pista, gerando uma pressão mais baixa onde o ar percorre com maior velocidade.

Duas das principais consequências entre a interação de um corpo qualquer (com ênfase em carros de corrida) serão abordadas aqui. O indesejável arrasto (arrasto) e o perseguido efeito solo (força sobre o corpo, para baixo).

Arrasto

O arrasto é gerado por três principais componentes: O arrasto do perfil, que é uma função da área frontal do carro, o arrasto de fricção, em função da rugosidade da superfície do corpo, e o arrasto induzido provocado pelo próprio efeito solo.

Com as formas dos carros da atualidade, o arrasto gerado pelo perfil é o mais importante. Depois de uma dedicada atenção ao perfil, o arrasto de fricção torna-se suficientemente importante, primeiramente no controle de turbulência na camada de ar próxima da superfície, a camada limite. O arrasto induzido cresce junto com o

acréscimo de efeito solo. Em carros com asas ou muito efeito solo, arrasto induzido deve ser considerável.

Formas aerodinâmicas básicas devem ser consideradas primeiro, na concepção de um projeto. Falando genericamente, melhores resultados podem ser esperados com a aplicação de aerodinâmica na traseira de objetos. Isso é percebido com a idéia de que é muito mais fácil empurrar o ar do que puxá-lo. O ar que está sendo perturbado na frente do corpo tende a seguir linhas aerodinâmicas suaves, enquanto o fluido se separa da superfície e torna-se aleatório, sem um objeto sólido para guiá-lo para o seu lugar de origem. Quando o fluido se separa abruptamente da superfície do corpo, ele se quebra em ondas como a do mar, e gira em torno de si, criando uma série alternada de vértices de alto arrasto. Uma boa solução é convergir o corpo na parte de trás, num ângulo de 10 a 15 graus, permitindo uma separação menos abrupta, o que nem sempre é possível em carros do tipo fórmula. Porém, a solução não é sempre eficiente para carros de competição, uma vez que a camada limite do fluido, sendo muito sensível, pode ser quebrada com alterações no fluido, como sujeira, vértices de outros carros, etc.

Tendo um corpo prontamente aerodinâmico, a área frontal pode ser desconsiderada. Se o contorno está correto, e não existem vincas, fendas, falhas, um fluido realmente fixo é possível, em que o ar tem uma grande tendência em seguir o corpo inteiro. O arrasto individual dos espelhos, barras, e outras estruturas pode ser considerado insignificante. Porém quando colocados próximos de alguma superfície do corpo podem comprometer toda a aerodinâmica do carro, com seus rastros de turbulência. O rastro é parecido com o criado por um barco em alto mar, com cerca de 15 graus depois do objeto.

Rodas e pneus são problemas especiais de arrasto em carros de corrida, principalmente nos tipo fórmula (rodas expostas). Não apenas por serem relativamente ásperos e terem uma grande área frontal, mas por girarem e os dianteiros se curvarem. O arrasto aumenta com o quadrado da velocidade, e o topo do pneu recebe uma velocidade duas vezes a do carro. E na quarta parte inferior do pneu, o ar é comprimido entre ele e a pista. Isso aumenta o vértice criado pela rotação da roda e do sistema de freios, e pode perturbar o fluido por todo a lateral do

carro, contribuído muito com o arrasto. Não sendo proibidos por regulamentos, algumas palhetas na frente e atrás dos pneus provavelmente podem ajudar.

É consenso que quanto mais bem lacradas forem as superfícies do carro quanto mais eficiente será. Porém, aberturas para a entrada de ar são vitais para chegar ao fim de qualquer corrida. Elas evitam o superaquecimento do motor, permitem a mistura ar combustível, refrescam o sistema de freios, e um ponto muito importante: favorecem no conforto do piloto. Vital para corridas de qualquer distância. Tudo é uma questão de saber onde se encontrar pressão positiva e negativa.

Efeito Solo

Em anos recentes efeito solo aerodinâmico tem sido de longe o mais valioso fator para a redução dos tempos das voltas. Em algumas competições, todavia, a economia de combustível tem recebido maior ênfase, tornando a disputa entre arrasto e efeito solo muito travada. E como não existem dúvidas de que quanto menor arrasto, quanto melhor, e quanto maior efeito solo, melhor, uma correta distribuição de efeito solo entre as rodas dianteiras e traseiras pode ser muito difícil de obter. Desde que o efeito solo cresce com a velocidade, é possível que uma má distribuição cause uma mudança no comportamento do carro de understeer (saindo de frente) a oversteer (saindo de traseira), com o aumento da velocidade.

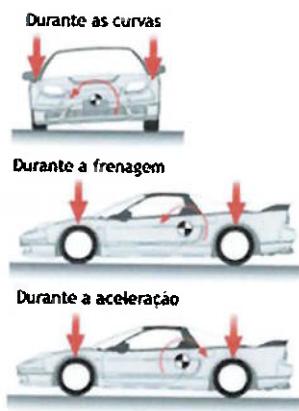


Figura 13 - Efeito solo

Efeito solo pode ser obtido por, no mínimo, quatro métodos diferentes. O primeiro é claro, quase tão antigo quanto os próprios carros de corrida, são as asas invertidas, o aerofólio. O segundo método, conhecido como "open-tailed box" sela a frente e as laterais do carro, com saias ou aletas, inibindo a passagem do ar por baixo do carro, e a traseira é aberta, se aproveitando de pressão negativa natural do carro. O terceiro método, assim como o segundo, veda boa parte do carro e utiliza um ventilador para gerar ainda mais pressão negativa. Este é um método muito complexo para se desenvolver, sendo proibido antes mesmo de sua utilização em 1970. E o método quatro é o mais desejado, por gerar uma quantidade considerável de efeito solo, o Efeito Solo.

Gerar ou aumentar o efeito solo, não é simplesmente uma questão de inverter a teoria da sustentação vindas dos estudos em aviões em ar livre. Um aerofólio de não-sustentação ao ar livre tem pressão negativa agindo sobre suas superfícies, ambas acima e abaixo. Mas um relativamente obtuso corpo de um carro de corrida tem muito pouco fluxo de ar passando sob ele, por estar muito próximo do chão. Uma grande parte do ar passa sobre o topo do corpo criando uma extrema pressão negativa que tenta suspender o corpo.

Considerando o corpo inteiro, é genericamente uma função da velocidade ao quadrado, assim como o arrasto. Pode ser entendido que a área total é tão importante quanto o CD (coeficiente de Efeito solo). Um fluido idêntico sobre um corpo que tem o dobro da superfície de área, teria o dobro de efeito solo na mesma velocidade. O grande problema está em conseguir fazer com que o fluido faça o que lhe é proposto.

No nariz do carro, qualquer pressão positiva é útil para forçar o corpo para baixo, mas ao mesmo tempo isso é prejudicial por elevar o arrasto. Deve já ser aparente que o problema não se trata de identificar onde está o fluido, mas sim de uma questão do comportamento da pressão aerodinâmica em alguma superfície atingida.

Ao longo do corpo, o problema de eliminar a sustentação torna-se essencialmente sem solução. Se o ar deve passar acima do corpo a uma taxa alta, isso vai gerar uma pressão baixa. Não existem maneiras de se evitar isso sem a criação de muito arrasto. O melhor que pode ser feito é reduzir a área de sessão lateral para que

a velocidade alta do fluido seja minimizada. Onde a pressão for negativa no topo do corpo, quando menos corpo, melhor. Nos locais em que a pressão é realmente baixa, como no topo dos pára-choques, ela pode servir para ventilar o motor, reduzindo a pressão baixa sobre o corpo.

Na traseira não é suficiente simplesmente convergir o corpo a um ângulo apropriado para minimizar o arrasto. É mais uma vez o problema de criar pressão positiva sobre, e negativa abaixo de uma superfície. Uma grande placa no fim da traseira a 45 graus provocaria uma alta diferença de pressão entre o topo piso do carro, mas geraria quase a mesma quantidade de arrasto, em relação ao efeito solo. A solução mais simples é montar um lábio vertical no extremo limite da traseira, na parte mais alta desta. Isso tem o efeito de gerar pressão alta na área à frente dele, que age de cima para baixo no corpo. Mas surpreendentemente isso não necessariamente aumenta o arrasto como um todo. Se for criada uma pequena depressão na superfície em frente ao lábio, a pressão positiva pode também agir para empurrar o carro para frente. Até certa altura o lábio contribui para aumentar efeito solo e diminuir arrasto. Ao se usar alguma asa sobre o carro, é necessário ter uma distância mínima da superfície mais próxima, para as camadas limites de ambos não se desfaçam, cancelando assim o efeito da pressão negativa sob a asa.



Figura 14 - Modelo de uma carenagem para fórmula SAE

A carenagem é geralmente feita da fibra de vidro grossa de 3mm (Classificam essa fibra como tecido 250), colocada acima sobre um assoalho de MDF e de blocos da espuma do poliestireno. É construído em quatro seções principais que facilitam o acesso fácil a todos os sistemas para a manutenção.

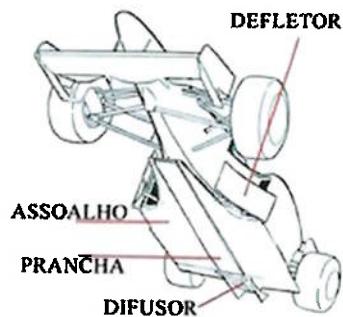


Figura 15 - Vista inferior do carro

- O nariz, que estende para frente (com entalhes para a suspensão)
- Seção da cabina do piloto do lado direito
- Seção da cabina do piloto do lado esquerdo
- Tampa da baia do motor

A tampa da baia do motor incorporará algum duto para a entrada de ar do radiador e do motor, e poderá ser modificado para incorporar o duto para um segundo radiador no outro lado se requerido.

Durante o projeto básico terá um breve estudo de aerofólios traseiro e dianteiro e spoilers. O estudo dos assoalhos será dado através do estudo dos princípios de Venturi. Além de ter uma explicação de como se deve proceder nos ensaios em túnel de vento.

Para efeito de análise, foi feito um estudo preliminar do bico dianteiro do veículo fórmula SAE:



Figura 16 - Vista lateral da carenagem do veículo fórmula SAE



Figura 17 - Vista isométrica da carenagem do veículo formula SAE

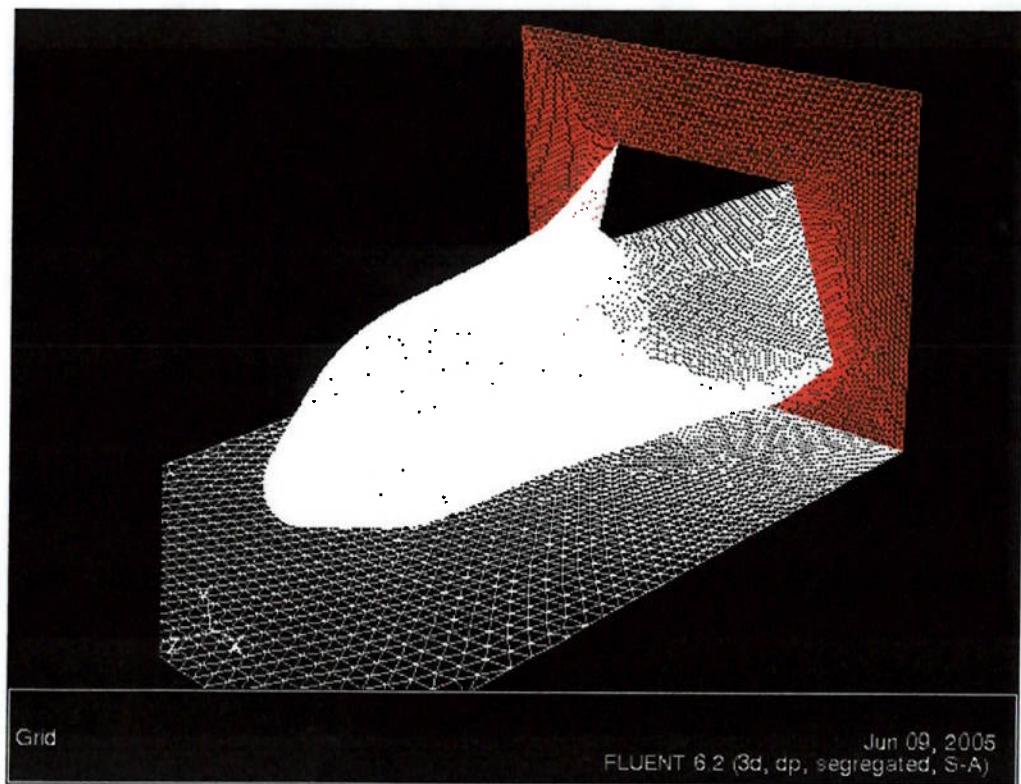


Figura 18 - Malha da carenagem do veículo formula SAE feita no Gambit

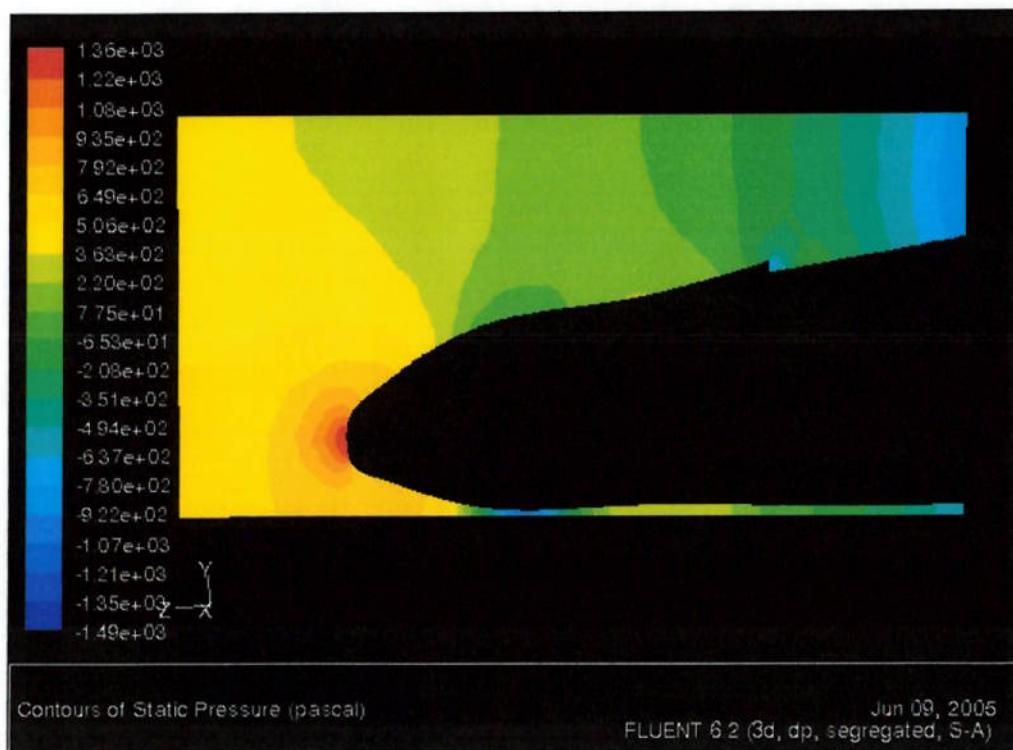


Figura 19 - Resultado de pressão no veículo formula SAE feita no Fluent

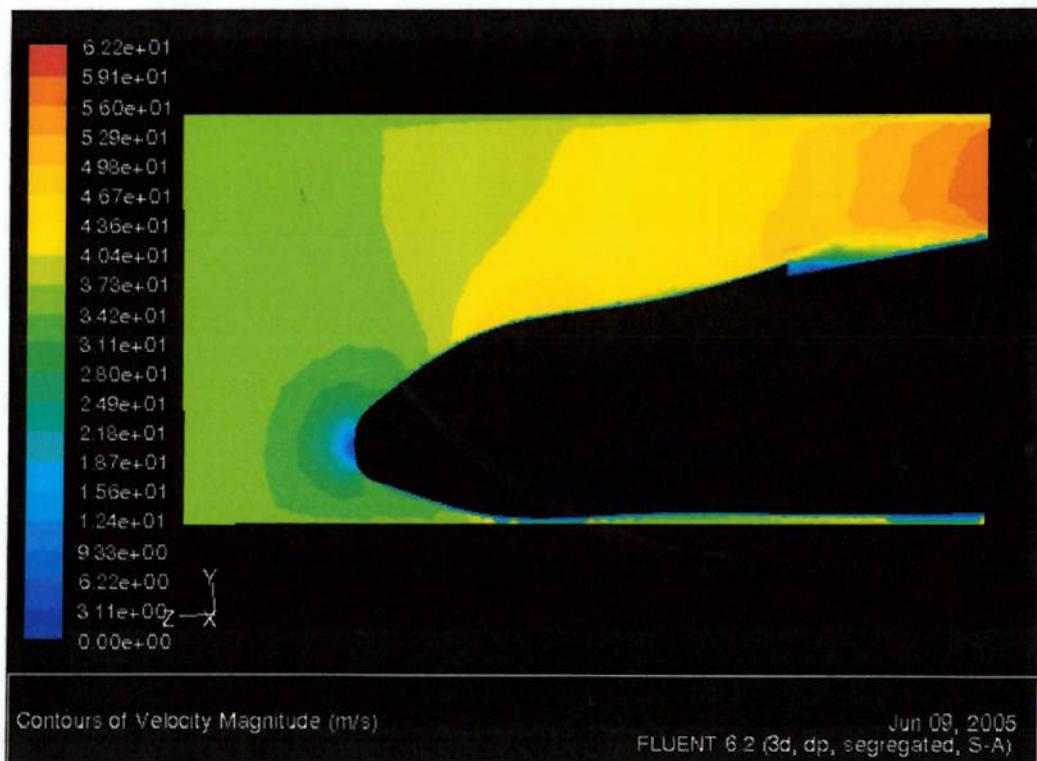


Figura 20 - Resultado de velocidade no contorno do veículo formula SAE feita no Fluent

Com isso obtêm-se dados preliminares de pressão e velocidade do escoamento ao redor da carenagem frontal possibilitando o cálculo da resistência aerodinâmica. Nota-se que a pressão máxima relativa no ponto crítico é da ordem de $1,3 \times 10^3$ Pa e a velocidade do escoamento próxima a posição da cabeça do piloto é aproximadamente 50m/s. Este valor é bastante elevado, portanto ainda são necessárias algumas iterações do processo para otimizar o desempenho final.

5. INFRA-ESTRUTURA NECESSÁRIA

5.1 Recrutamento, Seleção e Manutenção do Pessoal

Um dos métodos mais eficazes de recrutamento é a apresentação do próprio carro construído. Mas como isso ainda não é possível, uma outra maneira é através de cartazes espalhados pela faculdade. Eles têm por objetivo convidar as pessoas interessadas para uma reunião onde serão apresentados o projeto e a equipe. Neles, podem-se incluir informações dos responsáveis da equipe como nomes, telefones ou endereços eletrônicos. É importante que a equipe seja formada de veteranos e calouros, pois já é sabido que o conhecimento e as experiências da equipe precisam ser passados aos componentes mais novos para haver continuidade.

Outra oportunidade interessante para se recrutar pessoas acontece nas diversas atividades extracurriculares da faculdade, como o Mini-Baja, o Aerodesign, o carro solar, entre outros. Assim, consegue-se difundir o Fórmula SAE a estudantes de diversas áreas da engenharia. Isso é muito importante, quando se trata de um projeto tão complexo quanto o Fórmula SAE. Por exemplo, um projeto de telemetria é desenvolvido mais facilmente por um engenheiro elétrico, ou um projeto de uma caixa de câmbio por um engenheiro mecânico é mais adequado; assim é possível utilizar os recursos humanos da equipe de uma forma mais racional.

Deve-se ressaltar que todas as áreas são muito úteis, como os conhecimentos da engenharia da produção na otimização dos processos de manufatura ou os conhecimentos da engenharia de materiais no projeto em si. O recrutamento de veteranos é outro ponto importante. Devido à sua maior experiência, eles costumam ter um embasamento teórico maior, ter acesso a diversos meios de manufatura, tecnologias, contatos e outros recursos imprescindíveis à equipe. A relação entre a equipe e o seu orientador deve ser de extrema clareza, confiança e objetividade.

Uma vez que um grupo está formado, é necessário mantê-lo unido. Este é um dos trabalhos mais difíceis dos líderes, pois não importa o que se faça, sempre haverá problemas. O projeto é bastante exigente, portanto muitas pessoas não conseguem conciliar a vida acadêmica e a vida particular com o projeto por muito tempo.

Algumas pessoas desistem por não se sentirem bem, ou por não quererem maiores responsabilidades, ou não querem dispor de um tempo muito grande. As pessoas se sentem estimuladas realmente quando se começa a projetar e construir peças, enquanto isso, muitas pessoas desistem. Um método bastante útil de se manter as pessoas no grupo é dando a elas algumas experiências reais, onde eles precisam saber o que fazer e como agir. Todos devem saber que nos primeiros estágios da equipe o trabalho a ser feito é bastante chato e cansativo, e só fica interessante quando maiores responsabilidades e novos estágios são assumidos. E também que um comprometimento pessoal maior é exigido ao passar do tempo. Muitas horas semanais são exigidas. Uma questão importante, é que o projeto exige padrões de qualidade de um projeto real, e que será construído, ou seja, exigirá muito mais empenho de cada um, do que se está acostumado na faculdade.

Outra maneira de segurar o pessoal é divertindo-os. Uma boa maneira de começar o trabalho de uma equipe é mostrando realmente o que o carro pode fazer. Quando uma pessoa vê o carro andando e mostrando todo o seu potencial, ou ainda, sente o carro dirigindo-o, fica difícil de alguém desistir da equipe. E depois disso, todos ficam prontos para o trabalho e contentes com a equipe.

Um último método é um processo no grupo. Desde que se trata de um grupo voluntário, todos os membros precisam saber que suas idéias são levadas a sério. Deixar com que alguém se sinta ignorado desencoraja até os mais experientes. O líder deve cuidar para que apenas algumas pessoas dominem as discussões.

Por fim, é de vital importância para o sucesso do projeto que os líderes de cada subsistema sejam bastante empenhados e que sejam capazes de adquirir embasamento teórico necessário a sua responsabilidade. O responsável pelo chassis deve conhecer sobre estruturas. O do trem de força precisa conhecer sobre motores, fluidos, elementos de máquinas, transferência de calor, entre outros. A escolha de cada responsável deve levar em consideração a convivência entre os subordinados e o responsável. Conflitos pessoais entre o grupo são extremamente prejudiciais para a equipe como um todo.

Um fato que infelizmente atinge as equipes é que nem sempre os responsáveis estarão todo o tempo acessíveis a equipe, e que também, alguns

precisam deixar o projeto. Então é necessário que haja um plano de continuidade, ou seja, cada responsável tenha um possível sucessor, que conheça o projeto e a teoria necessária da sua parte. Essa pessoa deve trabalhar junto ao responsável, para conhecer as estratégias, os planos em geral e quais os próximos passos do subsistema.

5.2 Perfil da Equipe

Para uma competição de Fórmula SAE, uma grande rede de contatos e trabalhadores precisa ser criada, dentro e fora da universidade. Todos os envolvidos têm o seu mérito. Isso inclui estudantes, equipe de funcionários, orientadores, patrocinadores e pessoas de fora da faculdade.

Uma possível estrutura do pessoal da equipe é formada dividindo os cargos principais e escolhendo cada responsável de acordo com suas habilidades. Estes cargos são basicamente: o gerente de projeto, e os responsáveis pela estrutura, pelo sistema do motor, e suas possíveis subdivisões (refrigeração, admissão e exaustão, injeção e configuração do motor), pela suspensão, pela direção, pela transmissão, pelo freio, pela aerodinâmica e pelos testes.

Todos estes responsáveis devem estar cientes de que o projeto do Fórmula SAE exige do responsável, não apenas o desenvolvimento do projeto, mas a fabricação do subsistema e todas as iterações necessárias para sua otimização e a perfeita interação com os outros subsistemas. Além disso, deve se lembrar que é extremamente necessária a manutenção dos contatos que a equipe tenha, seja de patrocinadores, colaboradores ou qualquer tipo de contribuinte.

5.3 Patrocínio

O projeto de um Fórmula SAE é muito caro. Para a construção de carro, a partir do rascunho, são necessários aproximadamente R\$ 100.000,00 em dinheiro, para materiais e serviços. Este valor não será conseguido com doação dos integrantes, nem vendendo camisetas. E, portanto, uma forte campanha de arrecadação de patrocínios se faz necessária, mesmo antes do projeto começar.

O que geralmente acontece é que uma ou duas pessoas se responsabilizam por conseguir os patrocínios. Isso funciona, mas não é muito eficaz. Grandes oportunidades acabam escapando porque não há tempo suficiente para apenas uma pessoa se dedicar realmente à captação do patrocínio.

Um sistema de organização e divisão da carga de trabalho entre os componentes é necessário. A captação de recursos é um trabalho bastante árduo e muitas vezes não é valorizado pelos outros integrantes da equipe. Isso só se faz claro, quando cada um sente a dificuldade de se levantar dinheiro.

Patrocínio é doação de dinheiro, materiais, peças, serviços e conhecimentos técnicos para a equipe, logo para se obter êxito na busca destes, cada um deve desenvolver suas capacidades de persuasão e se tornar vendedores do produto Fórmula SAE, convencendo e conquistando todos que possam ajudar a equipe. Os patrocinadores procuram por algo que possa retornar suas doações, e portanto, cumprir com o que foi acordado mantém as relações e faz com que o patrocinador continue ajudando a equipe no futuro.

Vale ressaltar ainda, que estes contatos criados com a equipe podem se tornar grandes oportunidades de emprego e trabalhos interessantes para os integrantes.

O patrocínio mais comum é o de materiais e peças. Para estas indústrias é um bom negócio, já que os alunos da equipe, depois de se formarem, estarão tomando decisões nas empresas em que trabalham; a marca do patrocinador estará em sua mente e ele já estará familiarizado com o produto.

Para empresas lançando produtos novos, o Fórmula SAE também é um bom negócio, é uma boa vitrine. A competição está cheia de engenheiros, pesquisadores, empresários e outros cargos influentes. E também, os alunos têm a fama de utilizar

produtos existentes no mercado de formas diferentes e criativas, isso pode estimular o interesse de novos usos dos materiais ou peças dos patrocinadores.

Outro tipo de patrocínio difícil de se conseguir é de usinagem, soldagem ou pintura. A maioria das empresas e profissionais é muito ocupada e o tempo gasto com a equipe não é remunerado. Cabe a equipe convencê-los de que o projeto é interessante e a propaganda da feita no formula SAE será bastante rentável.

Sem dúvida, o tipo mais de difícil de se conseguir patrocínio é o de dinheiro. Pequenas empresas geralmente têm baixo capital de giro e não são capazes de contribuir. E empresas que têm dinheiro, são gerenciadas por consultores que dependem de autorizações superiores para autorizar a doação. Isso dificulta bastante. Ajuda da faculdade também é difícil, por se tratar de uma instituição pública sustentada basicamente pela sociedade. Existe uma burocracia que exige um empenho enorme da equipe, inclusive de um orientador influente na universidade.

Há alguns pontos mínimos necessários para o começo de uma campanha de arrecadação de patrocínios. Primeiro, deve-se criar o orçamento que realmente reflete os custos do projeto, incluindo taxas, transporte, comida, entre outros, além dos gastos com o projeto propriamente. A próxima coisa a fazer é conseguir fotos chamativas do carro, da equipe, das marcas dos patrocinadores, para divulgação. Como ainda não há um carro, é interessante um desenho dele em CAD. As empresas querem ver onde seu dinheiro está sendo gasto. O entusiasmo dos patrocinadores do projeto é imprescindível para contribuições futuras para a equipe e mesmo para possíveis ofertas de emprego aos membros da equipe. Um erro que não deve ser cometido e que é bastante frustrante para os patrocinadores é uma vez que a contribuição é feita, eles são esquecidos pela equipe até o próximo pedido. Isso definitivamente atrapalha as relações com o patrocinador. Uma outra possibilidade é a criação de um informativo da equipe a ser distribuído pela faculdade e para todos os patrocinadores e colaboradores. Este deve ser regular, ou seja, no mínimo trimestral. Deve, também, ser curto, pois as pessoas são ocupadas e têm muito o que ler. O informativo deve incluir atualizações do progresso do carro, anúncios de novos patrocinadores e eventos interessantes. O objetivo é manter o contato com eles durante o desenvolvimento do projeto e deixá-los envolvidos. Por fim, a criação de

uma página interessante na Internet, atualizada constantemente é bastante útil, pois faz com que as pessoas acessem-na freqüentemente.

Uma boa campanha de arrecadação de patrocínio exige tempo e prática. Geralmente quando alguém aprende realmente como isso é feito essa pessoa já está se formando e o conhecimento tende a se perder. A equipe deve ter veteranos e calouros envolvidos a cada ano, para que seja criado e mantido um conhecimento coletivo sobre os patrocinadores. É interessante que se organize detalhadamente quais empresas já foram contatadas, quem foi o contato em cada uma, com quem se falou dentro da empresa e quais resultados foram obtidos. Isso é bastante útil, para que a equipe no futuro não cometa mesmos erros. E também, outro erro grave é a insistência a cada ano numa mesma empresa, que não pode ou não quer contribuir. Isso atrapalha muito a imagem da equipe.

Tabela 2 – Cálculo estimado das horas demandadas

Fase	Média de horas semanais demandada pelo projeto	Duração no cronograma da Equipe POLI (semanas)
Pré-Projeto	15	4
Busca por colaboradores	30	6
Projeto Básico	50	14
Encomenda e aquisição dos componentes	20	4
Logística entre as empresas	5	8
Fabricação de componentes	20	4
Montagem dos componentes	30	1
Testes	30	3
Total de horas		1260

5.4 Ferramentas

A primeira ferramenta a ser observada como necessária para o projeto é um computador. Ele será útil para elaboração das planilhas e relatórios e para arquivar todo e qualquer documento a ser encontrado na rede. Deverão estar instalados softwares de edição de texto, para elaboração de planilhas, para navegação na Internet, softwares de CAD para desenho, e softwares de CAE para viabilizar a análise computacional estrutural por meio do método de elementos finitos (MEF) a ser posteriormente introduzido.

Outra ferramenta que se mostrará plenamente utilizada durante todo o projeto é uma linha telefônica, para permitir a aquisição de orçamentos, a logística entre as empresas colaboradoras e o contínuo contato com os integrantes mais importantes da equipe.

Com relação à construção e montagem do protótipo, o local físico deve dispor de ferramentas manuais, mesmo que a maior parte dos componentes seja manufaturada por terceiros. Indica-se que o local físico tenha além de ferramentas manuais como chaves de boca e fenda, alicates e martelos, ferramentas elétricas como furadeiras e esmeris. A equipe será mais bem sucedido se tiver acesso também a uma máquina de solda, uma fresa, um torno e outras máquinas de bancada.

5.5 Local Físico

A necessidade de um local físico se mostra importante desde as primeiras fases do projeto. Conforme visto no tópico anterior, o estabelecimento deve prover de um computador, um telefone, ferramentas, uma bancada para trabalho, pontos de energia elétrica (110 v, 220 v e um trifásico).

Como a Escola politécnica não está com um local disponível no momento, a solução seria o aluguel de um galpão, utilização de um dos galpões da escola junto ao prédio da veterinária ou a alocação próxima ao Laboratório de máquinas térmicas (antiga oficina do Mini-baja), a definição deste espaço é de vital importância para o desenvolvimento das atividades de todos os sistemas.

5.6 Testes

Uma vez o veículo construído e montado, este deve ser imediatamente testado para verificar se cada um dos diversos componentes nele presente se comporta conforme o projetado no veículo.

O próximo passo então é a realização dos testes dinâmicos, ao promover a rodagem do Fórmula SAE. Nesse ponto, não só o comportamento dinâmico será ensaiado em situação real como a interação dos sistemas com o resto do veículo, o que não apenas inclui a conexão com o resto, mas também as suas respostas às irregularidades do terreno sob atuação da suspensão.

O carro deve ser testado para verificação da velocidade final, da aceleração em trecho retilíneo e pavimentado, partindo da imobilização e percorrendo uma distância de 75 m, em todas as condições de pista. Lembrando que pela regra agentes para aumento de tração adicionados aos pneus não são permitidos. A mínima aceleração aceitável para pontuação corresponde ao tempo de 5,8 s, o que representa a velocidade média de 46,55 km/h. Deve ser testado também, o desempenho do veículo em curva de superfície plana e raio constante. O carro deverá percorrer uma trajetória de dois círculos de 15,25 m de diâmetro em uma faixa de 3 m de largura. Como a pontuação baseia-se na performance do veículo quanto à aceleração lateral, está deverá ser observada.

Tem-se ainda uma prova que destina-se a avaliação da dirigibilidade e conforto do veículo, combinando performance em aceleração, frenagem, direção e suspensão em um único evento. A velocidade média é entre 40 e 48 km/h em percurso de aproximadamente 805 m que inclui trecho retilíneo, curva de raio constante e variado, slalon e circuito misto. A pontuação é obtida em função do tempo decorrido no percurso.

Deve-se testar pilotos para as provas enduro e economia de combustível, estes são avaliados em um único evento. No enduro avalia-se o desempenho geral do veículo, confiabilidade e durabilidade. A velocidade média dos veículos é entre 48 e 57 km/h e máxima em torno de 105 km/h. O veículo deve percorrer 22 km no

círculo que inclui trechos retilíneos, curvas de raios constantes e variados, slalon e chicanes. A pontuação obtida é em função do tempo utilizado para completar a prova. A pontuação para a prova de consumo de combustível, conforme estabelecido no Regulamento, é função da média em km/l obtida na prova de enduro.

Todos esses testes demandam apenas de um espaço pavimentado marcado para medições conforme as regras da competição.

6. VIABILIDADE ECONÔMICA

Embora seja um trabalho voltado ao arquivamento do procedimento de um projeto, o produto final do projeto deve ser algo a ser realmente construído e, portanto a necessidade de sua comprovação financeira, até porque um dos objetivos deste trabalho é a construção de um protótipo Fórmula SAE.

Esse tópico visa estabelecer ao leitor um senso a respeito do custo de produção de um veículo Fórmula SAE e de como se espera viabilizá-la economicamente.

O primeiro passo é definir quais seriam as fontes de despesa do projeto, o que inclui matéria-prima, componentes e processos de fabricação, que estão listados a seguir. Fica aqui registrado que nem todas as despesas listadas são necessárias, pois o projeto inclui a possibilidade utilização de sistemas diferentes. Os valores estão dólares, devido a exigência da regra.

Tabela 3 – Custos gerais do protótipo

Item	Fabricante	Custo do Subsistema		Custo de Manufatura do subsistema	Subtotal	
		Material	Trabalho		Material	Trabalho
Motor		\$4.392,00	\$5,83	\$5,83	\$4.392,00	\$11,66
Transmissão		\$4.620,00	\$3.017,60	\$5,83	\$4.620,00	\$3.023,43
Homocinética		\$302,00	\$49,17	\$29,17	\$302,00	\$78,34
Pneus e Rodas		\$3.600,00	\$4,08	\$4,08	\$3.600,00	\$8,16
Direção		\$283,17	\$1.079,81	\$11,67	\$283,17	\$1.091,48
Suspensão		\$4.220,00	\$265,64	\$17,50	\$4.220,00	\$283,14
Estrutura		\$331,67	\$325,82		\$331,67	\$325,82
Foma		\$150,00	\$114,00	\$14,00	\$150,00	\$128,00
Freios		\$550,00	\$38,65	\$8,75	\$550,00	\$47,40
Equipamentos de segurança		\$171,83	\$2,92	\$2,92	\$171,83	\$5,84
Equipamentos Elétricos		\$20,60	\$5,93	\$5,83	\$20,60	\$11,76
Presilhas		\$55,44	\$0,00	\$2,33	\$55,44	\$2,33
Miscelânea		\$20,38	\$33,83	\$1,75	\$20,38	\$35,58
Total:		\$18.717,09	4.943,24	\$109,67	\$18.717,09	\$5.052,91

Custo Total do Veículo **\$23.770,00**

Tabela 4 – Custo do subsistema do motor

Item	Nome da peça	Comprada	Fabricada	Vendedor	Qtde.	Custo do	Custo de	Soma	Custo de Mão de	Total
						Material	Trabalho			
1	Motor Honda CBR 600 F4i	X		Cicloveco	1	\$3.000,00	\$0,00	\$3.000,00	\$0,00	\$3.000,00
2	Cabo do acelerador	X			2	\$1,00	\$0,00	\$2,00	\$0,00	\$2,00
3	Filtro de ar	X			2	\$15,00	\$0,00	\$30,00	\$0,00	\$30,00
4	Injectores	X			1	\$300,00	\$0,00	\$300,00	\$0,00	\$300,00
5	Filtro de óleo	X			2	\$30,00	\$0,00	\$60,00	\$0,00	\$60,00
6	Radiador	X			2	\$50,00	\$0,00	\$100,00	\$0,00	\$100,00
7	Diferencial	X			1	\$800,00	\$0,00	\$800,00	\$0,00	\$800,00
8	Tanque de combustível	X			2	\$50,00	\$0,00	\$100,00	\$0,00	\$100,00
Tempo de montagem do Subsistema						\$5,83	\$5,83			
Totais						\$4.392,00	\$0,00	\$4.392,00		
Total:										\$4.397,83

Tabela 5 - Custo do subsistema da transmissão

Item	Nome da peça	Comprada		Vendedor	Qtd.	Custo do Material	Custo de Trabalho	Soma	Custo de Mão de obra	Total
		X	Fabricada							
1	Caixa de Transmissão	X			1	\$4.000,00	\$3.000,00	\$4.000,00	\$3.000,00	\$7.000,00
2	Trambulador	X			1	\$20,00	\$11,77	\$20,00	\$11,77	\$31,77
3	Câmbio de moto	X	Quality Drive Systems		1	\$600,00	\$0,00	\$600,00	\$0,00	\$600,00

Tempo de montagem do Subsistema **0,2** Custo de montagem do subsistema

1074

Total:

\$7.637,60

Tabela 6 – Custo do transmissor de torque para as rodas

Item	Nome da peça	Comprada		Vendedor	Qtde.	Custo do	Custo de	Soma	Custo de Mão de	Total
						Material	Trabalho			
1	Luva da homocinética	X	X		2	\$1,00	\$10,00	\$2,00	\$20,00	\$22,00
2	Semi-Eixo Homocinético	X		Butignoli Auto Peças	2	\$150,00		\$300,00	\$0,00	\$300,00
Total:						\$29,17	\$29,17			
Total:						\$302,00	\$20,00	\$322,00		
									\$322,00	

Tempo de montagem do Subsistema **0,83** Custo de montagem do subsistema
Totais

Tabela 7 - Custo das rodas e pneus

Item	Nome da peça	Comprada	Fabricada	Vendedor	Qtd.	Custo do Material	Custo de Trabalho	Soma	Custo de Mão de obra	Total
1	Roda 10"x5" (Douglas Wheels 190 - Alum.)	X		Quality Drive Systems	8	\$250,00	\$0,00	\$2.000,00	\$0,00	\$2.000,00
2	Pneu ATC Tire 21"x7"x10" - Modelo Front	X		Quality Drive Systems	8	\$200,00	\$0,00	\$1.600,00	\$0,00	\$1.600,00
Total:									\$4,08	\$4,08
Total:									\$3.600,00	\$3.600,00
Total:									\$3.604,08	\$3.604,08

Tempo de montagem do Subsistema

0,1 Custo de montagem do subsistema

Totais

Tabela 8 - Custo do subsistema da direção

Item	Nome da peça	Comprada	Fabricada	Vendedor	Qtd.	Custo do	Custo de	Soma	Custo de Mão de	Total
						Material	Trabalho			
1	Pintão	X			2	\$20,00	\$200,00	\$40,00	\$400,00	\$440,00
2	Cremalheira	X			2	\$20,00	\$300,00	\$40,00	\$600,00	\$640,00
3	Caixa de direção	X			1	\$20,00	\$20,00	\$20,00	\$20,00	\$40,00
4	Bama de direção	X			2	\$10,00	\$5,83	\$20,00	\$11,66	\$31,66
5	Ponta de eixo	X			2	\$5,00	\$17,50	\$10,00	\$35,00	\$45,00
6	Coluna de direção	X			1	\$0,03	\$1,48	\$0,03	\$1,48	\$1,51
7	Volante	X		Comet Kart Sales	1	\$40,00	\$0,00	\$40,00	\$0,00	\$40,00
8	Terminal rotular	X		Copalto Auto Peças	8	\$7,33	\$0,00	\$58,67	\$0,00	\$58,67
9	Rolamento (cubo dianteiro)	X	Inusa Rolamentos Ltda.		8	\$6,81	\$0,00	\$54,48	\$0,00	\$54,48

Tempo de montagem do Subsistema 0,33 Custo de montagem do subsistema

Totais

		\$11,67	\$11,67
		\$283,18	\$1.068,14
Total:			\$1.362,99

Tabela 10 – Custo do subsistema da estrutura

Item	Nome da peça	Comprada	Fabricada	Vendedor	Qtd.	Custo do	Custo de	Soma	Custo de Mão de	Total
						Material	Trabalho			
1	Chassi	X			1	\$250,00	\$300,00	\$250,00	\$300,00	\$550,00
2	Corta-fogo	X			1	\$20,00	\$1,80	\$20,00	\$1,80	\$21,80
3	Garfo (clevis)	X			20	\$1,00	\$1,00	\$20,00	\$20,00	\$40,00
4	Assoalho	X			1	\$25,00	\$1,10	\$25,00	\$1,10	\$26,10
5	Assento Injetado	X	Bancar Indústria e Comércio Ltda.		1	\$8,33	\$0,00	\$8,33	\$0,00	\$8,33
6	Encosto Injetado	X	Bancar Indústria e Comércio Ltda.		1	\$8,33	\$0,00	\$8,33	\$0,00	\$8,33

Tempo de montagem do Subsistema 0,08

Totais

Custo de montagem do subsistema

Total:	\$2,92	\$2,92
	\$331,67	\$22,90

\$657,49

Tabela 11 – Custo do subsistema de miscelânea

Item	Nome da peça	Comprada Fabricada X	Vendedor	Qtd.	Custo do Material	Custo de Trabalho	Soma	Custo de Mão de obra	Total
					\$150,00	\$100,00	\$150,00	\$100,00	\$250,00
Tempo de montagem do Subsistema	0,4								
Totais					\$150,00	\$100,00	\$250,00	\$14,00	\$264,00

Total:**\$264,00**

Tabela 12 – Custo do subsistema dos freios

Item	Nome da peça	Comprada		Vendedor	Qtde.	Custo do Material	Custo de Trabalho	Soma	Custo de Mão de obra	Total
		Fabricada								
1	Pedal	X			2	\$5,00	\$5,00	\$10,00	\$10,00	\$20,00
2	Disco de freio	X			4	\$5,00	\$5,00	\$20,00	\$20,00	\$40,00
3	Pinça de freio	X		Locomotora Peças e Serviços	4	\$70,00	\$0,00	\$280,00	\$0,00	\$280,00
4	Cilindro Mestre	X		Sidarta Auto Peças Ltda.	1	\$150,00	\$0,00	\$150,00	\$0,00	\$150,00
5	Mangueira (Aeroquip) 2m	X		Limarco Comercial Ltda.	2	\$26,67	\$0,00	\$53,33	\$0,00	\$53,33
6	Mangueira (Aeroquip) 1m	X		Limarco Comercial Ltda.	2	\$18,33	\$0,00	\$36,67	\$0,00	\$36,67

Totais	tempo de montagem do Subsistema	0,25	Custo de montagem do subsistema
---------------	---------------------------------	------	---------------------------------

Tot

\$588,75

Tabela 13 – Custo dos equipamentos de segurança

Item	Nome da peça	Comprada	Fabricada	Vendedor	Qtd.	Custo do	Custo de	Soma	Custo de Mão de	Total
						Material	Trabalho			
1	Restriktores de braço	X		Desert Karts	1	\$50,00	\$0,00	\$50,00	\$0,00	\$50,00
2	Extintor	X		Centro Automotivo Nogueira Rabaneda	1	\$2,67	\$0,00	\$2,67	\$0,00	\$2,67
3	Cinto de segurança	X		Spa Turbo Ltda.	1	\$106,67	\$0,00	\$106,67	\$0,00	\$106,67
4	Material resiliente	X		Casa & Construção	5	\$2,50	\$0,00	\$12,50	\$0,00	\$12,50
Tempo de montagem do Subsistema									\$2,92	\$2,92
Totais									\$171,83	\$0,00
Total:										\$174,75

Tabela 14 – Custo da parte elétrica

Item	Nome da peça	Comprada	Fabricada	Vendedor	Qtd.	Custo do Material	Custo de Trabalho	Soma	Custo de Mão de obra	Total
1	Botão interruptor	X	Osnil Elétrica	Premier Eletrô-Eletrônica Ltda.	1	\$1,33	\$0,00	\$1,33	\$0,00	\$1,33
2	Botão interruptor (push-button)	X		Acessórios Car	1	\$4,97	\$0,00	\$4,97	\$0,00	\$4,97
3	Brake light	X		Gulaplus Shop	2	\$4,30	\$0,00	\$8,60	\$0,00	\$8,60
4	Pilhas Recarregáveis (pacote c/ 4)	X			1	\$5,00	\$0,00	\$5,00	\$0,00	\$5,00
5	Fios	X	Osnil Elétrica		7	\$0,10	\$0,00	\$0,70	\$0,00	\$0,70

Tempo de montagem do Subsistema 0,17 Custo de montagem do subsistema

Totais

		\$5,83	\$5,83
		\$20,60	\$0,00
Total:		\$26,43	

Tabela 15 - Custo dos elementos de fixação

Item	Nome da peça	Comprada		Qtde.	Custo do Material	Custo de Trabalho	Soma	Custo de Mão de obra	Total
		Fabricada	Vendedor						
1	Parafuso M8 30mm	X	MecFer	30	\$0,17	\$0,00	\$5,10		\$5,10
2	Parafuso M8 40mm	X	MecFer	30	\$0,20	\$0,00	\$6,00		\$6,00
3	Parafuso M8 80mm	X	MecFer	10	\$0,25	\$0,00	\$2,50		\$2,50
4	Parafuso M8 160mm	X	MecFer	10	\$0,34	\$0,00	\$3,40		\$3,40
5	Parafuso M10 70mm	X	MecFer	24	\$0,26	\$0,00	\$6,24		\$6,24
6	Parafuso M12 60mm	X	MecFer	10	\$0,27	\$0,00	\$2,70		\$2,70
7	Parafuso M12 120mm	X	MecFer	2	\$0,30	\$0,00	\$0,60		\$0,60
8	Parafuso M6 30mm	X	MecFer	10	\$0,08	\$0,00	\$0,80		\$0,80
9	Porcas M8 com trava	X	MecFer	40	\$0,17	\$0,00	\$6,80		\$6,80
10	Porcas M10 com trava	X	MecFer	10	\$0,20	\$0,00	\$2,00		\$2,00
11	Porcas M12 com trava	X	MecFer	10	\$0,23	\$0,00	\$2,30		\$2,30
12	Porcas M6 com trava	X	MecFer	10	\$0,14	\$0,00	\$1,40		\$1,40
13	Porca M20 com trava	X	MecFer	8	\$0,34	\$0,00	\$2,72		\$2,72
14	Armela M8	X	MecFer	60	\$0,03	\$0,00	\$1,80		\$1,80
15	Armela M10	X	MecFer	80	\$0,07	\$0,00	\$5,60		\$5,60
16	Armela M12	X	MecFer	12	\$0,07	\$0,00	\$0,84		\$0,84
17	Armela M6	X	MecFer	12	\$0,03	\$0,00	\$0,36		\$0,36
18	Cinta plástica	X	Casa Monções	100	\$0,01	\$0,00	\$1,30		\$1,30
19	Rabites	X	Casa Monções	20	\$0,03	\$0,00	\$0,60		\$0,60
20	Velcro (em metros)	X	Casa Monções	2	\$0,34	\$0,00	\$0,68		\$0,68
21	Abracadeira	X	Casa Monções	2	\$0,00	\$0,34			\$0,34

Tempo de montagem do Subsistema
Totais

0 Custo de montagem do subsistema

Total:	\$54,08	\$0,00	\$54,08

Tabela 16 - Custo do acabamento

Processos de Fabricação

Aqui, serão descritos quaisquer processos necessários para transformar a matéria-prima nos componentes projetados.

- Usinagem em torno;
- Usinagem em fresa;
- Usinagem em furadeira;
- Usinagem de corte
- Dobra de chapas
- Soldagem
- Fundição
- Prototipagem
- Corte e retífica de dentes de engrenagem

Listadas todas as fontes de despesa, o cabe agora identificar como o projeto pode-se tornar economicamente viável.

Primeiramente, é interessante citar quais e como os contatos que a facilitam a execução.

Uma das características das competições da SAE Brasil é também desenvolver o lado administrativo dos participantes, pois as equipes precisam de dinheiro e materiais para a construção de seus protótipos, assim cada equipe procura antes da competição empresas ou pessoas que estejam dispostas a colaborar com os projetos.

A Escola Politécnica da USP terá que dar o apoio à equipe e ceder algum espaço para Equipe Fórmula SAE – POLI USP, mas não necessariamente esta irá prover uma quantidade de dinheiro suficiente para cobrir todos os gastos de uma equipe. Os recursos necessários para uma boa competição são dinheiro e materiais. Os materiais, por exemplo, são jogos de pneus, jogo de aros, placas e tubos de aço, componentes da fibra de vidro, amortecedores, molas, pastilhas de freios, volantes, bancos, manoplas, instrumentos de medição, capacetes, protetores de ouvido, rádio

transmissores, vestuário (camisas e roupa do piloto), ferramentas de trabalho, entre outros.

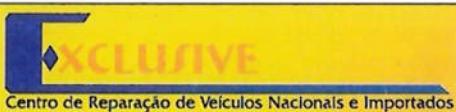
A divulgação dos parceiros da equipe POLI USP serão realizados através de encontros de estudantes, feiras tecnológicas, feiras regionais, congressos, entrevistas e artigos em jornais, revistas, programas de televisão (ênfase), adesivos no carro, camisas personalizados, além de eventos promovidos pela USP e por outras universidades, exposições como Congresso SAE e Feira da Mecânica, em campeonatos automobilísticos que regularmente ocorrem tanto no cartódromo, quanto no Autódromo de Interlagos – São Paulo durante a competição, diante de um seletivo grupo de empresas e engenheiros de todo o território nacional.

A Equipe Fórmula SAE está atrás de patrocinadores que vêm essa iniciativa como um bom uso de seu dinheiro. Nossa proposta é expor o projeto nesses locais e armar um stand de informações, a fim de divulgar os parceiros, o projeto, a competição e a USP, tendo em vista que um grande público freqüenta estes locais, o que torna bastante interessante essa divulgação tanto para a empresa apoiadora quanto para a universidade, trazendo um retorno visível do investimento em forma de propaganda e marketing.

É importante salientar que a parceria será não apenas durante a construção do carro ou durante o evento, mas sim durante todo o ano envolvendo desde o projeto inicial até as exposições descritas acima, onde sempre comparece uma grande quantidade de pessoas além de engenheiros e diretores de grandes empresas brasileiras e mundiais, o que proporciona um retorno durante um longo período com um investimento relativamente baixo.

Tabela 17 – Empresas patrocinadoras do projeto

Produto / Serviço	Empresa
Usinagem	 IFER Industrial Ltda.
Corte e retífica de dentes das engrenagens	 Fresadora SANTANA INDÚSTRIA DE ENGRANAGENS Fresadora Santana Ltda.
Fundição	 FUNDEX Metalúrgica Metalúrgica Fundex Ltda
Rolamentos	 NSK Brasil Ltda
Prototipagem	 Modelação Anselmo & Gritti Ltda
Porcas	 PARLOCK Indústria e Comércio Ltda. Parlock Indústria e Comércio Ltda
Molas para o amortecedor	 AFFINIA
Alumínio	 JMB ZEPPELIN bulk handling solutions
Chapas e tarugos de aço e alumínio	 CBC Indústrias Pesadas S.A.

Engrenagens	
Testes em dinamômetros	
Tintas automotivas	
Molas	
Amortecedor	
Tubos de precisão	
Consultoria técnica	
Bancos e estofados	
Motor	 Honda

Dos processos de fabricação, o único restante é o de soldagem, cuja realização é da própria equipe.

7. O PRÉ-PROJETO

Depois de realizado o estudo de viabilidade e tendo sido comprovado prosseguimento do projeto, a próxima fase é conhecida como pré-projeto ou anteprojeto.

O objetivo do pré-projeto é chegar a uma solução prévia a respeito das definições mais básicas do projeto como um todo. Essa é a etapa em que se deve consultar o máximo de referências bibliográficas, as opiniões de diversos especialistas e a etapa em que a criatividade tem grande contribuição.

O resultado dela são croquis e desenhos do subsistema assim como coletâneas de tabelas e gráficos e mesmo alguns esboços de cálculos. Na prática, eles representam propostas para o formato da caixa para o número de estágios e velocidades, e para a alocação da caixa na estrutura. A idéia é que o procedimento de projeto proposto nesse trabalho venha a verificar as condições levantadas numa fase tão criativa.

No entanto, mesmo sendo definições iniciais e grosseiras, elas devem ter parâmetros restritivos de modo a serem geradas idéias que funcionem em perfeita harmonia com as metas da equipe, com os demais subsistemas do veículo. Esses parâmetros iniciais estarão definidos ao fim desse capítulo.

7.1. Metas da equipe

As metas são o primeiro passo no projeto do Mini Baja. Numa reunião extensa, é feito um balanço dos problemas ocorrentes e traçados objetivos que o carro como um todo deve cumprir, ou seja, objetivos que também determinam o futuro dos subsistemas.

Há basicamente três tópicos definidos pela equipe que influenciam diretamente no projeto. O primeiro deles refere-se aos resultados que o veículo deve apresentar nas provas dinâmicas particularmente e no enduro. As provas dinâmicas têm enfoques diferentes entre si e podem demandar maior velocidade, maior aceleração ou demonstração de força.

Colocar metas para cada prova envolve consequências para cada um dos subsistemas. O segundo ponto a ser avaliado é a massa admissível do veículo e de cada subsistema. Esse critério impulsionará o projetista a dimensionar cada componente dos subsistemas para otimizar o projeto de forma a atender tal restrição. Por fim, mas não menos importante que os parâmetros já discutidos, há entre a equipe um consenso baseado na situação financeira para encaminhar recursos para cada parte do veículo. De posse desse valor, é possível ter em mãos dados mais concretos a respeito dos materiais e dos processos de fabricação que estarão à disposição.

8. A COMPETIÇÃO

A competição é dividida em provas estáticas e provas dinâmicas. Cada uma delas é apresentada abaixo:

8.1. Provas Estáticas

Inspeção técnica: os competidores deverão respeitar local e horário pré-definidos para realização das provas. As provas estáticas são iniciadas com a inspeção técnica e de segurança para verificação do atendimento de todos os requisitos da FSAE, incluindo equipamentos de segurança do piloto. Caso algum item não seja atendido, o veículo deverá ser re-trabalhado para obter a aprovação na re-inspeção, necessária para continuidade do veículo na competição.

Avaliação de custos e manufatura: o evento consiste na avaliação do relatório de custos e viabilidade de manufatura, considerando-se a acuracidade na estimativa para fabricação de 4 veículos por dia, e não somente o custo do veículo.

Apresentação: a prova avalia a capacidade da equipe em apresentar o conceito do projeto e o poder de convencimento da qualidade do veículo. Fazem parte da avaliação a organização do grupo e a entrega da apresentação. Membros da equipe terão 10 minutos para explanação sem interrupções. No final, 5 minutos serão dedicados à perguntas e repostas. Somente os juízes terão direito à questionamentos. Nesta prova o veículo não é avaliado.

Projeto: avaliação da conceituação do veículo, emprego de novas tecnologias, intenção de mercado, inovações, qualidade do projeto e esforço empregado pela equipe. O evento inicia-se com a avaliação do relatório de projeto, que não deve exceder 8 páginas, sendo 4 páginas de texto, 3 páginas de desenhos e uma página opcional, definida pela equipe, podendo conter gráficos, fotos, etc. O relatório deve conter uma descrição breve do veículo, contendo discussão sobre pontos importantes do projeto, análises e testes (FEA, teste em dinamômetro, etc.). A pontuação é dada em função das respostas das questões colocadas durante a

avaliação. O veículo pode ser apresentado na avaliação do projeto sem ter passado pela inspeção técnica e de segurança.

8.2. Provas Dinâmicas

Aceleração: avaliação da aceleração do veículo em trecho retilíneo e pavimentado, partindo da imobilização e percorrendo uma distância de 75 m. São possíveis duas tomadas. Agentes para aumento de tração adicionados aos pneus não são permitidos. A mínima aceleração aceitável para pontuação corresponde ao tempo de 5,8 s, o que representa a velocidade média de 46,55 km/h. Os veículos que completarem o percurso, porém, com performance inferior terão 3,5 pontos. Caso o veículo não complete o percurso a pontuação é zero.

Skid Pad: o objetivo da prova é avaliar o desempenho do veículo em curva de superfície plana e raio constante. O carro deverá percorrer uma trajetória de dois círculos (figura 8) de 15,25 m de diâmetro em uma faixa de 3 m de largura. A pontuação baseia-se na performance do veículo quanto à aceleração lateral. As equipes poderão fazer duas tomadas e refazê-las com outro piloto.

Autocross: a prova destina-se a avaliação da dirigibilidade e conforto do veículo, combinando performance em aceleração, frenagem, direção e suspensão em um único evento. A velocidade média é entre 40 e 48 km/h em percurso de aproximadamente 805 m que inclui trecho retilíneo, curva de raio constante e variado, slalon e circuito misto. A pontuação é obtida em função do tempo decorrido no percurso.

Enduro e Economia de Combustível: o enduro e economia de combustível são avaliados em um único evento. No enduro avalia-se o desempenho geral do veículo, confiabilidade e durabilidade. A velocidade média é entre 48 e 57 km/h e máxima em torno de 105 km/h. O veículo deve percorrer 22 km no circuito que inclui trechos retilíneos, curvas de raios constantes e variados, slalon e chicanes. A pontuação obtida é em função do tempo utilizado para completar a prova.

A pontuação para a prova de consumo de combustível, conforme estabelecido no Regulamento, é função da média em km/l obtida na prova de enduro.

9. PARÂMETROS DO VEÍCULO

Nesse tópico, devem ser discutidas quais as definições dos demais subsistemas que podem vir a criar restrições no projeto em questão, e que, portanto, devem ser cautelosamente verificadas antes e durante o projeto básico.

Uma das mais importantes questões a esse ponto é a definição da altura livre do solo, ou seja, a distância do ponto mais baixo do Formula SAE até o piso. Ela é diretamente influenciada pelas características da suspensão traseira, seja pela rigidez da mola como pelo curso em “bump”, que representa a situação de queda após um salto.

Nesse momento, é importante estar consciente da seleção da conexão entre a saída da caixa e as rodas. Caso seja escolhido um semi-eixo homocinético ou um eixo cardã, deve-se respeitar o ângulo de trabalho especificado pelo fabricante. Além de escolher o tipo de diferencial a ser usado no eixo traseiro.

Para as mesmas considerações, falta ainda ter em mãos um valor aproximado da bitola traseira. Esse valor será obtido em conjunto com os subsistemas da suspensão e da direção.

O sistema de freios é analisado para respeitar as regras da competição e dar a opção de mais ousadia ao piloto que poderá acionar o subsistema em situações extremas. Por fim, há também a necessidade do conhecimento do raio externo do conjunto roda-pneu a ser utilizado e do mecanismo de mudança de marcha a ser acoplado na caixa de transmissão.

Cabe aqui observar que todos esses dados são discutidos pelos responsáveis por cada subsistema de forma a encontrar uma solução ideal para o carro como um todo. Portanto, as definições básicas ocorrem de modo iterativo e podem ocorrer em um longo processo de forma que mesmo durante o projeto básico deve-se rever cada passo adotado.

Dimensões	Dianteira	Traseira
Comprimento, Largura, Altura	2815mm, 1310mm, 1025mm	
Entre eixos	1540mm	
Bitola	1200mm	1100mm
Peso com piloto de 68kg	120kg	110kg

Parâmetros de suspensão	Dianteira	Traseira
Tipo de suspensão	Suspensão duplo-A com braços desiguais	Suspensão duplo-A com braços desiguais
Dimensões do pneu	450x170-10 P68 Dunlop	450x170-10 P68 Dunlop
Rodas	3-peças Keizer Alumínio 10" x 6.5" - 46mm offset	3-peças Keizer Alumínio 10" x 6.5" - 46mm offset
Altura livre do solo (chassis até o solo)	65mm	40mm
Altura do centro de gravidade	300mm	
Curso da suspensão	31mm bump / 21mm rebound	18mm bump / 23mm rebound
Freqüência natural da massa suspensa (na direção vertical)	2.5 Hz	2.9 Hz
Cambagem estática	-0.5°	-0.6°
Ângulo de Caster	5.0°	-
Eixo Kingpin dianteiro	3.5°	-
Akerman estático	150% Ackerman	-
Anti dive / Anti Squat	7%	0%

Sistema de freio	Dianteira	Traseira
Disco	Disco de aço 250, 190mm diâmetro.	Disco de aço 250, 190mm diâmetro.
Cilindro mestre	Cilindro mestre de alumínio com acionamento mecânico	

Ergonomia	
Ajuste do tamanho do piloto	Assento e volante fixos. Ajuste dos pedais de no máximo 250mm.
Assento (materiais)	Fibra de vidro
Visibilidade do piloto (ângulo de visão lateral, espelhos)	200° visibilidade lateral, visão traseira por espelhos nas laterais do habitáculo
Acionador da embreagem	Alavanca manual acionada pelas mãos na lateral do piloto
Instrumentação	Tacômetro padrão com indicadores de deslocamento, Medidor de temperatura padrão. E Controles padrões do motor.

Estrutura	
Material	Aço liga
Método de soldagem	MIG
Parâmetros do motor	
Fabricante e modelo	2001 Honda CBR 600 F4i
Cilindrada	599cm ³
Tipo de combustível	Gasolina
Admissão	Aspirado
Rotação de potência máxima	10000 rpm
Rotação de torque máximo	7200 rpm
Rotação mínima para 80% do torque máximo	6600 rpm
Comprimento efetivo do duto de admissão	150mm
Comprimento efetivo do duto de exaustão	500 mm
Escapamento	4-1
Taxa de compressão	12.5:1
Tempo de ignição	Programável digitalmente pelo sistema de controle do motor
Sistema de refrigeração e localização	Radiador localizado lateralmente com uma ventoinha controlada pelo controle do motor
Parâmetros da transmissão	
Tipo de transmissão	Corrente, 525XSO ou 520GXW
Tipo de diferencial	Zexel Torsen. Redução 2.6:1
Taxa de redução final	6ª marcha - 2.875:1
Velocidade do veículo @ rotação de potência máxima	
1ª	55 km/h
2ª	75 km/h
3ª	94 km/h
4ª	109 km/h
5ª	122 km/h
6ª	132 km/h
Configurações do semi-eixo	Aço SAE 4140, comprimento = 240.6mm
Junta homocinética	Tripóide com tulipa de alumínio

10. PROJETO DA DIREÇÃO

10.1 Objetivos do projeto da direção

O capítulo a seguir desenvolve o projeto do sistema de direção do primeiro veículo para competição Fórmula SAE construído na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Inclui, também, uma descrição dos processos de fabricação adotados para cada parte do sistema de direção e as constantes do projeto. Cada sub-capítulo, a seguir, trata do projeto e seus componentes, além da integração de todas as partes.

10.2 Restrições da regra

A regra do Fórmula SAE diz que:

- O sistema de direção deve atuar em pelo menos 2 rodas.
- O sistema de direção deve ter batentes positivos para prevenir o travamento do mecanismo. Os batentes devem estar localizados acima ou na cremalheira para prevenir as rodas de tocar a suspensão, o chassis, e o piloto em todas as provas do evento.
- O sistema de direção deve funcionar livremente por no mínimo 7° total medidos na roda de direção.
- Direção nas rodas traseiras é permitida apenas se batentes mecânicos limitarem o ângulo das rodas traseiras a $\pm 3^\circ$ da posição de linha reta
- As rodas de direção devem estar mecanicamente conectadas às rodas dianteiras, isto é, “steer-by-wire” (direção por fios) das rodas dianteiras é proibido.

10.3 Embasamento teórico

Será apresentada uma revisão da atual situação dos sistemas de direção, para que se possa tomar a decisão do tipo de sistema de direção que será usado no veículo.

10.3.1. Modelo de direção – plataforma de direção

Até o começo do século XX, a maioria dos carros possuía o centro de massa concentrado acima do eixo traseiro. Portanto, a direção era feita basicamente pivotando o eixo dianteiro inteiro sobre um ponto, como uma carroça. A figura 21 ilustra o modelo, que é bastante utilizado em carrinhos de rolimã.

Este tipo de sistema é chamado de plataforma de direção, porque requer uma grande base para fazer o eixo girar. Ele consegue criar um centro de rotação real em todas as posições, desconsiderando os ângulos de deriva. Um dos pontos negativos, é que este mecanismo gera um grande momento no pivô central, que exige componentes mais robustos, para suportar os esforços. E, além disso, ela ocupa muito espaço no chassis, diminuindo o espaço para o piloto e aumentando o peso total do veículo.

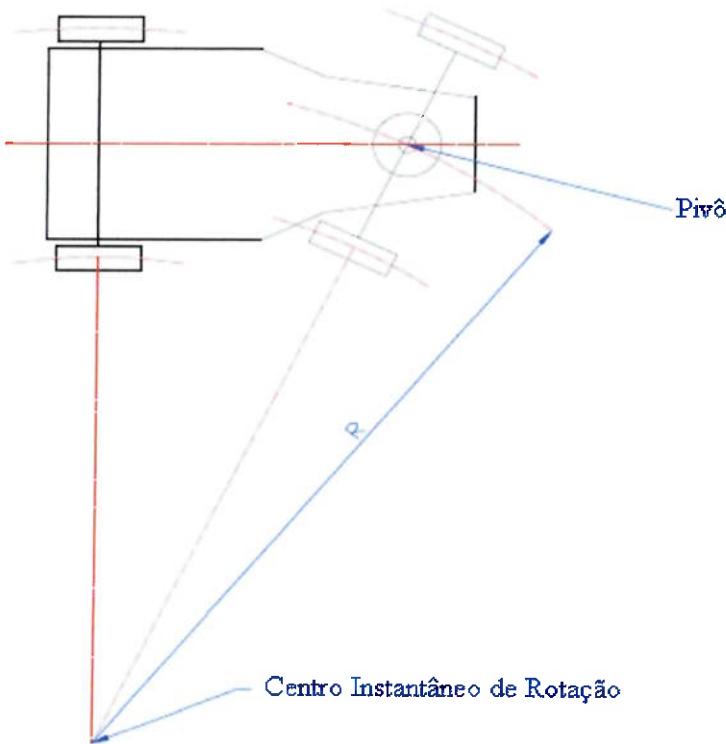


Figura 21 - Modelo de carroça

10.3.2. Geometria de Ackerman

Quando os motores foram posicionados na dianteira do veículo e as velocidades cresceram, o sistema mostrado no capítulo 10.3.1 deixou de ser eficaz e sistemas mais complexos tiveram de ser introduzidos para proporcionar melhor estabilidade, melhor dirigibilidade e otimizar o espaço dentro do veículo.

Para se conseguir um centro real de rotação, a roda interna a uma curva deve girar um ângulo maior que a externa, porque a roda interna segue um raio menor. E ainda, os eixos de rolamento de cada uma das rodas devem se cruzar num ponto comum ao eixo de rolamento traseiro. Isso significa que quanto mais fechada é a curva, este ponto de intersecção é mais próximo da lateral do veículo. Este ponto é o centro de rotação, por onde o veículo está girando. Este é o princípio de Ackerman.

Rudolph Ackerman patenteou um mecanismo de direção com 2 pivôs em 1817 para carroças. A patente original fazia com que os eixos de rolamento da rodas

da direção fossem paralelos, formando um retângulo quando as rodas estavam em linha reta. Nesta configuração, as duas rodas giravam exatamente o mesmo ângulo, conforme a figura 24. Ela não conseguia produzir um centro real de rotação, exceto quando o veículo se movia em linha reta.

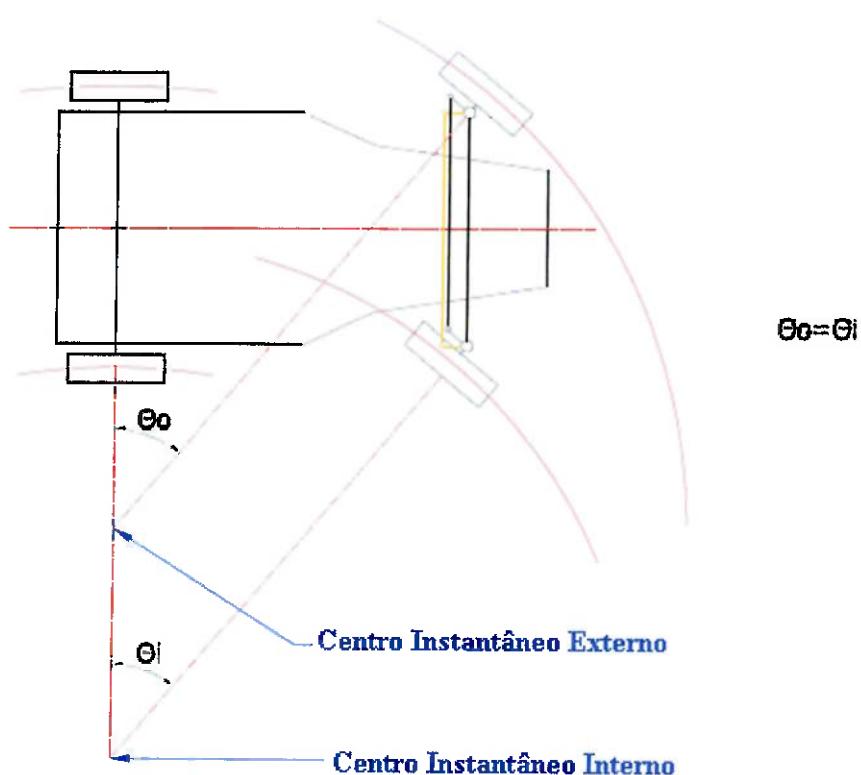


Figura 22 - Braços paralelos que produzem um centro real de rotação apenas em linha reta.

Uma modificação no mecanismo de Ackerman foi introduzida em 1878 por Charles Jeantaud para inclinar os braços de acionamento, a fim de fazer com que as linhas de rolamento das rodas dianteiras converjam e se intersectem perto do eixo traseiro. Este mecanismo forma um trapézio quando as rodas estão em linha reta e permite que a roda interna gire um ângulo maior que as rodas externas. Conforme mostrado nas figuras 25 e 26.

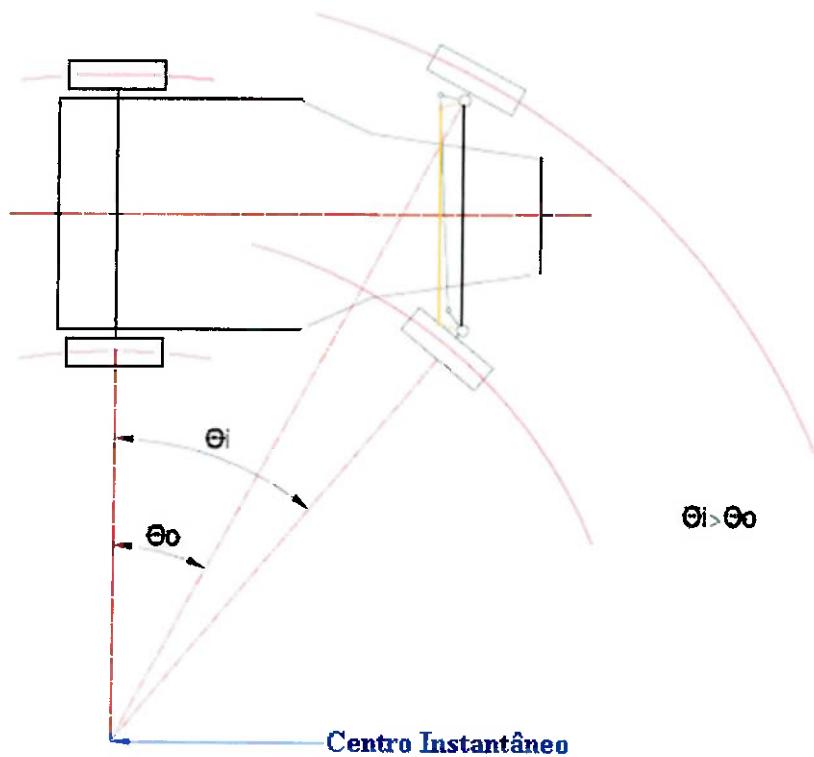


Figura 23 – Braços de açãoamento inclinados dando centro real de rotação em 3 posições

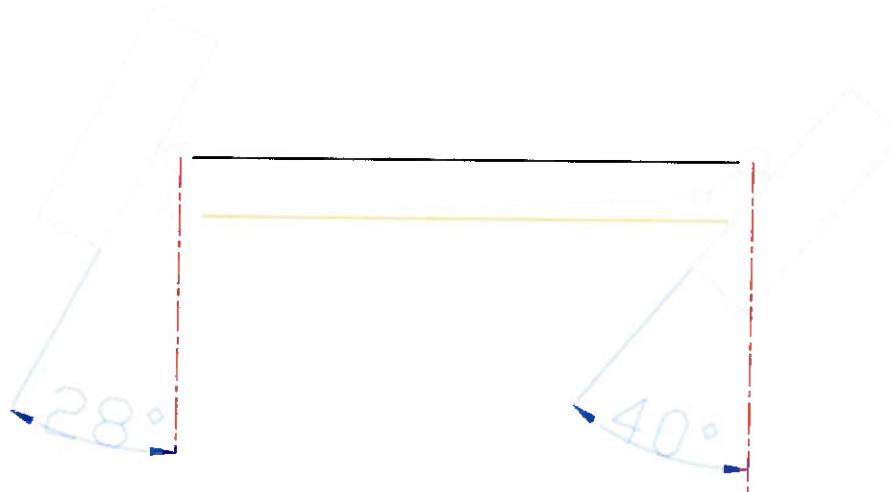


Figura 24 – As rodas internas giram um ângulo maior que as externas

A inclinação dos braços de acionamento, mostrado na figura 27, é necessária para ajudar a criar um centro real de rotação, mas na realidade, ele só é conseguido na posição de linha reta ou em uma única posição de cada lado de rotação. Na prática este desalinhamento é ruim para curvas maiores que 15° , mas nestas curvas o veículo precisa estar em baixas velocidades, fazendo com que o mecanismo seja razoável.

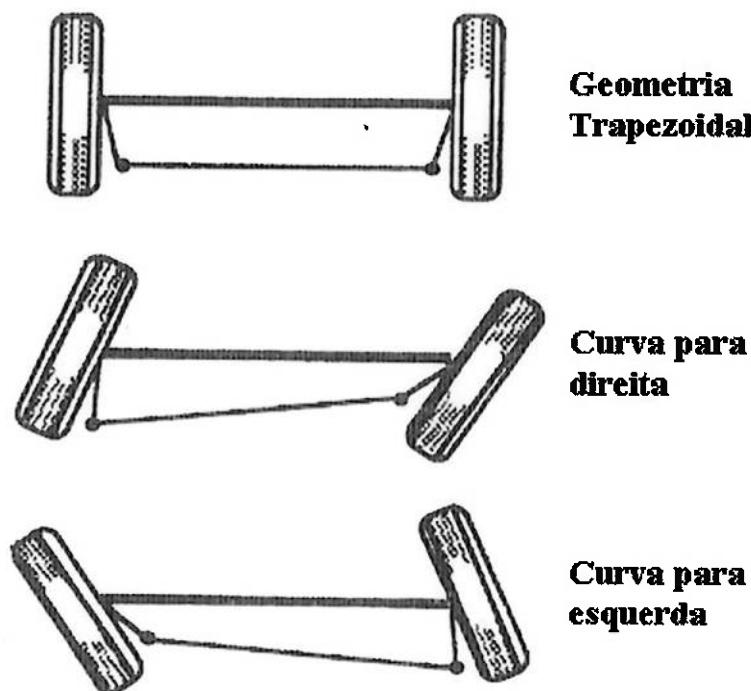


Figura 25 – Geometria de Ackerman com braços inclinados

Também, devido ao avanço tecnológico dos pneus nos últimos anos, a flexibilidade lateral e a distorção deles ajudam a corrigir um certo desvio do centro real de rotação e diminuem as consequências deste problema.

Mecanismos mais complicados têm sido desenvolvidos a fim de produzir um centro real de rotação em todas as posições, mas o aumento do peso, do custo e dificuldade de fabricação faz com que o mecanismo apresentado seja satisfatório.

10.3.3. Força lateral e ângulo de deriva

Os pneus possuem flexibilidade em 3 direções que são radial, circunferencial e lateral. A força lateral necessária para o veículo fazer uma curva é gerada pela flexibilidade lateral, enquanto que a radial absorve impactos e contribui com a resistência ao rolamento. A flexibilidade circunferencial causa o “escorregamento”.

A flexibilidade lateral é visualizada na figura 22, onde o ângulo de deriva do pneu é apresentado. Este é causado pela deformação do pneu e corresponde ao desvio angular da trajetória, ou seja, o desvio entre a trajetória real e a teórica.

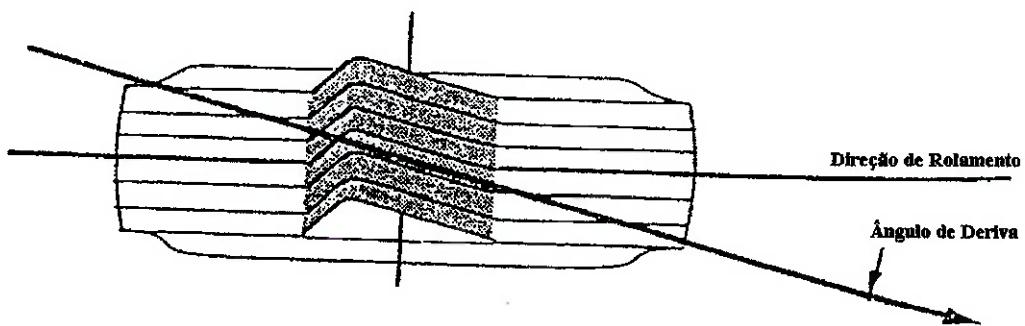


Figura 26 – Ângulo de Deriva

Analizando no plano de contato entre o solo e o pneu, como pode ser visto na figura 23, deslocamentos na direção do eixo XX são devidos ao rolamento e ao escorregamento. Deslocamentos na direção do eixo YY são puramente deslocamentos laterais. E deslocamentos entre os dois eixos é uma combinação de ambos.

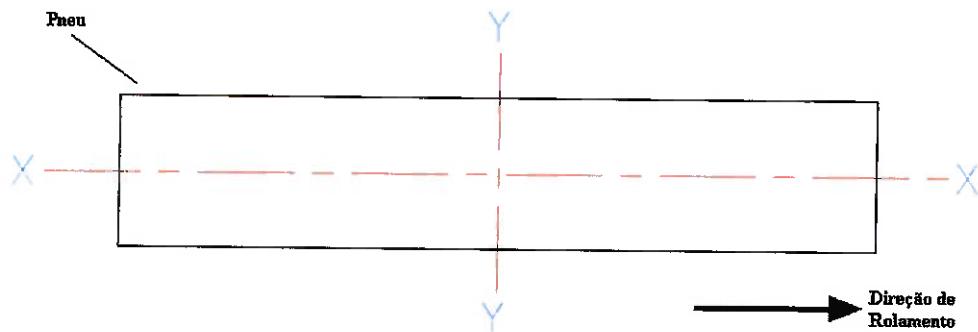


Figura 27 – Deslizamento lateral

10.3.4. Convergência e divergência

Em condições normais de rolamento, as rodas devem estar o mais paralelo possível uma a outra, quando o veículo está em linha reta. Quando as rodas dianteiras estão alinhadas e convergindo à frente do veículo, elas são chamadas de convergentes e estarão gerando forças no sentido de juntá-las. Como na figura 28.

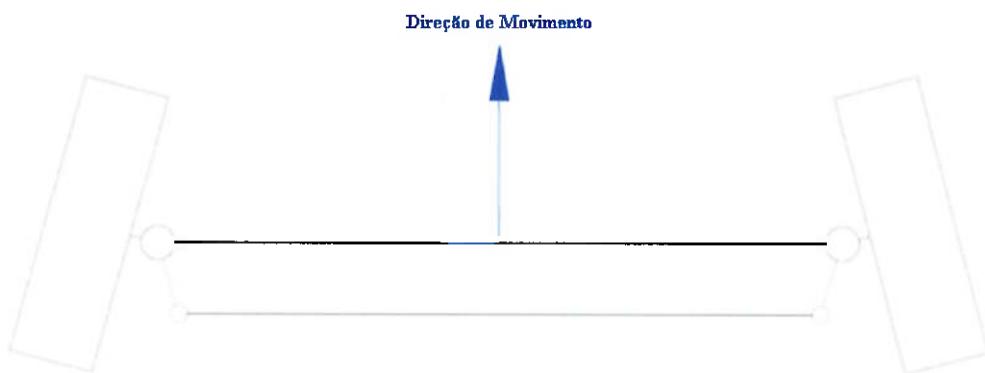


Figura 28 – Convergente

Analogamente, se as rodas estão alinhadas e convergindo à traseira do veículo elas são chamadas de divergentes e estarão tentando a girar separadamente. Como na figura 29.

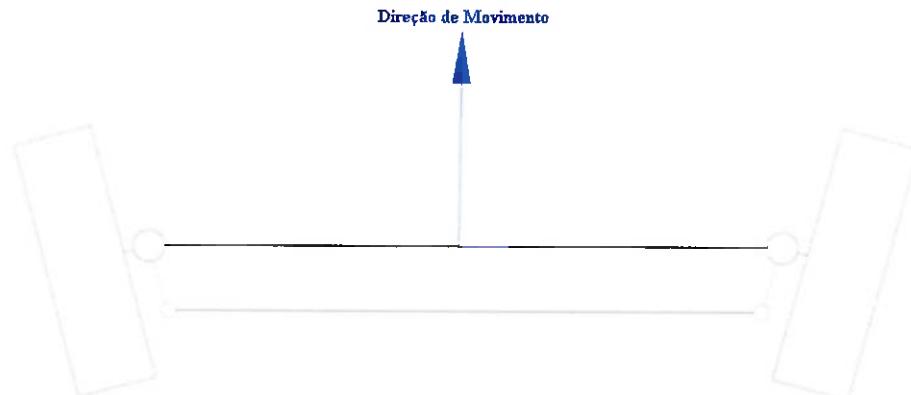


Figura 29 – Divergente

A tendência de girar juntas ou separadas será neutralizada pelo mecanismo da direção, mas causa uma ação de escorregamento em ambos os pneus gerando um uso excessivo dos pneus, uma pior manobrabilidade e uma força maior na direção, para que o carro gire.

Com um típico carro de tração traseira, a força gerada pela reação dos pneus numa estrada causa distorções nas borrachas do pneu, que fazem os pneus dianteiros tenderem a se divergir. Esta tendência é neutralizada deixando os pneus dianteiros um pouco convergentes; isso faz com que eles girem paralelamente em quando o veículo viaja em linha reta.

10.3.5. Características de esterçamento

O ângulo de direção é influenciado pela rigidez do pneu em curvas, pela distribuição do peso, pela pista, pela velocidade do veículo, pela distância entre eixos e pelo raio de curva.

Uma característica importante da direção é como o veículo reage dinamicamente em curvas, apresentando um esterçamento neutro, sobesterçamento ou sobreesterçamento.

Um veículo, com esterçamento neutro, tem a relação da massa sobre o coeficiente de rigidez do pneu, igual para a dianteira e a traseira. Quando esta relação é maior na dianteira que na traseira, o veículo é chamado sobesterçante. E assim, para que este veículo se mantenha numa trajetória curvilínea de raio constante, quando a velocidade aumenta, o ângulo de direção também deve aumentar. Quando o veículo é sobesterçante, ele apresenta uma característica de “sair de frente”.

Inversamente, quando a relação da massa sobre o coeficiente de rigidez do pneu é maior na traseira do que na dianteira, o veículo é chamado sobreesterçante. E o ângulo de direção deve diminuir proporcionalmente com o aumento da velocidade, para que o veículo se mantenha na trajetória de raio constante. Ou seja, o piloto deve girar a direção no sentido de fora da curva, para que o veículo retome a trajetória. Por questões de segurança, para um piloto leigo dirigindo um veículo de tração traseira como um de Fórmula SAE, o comportamento sobesterçante é mais indicado, já que a

correção da trajetória é feita com a ação de girar o volante no sentido de dentro da curva e esta ação é mais intuitiva do que o seu oposto.

10.3.6. Direção nas quatro rodas

O conceito de direção nas quatro rodas pode ser utilizado tanto para melhorar a manobrabilidade em baixas velocidades, quanto para permitir curvas em velocidades mais elevadas.

Há veículos que utilizam direção deste tipo e possuem um eixo ligando uma caixa de direção na dianteira à uma segunda caixa de direção na traseira. Este projeto permite girar as rodas traseiras no mesmo sentido que as da frente, conforme o modo 1 da figura 30, enquanto o volante não atinja um terço do seu curso. Com isso, é possível melhorar o desempenho em curvas de alta velocidade. Já em baixas velocidades, quando o volante é girado mais que um terço do seu curso, as rodas traseiras giram no sentido oposto à dianteira, como no modo 2 da figura 30, assim, a manobrabilidade é melhorada, como, por exemplo, em situações de estacionamento.

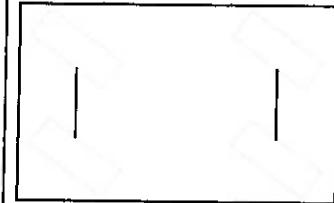
Modo	
	1 Permite curvas em maior velocidade
	2 Melhora a resposta em curvas e diminui o raio de curvatura

Figura 30 – Efeitos de dois modos do sistema de direção do Nissan HICAS

Abaixo estão representadas algumas soluções mecânicas para o comando coordenado das rodas direcionais de um veículo de 2 eixos.

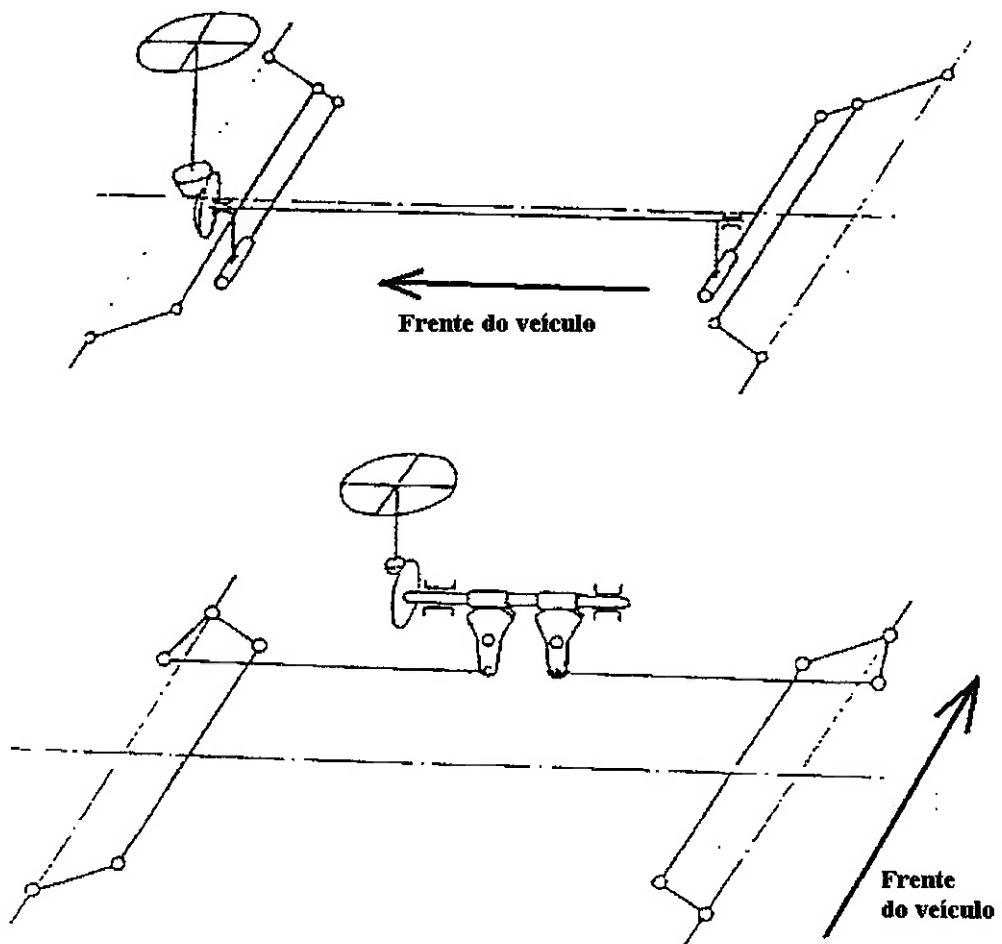


Figura 31 – Mecanismos de direção nas quadro rodas

Há ainda as direções controladas eletronicamente, onde o esterçamento traseiro é feito seguindo um algoritmo através de atuadores elétricos ou hidráulicos. Este tipo é bastante caro e complexo.

No entanto, direção nas quatro rodas se torna inviável num veículo de Fórmula SAE, devido à complexidade de construção, alto custo, além da adição de massa no veículo como um todo.

10.4. Mecanismo de acionamento da direção

As caixas de direção são projetadas para que se consiga transformar um movimento de rotação do volante e da coluna de direção num movimento linear, que acionará as barras de direção e consequentemente as rodas.

O pinhão-cremalheira é o sistema de acionamento de direção mais utilizado nos veículos hoje em dia. Ele deve:

- Reduzir a força necessária para girar o volante;
- Reduzir a resposta da direção ao girar o volante;
- Permitir que as rodas atinjam o ângulo de direção exigido pelo projeto;
- Permitir que o piloto tenha uma mínima sensibilidade no funcionamento do mecanismo.

O pinhão é conectado pela coluna de direção ao volante. Quando este é acionado, o pinhão também gira e aciona a cremalheira. Esta é fixada através de juntas esféricas às barras de direção, que transmitem a força ao braço da manga de eixo. O mecanismo pode ser visto na figura 32.

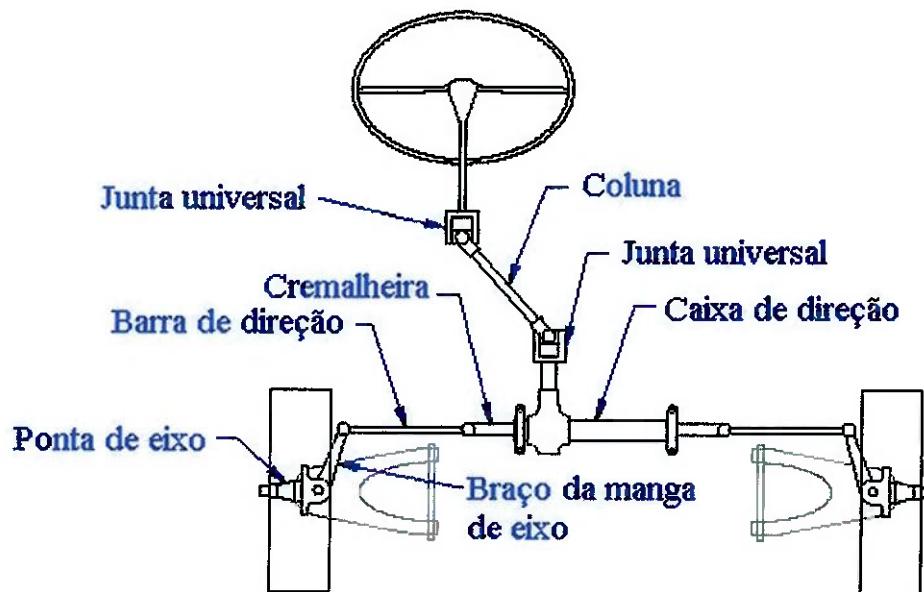


Figura 32 – Mecanismo de acionamento da direção

Antigamente, os mecanismos pinhão-cremalheira utilizados nos veículos eram feitos com engrenagens de dentes retos. Este tipo está sendo substituído por pinhões com dentes helicoidais. Porque, no primeiro tipo, o acionamento era feito sempre através de um único par de dentes. Isto é, todo o esforço do mecanismo era transferido do volante às rodas pelo único par de dentes em contato.

Pinhões helicoidais eliminam este problema, já que mais de um par de dentes estará em contato em cada instante. E ainda, suportam transferência de esforços maiores, são mais silenciosos e são mais suaves no funcionamento, por permitir uma ângulo de recobrimento maior. Isso pode ser visto na figura 33.

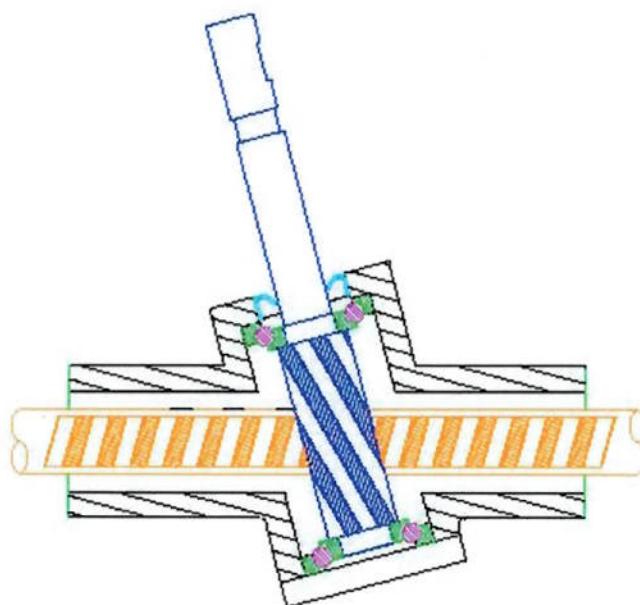


Figura 33 – Pinhão-cremalheira helicoidal

O eixo de rotação do pinhão helicoidal não é perpendicular à cremalheira, fazendo com que a área efetiva de contato entre dentes seja maior que o de dentes retos. Isso permite que os dentes sejam menores, possibilitando reduções maiores. Esse, ainda, ajuda a diminuir a intensidade dos choques devido à pista transmitidos para o volante e para o piloto.

Além disso, o mecanismo de pinhão-cremalheira helicoidal foi escolhido para o projeto, por:

- Ser mais leve, comparado com outros mecanismos;
- Ser mais barato;
- Ocupa um espaço menor dentro do veículo;
- Permite uma boa resposta da direção.
- E o esforço exigido pelo piloto é pequeno, por se tratar de um veículo leve.

Outros mecanismos como direção hidráulica, direção acionada eletricamente, esferas re-circulantes e “drive-by-wire” (direção acionada eletricamente através de

fios) exigem um alto custo, peso elevado, dificuldade de manufatura e interação com os outros subsistemas do veículo e ainda, são menos confiáveis que o pinhão-cremalheira.

10.5. Restrições e parâmetros do projeto

As restrições e os parâmetros serão apresentados abaixo, para que as decisões do projeto possam ser feitas para o Fórmula SAE.

10.5.1. Volante

O volante selecionado para o projeto tem 145 mm de raio e é utilizado em karts. Ele é fabricado com alumínio e recoberto de camurça. Sua fixação na coluna de direção é feita através de um cubo e três parafusos.

10.5.2. Restrições da suspensão

As bandejas da suspensão serão fixadas às mangas de eixo através de juntas esféricas que possibilitam a rotação da manga de eixo em torno do king pin em todo o curso da suspensão. As bandejas devem ser projetadas levando-se em consideração a possível interferência da roda nas bandejas nos ângulos máximos de curva. Isto é, quando a roda está totalmente esterçada para um lado ou para o outro, a roda deve girar livremente, independentemente do curso da suspensão.

10.5.3. Inclinação do eixo “King pin” e “offset”

Se uma linha é desenhada através dos pontos centrais de fixação da manga de eixo na suspensão, o ângulo formado por ela e o plano vertical é o ângulo de inclinação do “King pin”. Conforme está mostrado na figura 34.

E ainda, se esta linha é prolongada até o chão, a distância deste ponto ao meio da roda é o chamado “offset” do “King pin”.

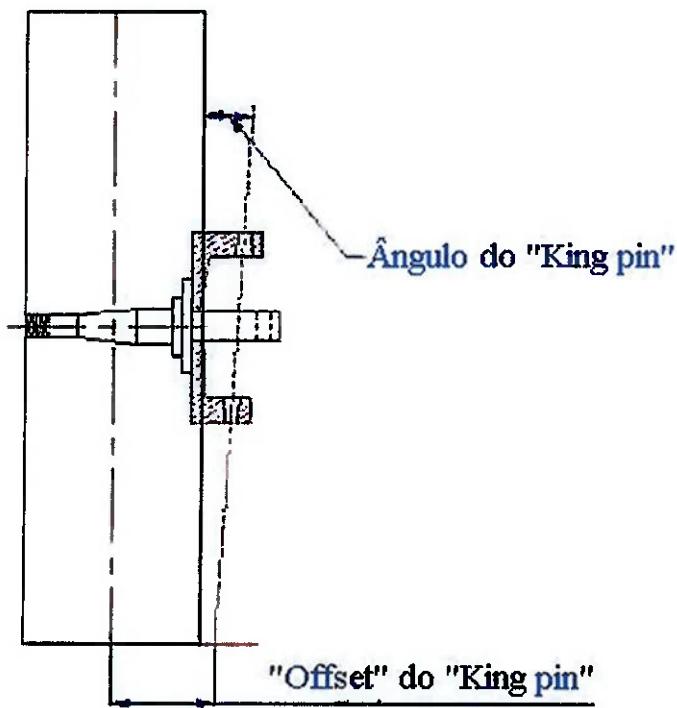


Figura 34 – Ângulo e “offset” do “King pin”

Essa distância deve ser pequena, porque quando uma roda bate em algum obstáculo, a força transmitida para o volante e consequentemente sentida pelo piloto é muito grande. Se essa distância é muito pequena, a sensibilidade do piloto fica dificultada e o carro ficará muito difícil de se dirigir em condições limites, já que o piloto não terá resposta do sistema rapidamente.

10.5.4. Restrições do freio

O diâmetro do disco de freio é 190 mm. Ele é limitado ao diâmetro da roda utilizada de 10". O disco de freio deve ser posicionado dentro da roda para diminuir os esforços gerados nas frenagens, mas um dos problemas encontrados é a fixação da pinça de freio que restringe além do seu diâmetro, a posição do disco em relação ao centro da roda. Ou seja, restringe o quanto o disco e a pinça de freio estarão dentro da roda. Este é um dos problemas que fazem com que o “offset” do “King pin” não

possa ser diminuído o necessário para que se consiga uma boa absorção de impactos e uma boa resposta do sistema..

10.5.5. Peso

Por se tratar de um veículo de competição com força limitada, o baixo peso é muito importante. Infelizmente, o peso é inversamente proporcional ao custo, Baixo peso geralmente está relacionado com alto custo devido ao tempo maior de projeto e ao alto custo de materiais mais leves e resistentes.

Para o primeiro carro da equipe, seria razoável que os componentes do sistema fossem robustos, para garantir que eles não falhem. Depois de construir um carro confiável, os pontos onde são necessários refinamentos e onde se deve despender um tempo maior de projeto são mais visíveis.

10.5.6. Conjunto rodas e pneus

O conjunto de rodas e pneus é o responsável pela interface entre o carro e a pista. Diversos aspectos são influenciados pela seleção do conjunto, já que este afeta a suspensão, a direção, a frenagem, a dirigibilidade e o conforto do operador. Outro ponto para explicitar a importância do conjunto, é com um torque elevado, isto é, quando o conjunto moto-propulsor consegue produzir e transmitir aos pneus um torque alto o suficiente, para que os pneus sejam os limitadores do desempenho do veículo.

Abaixo está apresentado um resumo do apêndice B da regra de fórmula SAE, que trata das rodas e pneus:

- Diâmetro mínimo do pneu é 203.2mm;
- Pneus de chuva ou seco são permitidos;
- Qualquer tipo de pneus ou rodas são permitidos;
- As rodas dos pneus de chuva ou de seco devem ter o mesmo tamanho;
- Devem atender às restrições padrões dos pneus.

As rodas devem primeiramente acomodar livremente o sistema de freios, incluindo o disco de freio e a pinça, o conjunto de rodas, a suspensão, a direção e as junções, permitindo o funcionamento em todas as posições. A tala e o diâmetro são as principais medidas usadas para especificar o pneu.

É conveniente que se conheça o sistema de medidas de pneus para se especificar a geometria do mesmo. Abaixo, segue uma lista apresentando os sistemas de identificação utilizados na história.

- Sistema numérico – foi usado até o fim dos anos 60, com as medidas em polegadas. Por exemplo, 7.75-14. O primeiro número representa a tala do pneu e o último, o diâmetro da roda.
- Sistema alfa-numérico – trata-se de um sistema baseado na carga máxima do pneu. Este sistema foi introduzido em 1968. Por exemplo, FR70-14, com a primeira letra indicando a carga admissível e a segunda, o tipo de fabricação. Os números indicam o perfil, seguido do diâmetro da roda em polegadas.
- Sistema métrico – representa um sistema métrico de carros de passeio. Foi introduzido em 1976. Por exemplo, P215/70R14. O "P" indica um veículo de passeio, 215/70 diz o diâmetro do pneu em milímetros seguido pelo seu perfil; R indica o tipo de fabricação e 14 o diâmetro da roda em polegadas.
- Sistema ISO métrico – trata-se do sistema numérico convertido para as unidades métricas. Quando o perfil começou a variar, eles foram introduzidos conforme o sistema métrico anterior. No final, ainda são indicadas à carga e a velocidade máxima. Por exemplo, 185/60R14 82H.

10.6. Pinhão-cremalheira

Como definido anteriormente, as entradas para o projeto do pinhão-cremalheira são:

- Ângulo máximo de rotação do volante é 320°;
- Deslocamento da cremalheira é 56 mm;
- Mecanismo com engrenagens helicoidais.

E, portanto, da equação abaixo, o diâmetro primitivo deve ser igual a:

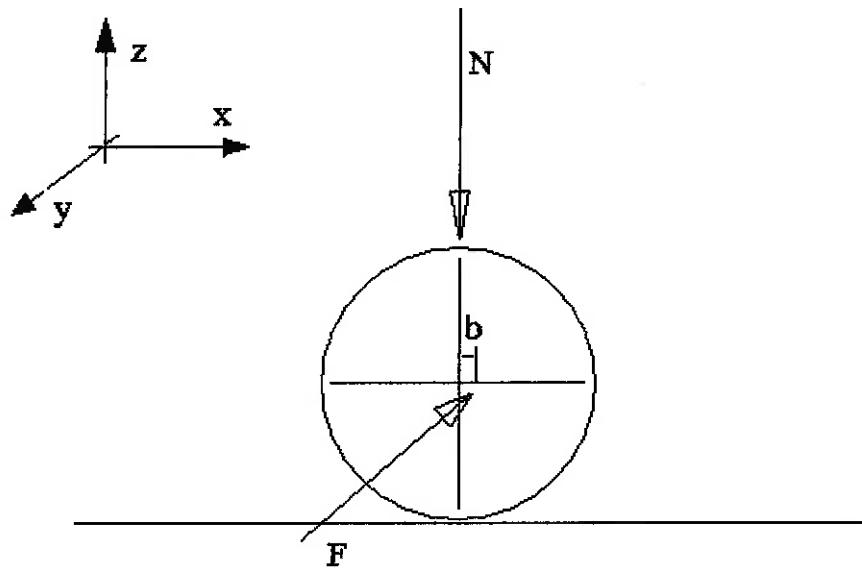
$$Dm = \frac{360^\circ \cdot 56}{320^\circ \cdot \pi} = 20,05\text{mm}$$

Para a determinação do módulo das engrenagens, o número mínimo de dentes de um pinhão deve ser 17 dentes. E para otimizar o peso do conjunto, o módulo igual a 1 foi determinado.

Seguindo no projeto, para satisfazer o módulo escolhido e o diâmetro calculado, o diâmetro primitivo foi definido igual a 20 mm.

Para o cálculo de resistência do conjunto, foram utilizados os critérios de Lewis (tensão de flexão) e de Hertz (tensão de contato e fadiga). [17]

Como as posições exatas da caixa de direção e os pontos de fixação da barra de direção na manga de eixo ainda não foram determinados, o torque atuante no pinhão foi calculado pelo modelo abaixo, considerando as piores condições de funcionamento. O coeficiente de atrito entre o pneu e o asfalto considerado é igual a 0,62. O modelo considerado está representado abaixo.



Para o cálculo, a força normal máxima aplicada no pneu considerada foi de 1380N, que corresponde a 60% do peso do veículo aplicado nas rodas dianteiras. Considerando a pior condição de funcionamento, o torque será máximo quando **b** for mínimo. Logo, a força aplicada **F** máxima é igual a 855,6N.

Este é o valor da força tangencial máxima aplicada no pinhão-cremalheira.

Pelo critério de Lewis, a tensão que atua no dente é calculada por:

$$\sigma = \frac{F * k_a * k_s * k_m}{K_v * l * m * J}$$

Onde: **F** = 855,60 – Força tangencial;

k_a – fator de aplicação;

k_s – fator de tamanho;

k_m – fator de distribuição de carga;

K_v – fator dinâmico;

l – largura do dente;

m = 1mm – módulo;

J – fator geométrico.

Os valores de cada fator foram retirados de [17], e para ângulo de hélice de 10°, vida útil de 10^4 ciclos, e um coeficiente de segurança igual a 1,5, tem-se:

k_a – fator de aplicação;

$k_s = 1,00$;

$k_m = 1,50$;

$K_v = 1,00$;

$J = 0,49$.

Igualando à tensão de cisalhamento do aço 8620, cementado com dureza 45HRC, ou seja, com tensão admissível de 663Mpa. E considerando o fator de vida igual a 1,90, o fator de temperatura igual a 1,00 e o fator de confiabilidade igual a 1,00, a largura mínima do dente pelo critério de Lewis é:

$$l = 6 \text{ mm.}$$

Pelo critério de Hertz, que considera a tensão de contato de fadiga, a tensão de contato de fadiga é dada pela equação abaixo:

$$\sigma_c = C_p * \left(\frac{F * k_a * k_s * k_m * C_f}{K_v * l * d * I} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Onde: σ_c - tensão de contato de fadiga;

C_p – coeficiente elástico;

C_f – fator de condição superficial;

I – fator geométrico.

Os valores utilizados no cálculo estão mostrados abaixo e foram retirados de [17].

K _a	1,00
K _v	1,00
K _s	1,00
K _m	1,50
d (m)	0,02
C _f (fator de condição superficial)	1,00
I (fator geométrico)	0,15

Tabela 18 – Fatores para o cálculo da largura do dente pelo critério de Hertz

O coeficiente elástico depende das características do material, e para o aço 8620 com dureza de 45 HRC, ele é igual a $189\text{kPa}^{0,5}$. Para a determinação do fator geométrico, por se tratar de um par de engrenagens helicoidais com ângulo de hélice de 10° e com 20 dentes, $I = 0,15$. Todos os coeficientes foram retirados de [17].

E mais uma vez, comparando com a tensão admissível do material utilizado, com todos os fatores de correção, a largura mínima do dente pelo critério de Hertz é 9 mm.

Portanto, a tensão de contato devido à fadiga se sobrepõe à tensão de flexão para este caso. E a largura mínima do dente para o conjunto pinhão-cremalheira do Formula SAE deve ser de 9 mm.

Os desenhos de fabricação estão em anexo.

10.7. Metodologia de simulação numérica

Neste capítulo será apresentada uma possível metodologia para auxiliar as equipes futuras de Fórmula SAE nos projetos da direção e da suspensão. Será demonstrado o funcionamento, e os possíveis resultados do software MSC Adams/car, versão 2005.0.0.

Para a análise do sistema de direção, há a necessidade de se ter o projeto de suspensão bem definido, ou seja, definido o tipo de mecanismo que será utilizado e os pontos de fixação das articulações, isto é, em quais pontos da estrutura serão ligados os braços da suspensão e em quais pontos da suspensão a direção será unida. Como o projeto da suspensão ainda não foi desenvolvido, a metodologia será apresentada utilizando um modelo básico com mecanismo de suspensão “Duplo A”, com o mecanismo da direção acionado por pinhão-cremalheira, composto por coluna de direção e barras de direção ligadas às mangas de eixo.

O capítulo será dividido em:

- Carregando um modelo;
- Ajustando o modelo ao projeto;
- Simulando a direção;
- Análise dos resultados.

10.7.1. Carregando um modelo

Para carregar um modelo no Adams/car, depois de inicializado o programa, crie um novo “Suspension Assembly”. Será apresentada a metodologia para simulação numérica apenas da parte posterior do veículo, para análise do sistema de direção. Uma vez que o modelo do carro inteiro é mais aplicado no projeto da suspensão.

Na janela “New Suspension Assembly”, é possível carregar alguns modelos já criados pelo fabricante do software, clicando com o botão direito do mouse nos campos “Suspension Subsystem” e “Steering Subsystem”. O exemplo pode ser visto na figura 35 abaixo.

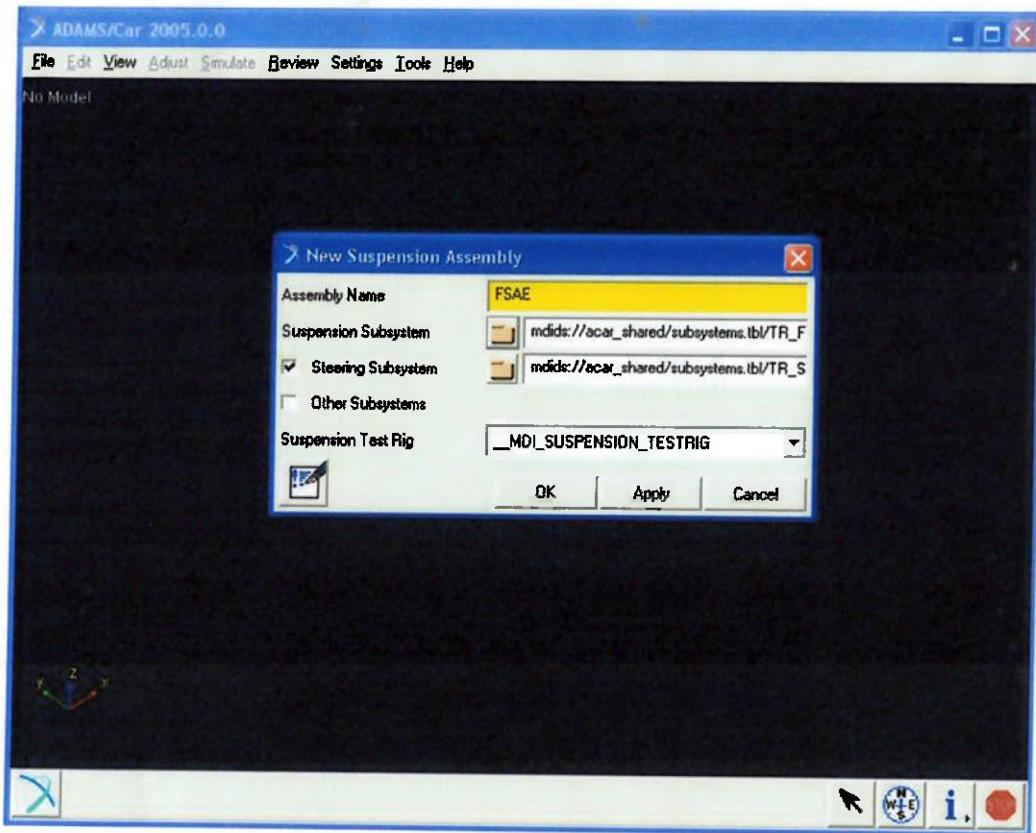


Figura 35 – Carregando um modelo

Depois de escolhido os modelos de suspensão e direção, o software carregará um modelo virtual para facilitar a visualização e melhorar a interface com o projetista. Este modelo está mostrado na figura 36.

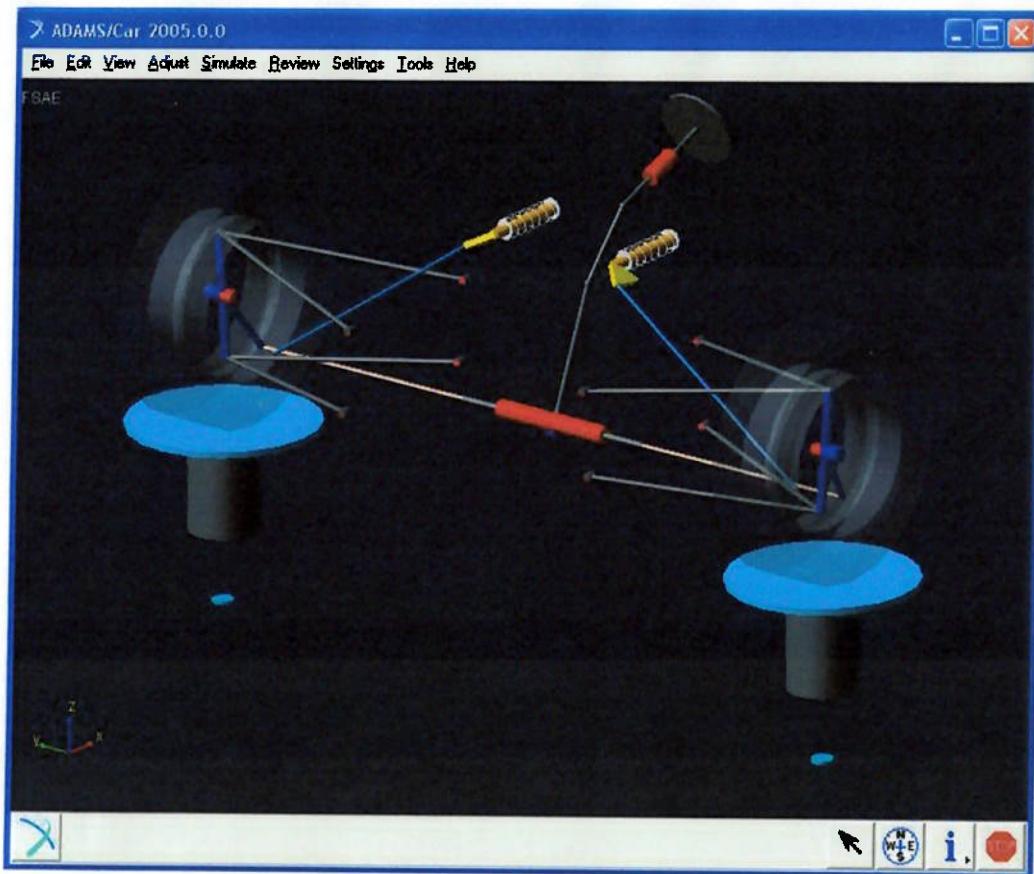


Figura 36 - Modelo virtual

Opções de visualização são mostradas clicando com o botão direito do mouse sobre a janela de trabalho.

10.7.2. Ajustando o modelo ao projeto

O software Adams/car trabalha sempre com os pontos do projeto, isto é, não analisa a geometria das peças do mecanismo e sim, apenas os pontos onde ocorrem as articulações e as uniões. Portanto, para se ajustar o modelo ao projeto deve-se definir cada um destes pontos.

Cada ponto importante do mecanismo tem um nome. Para a identificação de cada um deles, é preciso que se aumente a região do ponto e pressione a tecla “v”, como mostrado na figura 37.

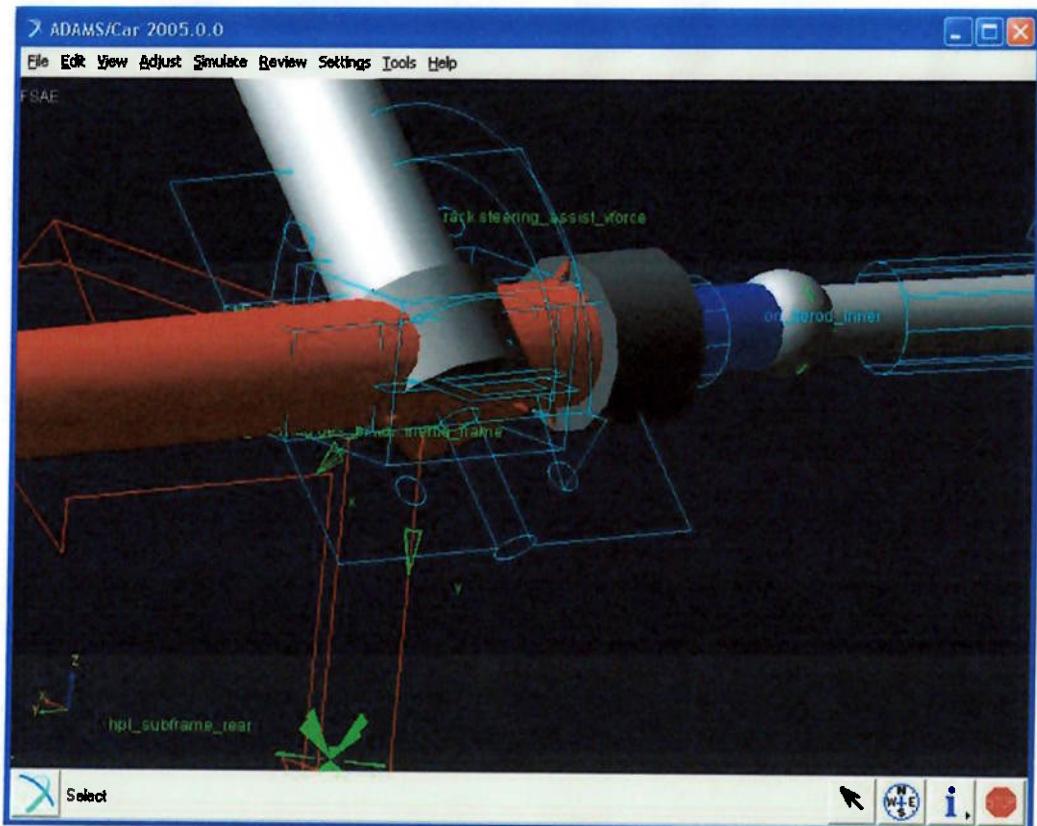


Figura 37 – Ponto da caixa de direção e suas identificações

Depois de identificado cada um dos pontos, é possível a determinação de cada um deles no eixo de coordenadas do software, modificando o mecanismo do modelo, a fim de se adequá-lo ao projeto.

A modificação de cada ponto é feita numa tabela. O eixo de coordenadas do carro utilizado é mostrado no canto inferior da janela e o eixo de coordenadas de cada peça é mostrado diretamente nela, quando esta é selecionada.

A tabela com as coordenadas é chamada de “Hardpoint Modification Table” e é acessada clicando em “Adjust / Hardpoint / Table”. A tabela do exemplo está mostrada na figura 38.

Hardpoint Modification Table

	Assembly	Subsystem	FSAE	Name Filter:
	loc_x	loc_y	loc_z	remarks
TR_Front_Suspension.ground.hpl_drive_shaft_	267.0	-200.0	255.0	(none)
TR_Front_Suspension.ground.hpl_lca_front	67.0	-400.0	180.0	(none)
TR_Front_Suspension.ground.hpl_lca_outer	267.0	-750.0	130.0	(none)
TR_Front_Suspension.ground.hpl_lca_rear	467.0	-450.0	185.0	(none)
TR_Front_Suspension.ground.hpl_lwr_strut_mount	267.0	-600.0	180.0	(none)
TR_Steering.ground.hpl_rack_house_mount	467.0	-350.0	330.0	(none)
TR_Front_Suspension.ground.hpl_subframe_front	-133.0	-450.0	180.0	(none)
TR_Front_Suspension.ground.hpl_subframe_rear	667.0	-450.0	180.0	(none)
TR_Front_Suspension.ground.hpl_tierod_inner	467.0	-400.0	330.0	(none)
TR_Steering.ground.hpl_tierod_inner	467.0	-400.0	330.0	(none)
TR_Front_Suspension.ground.hpl_tierod_outer	417.0	-750.0	330.0	(none)
TR_Front_Suspension.ground.hpl_top_mount	307.0	-500.0	680.0	(none)
TR_Front_Suspension.ground.hpl_uca_front	367.0	-450.0	555.0	(none)
TR_Front_Suspension.ground.hpl_uca_outer	307.0	-675.0	555.0	(none)
TR_Front_Suspension.ground.hpl_uca_rear	517.0	-490.0	560.0	(none)
TR_Front_Suspension.ground.hpl_wheel_center	267.0	-760.0	330.0	(none)
testrig.ground.hps_global_part_reference	0.0	0.0	0.0	(none)
TR_Steering.ground.hps_intermediate_shaft_forward	667.0	-300.0	530.0	(none)
TR_Steering.ground.hps_intermediate_shaft_rearward	817.0	-300.0	630.0	(none)
TR_Steering.ground.hps_pinion_pivot	467.0	-300.0	330.0	(none)
testrig.ground.hps_steering_input_rotation	200.0	200.0	0.0	(none)
testrig.ground.hps_steering_input_slider	200.0	0.0	0.0	(none)
testrig.ground.hps_steering_input_translation	200.0	-200.0	0.0	(none)
TR_Steering.ground.hps_steering_wheel_center	1167.0	-300.0	730.0	(none)

Display: Single and Left Right Both OK Apply Cancel

Figura 38 – Hardpoint Modification Table

Após a definição da tabela anterior, é necessária a determinação dos parâmetros da suspensão. Para tanto, clique em “Simulate / Suspension Analysis / Set Suspension Parameters”, isso abrirá uma janela chamada “Suspension Analysis: Setup Parameters” como a figura 39. Nesta janela, determinam-se os valores de entre-eixos, altura do centro de gravidade, massa suspensa e massa não-suspensa e parâmetros da roda e do pneu.

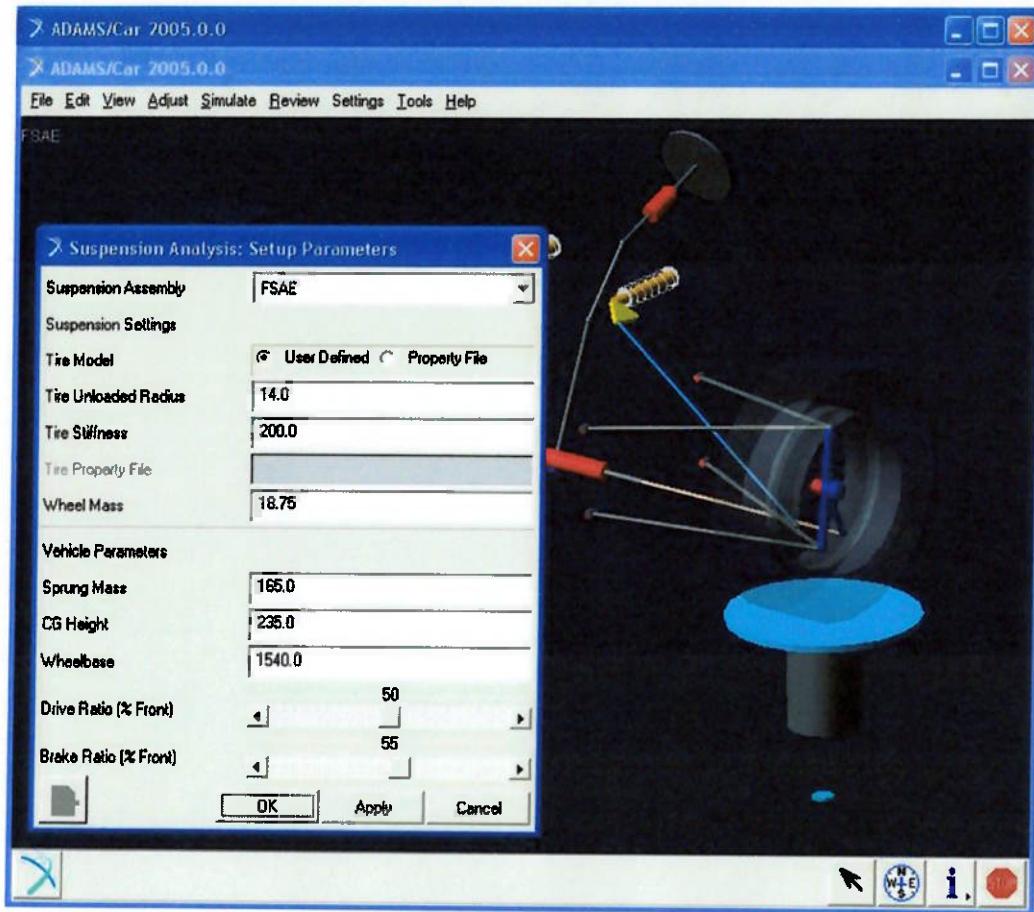


Figura 39 – Parâmetros da suspensão

Depois de definido os parâmetros da suspensão, o modelo está pronto ajustado para o projeto e pronto para a simulação numérica.

10.7.3. Simulando a direção

Depois de ajustado o modelo ao projeto, o software calcula diversos parâmetros de comportamento do mecanismo do projeto. Neste sub-capítulo serão apresentadas apenas as simulações referentes à direção. Para isso, clique em “Simulate / Suspension Analysis / Steering” e abra a janela “Suspension Analysis: Steering”, como a figura 40.

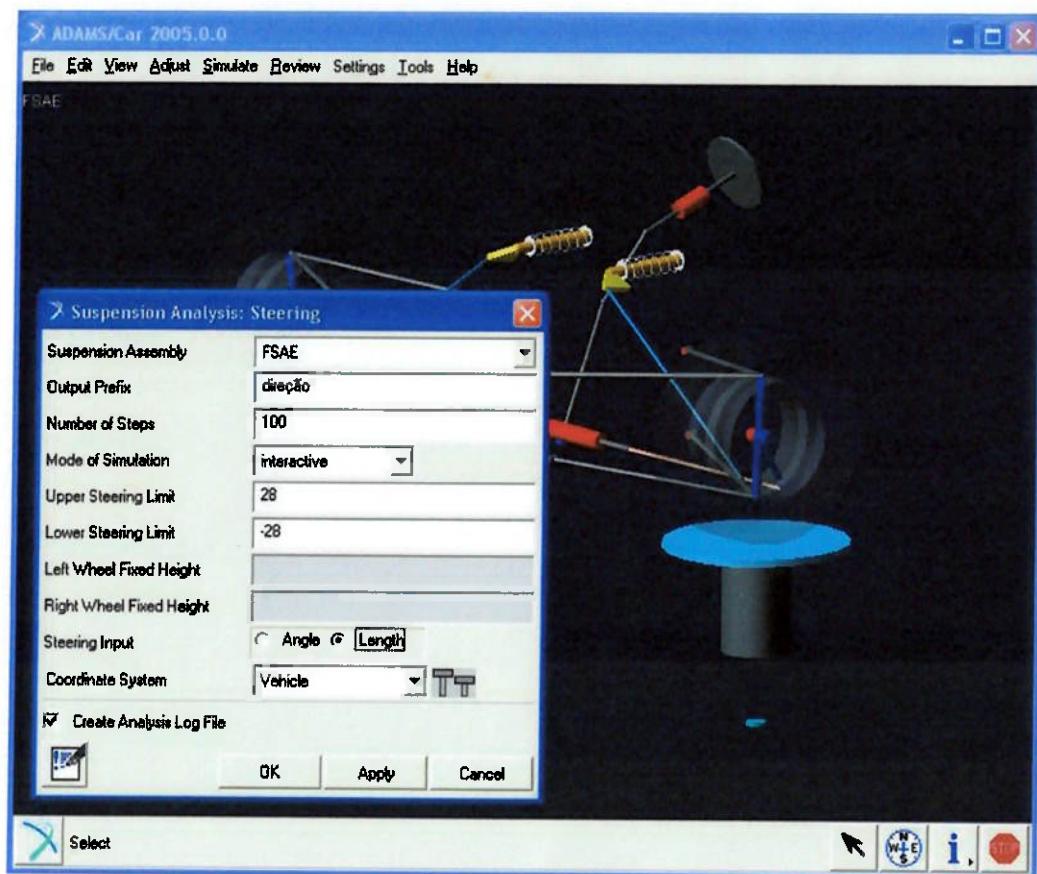


Figura 40 – Simulação da direção

Nesta janela, os parâmetros da simulação serão definidos. Ou seja, número de iterações do cálculo numérico e limites máximos e mínimos da análise. No caso da direção, o valor de entrada definido no projeto é um curso de cremalheira de 28 mm para cada lado, resultando o limite mínimo -28 mm e o máximo 28 mm. Entradas em ângulo também são possíveis. Clicando em OK, o software irá realizar os cálculos numéricos.

10.7.4. Análise dos resultados

Para análise dos resultados, o software possui uma janela “Postprocessing window”. Para acessá-la, clique em “Review / Postprocessing window”, com isso uma janela como a da figura 41 será aberta.

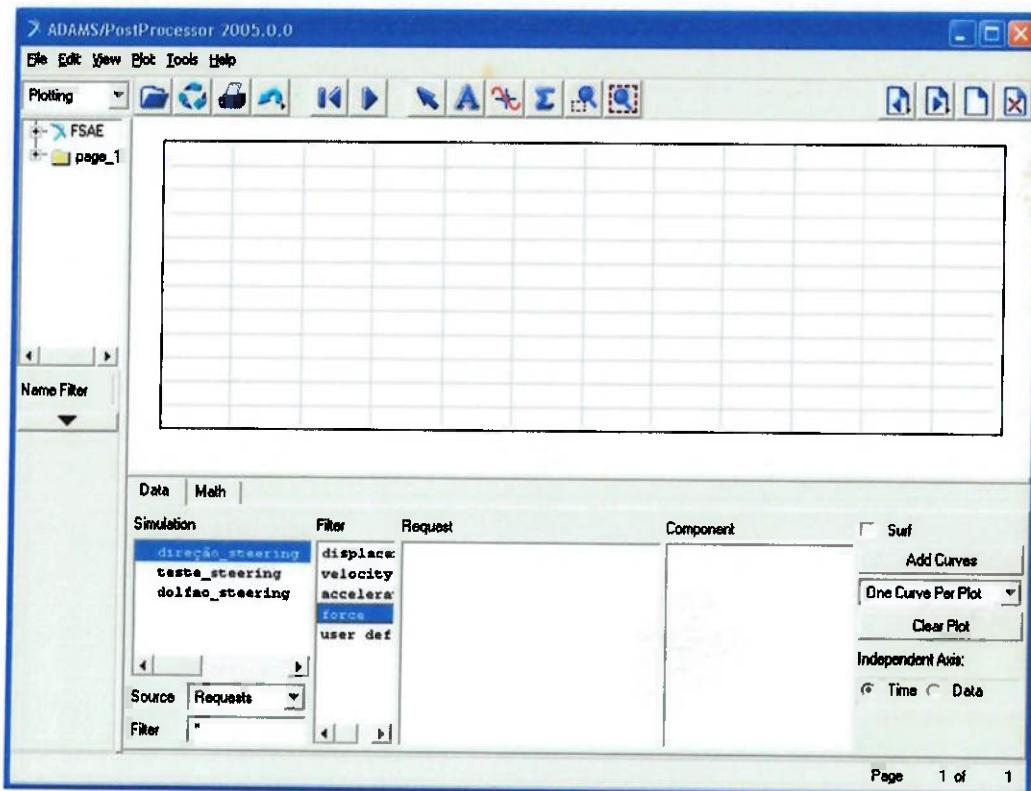


Figura 41 – Janela de pós processamento

Primeiramente, deve-se definir o eixo x do gráfico. Para tanto, no canto inferior esquerdo, em “Independent Axis” selecione “Data”. Abrirá uma janela como a da figura 42, nela selecione sua simulação; depois em “Filter”, selecione “user defined”. Para análise dos parâmetros de direção, geralmente o eixo x é melhor preenchido com a unidade de deslocamento da cremalheira, para isso, selecione “steering_displacements” em “Request”, e “rack_displacement_front” em “Component”. Clique em OK.

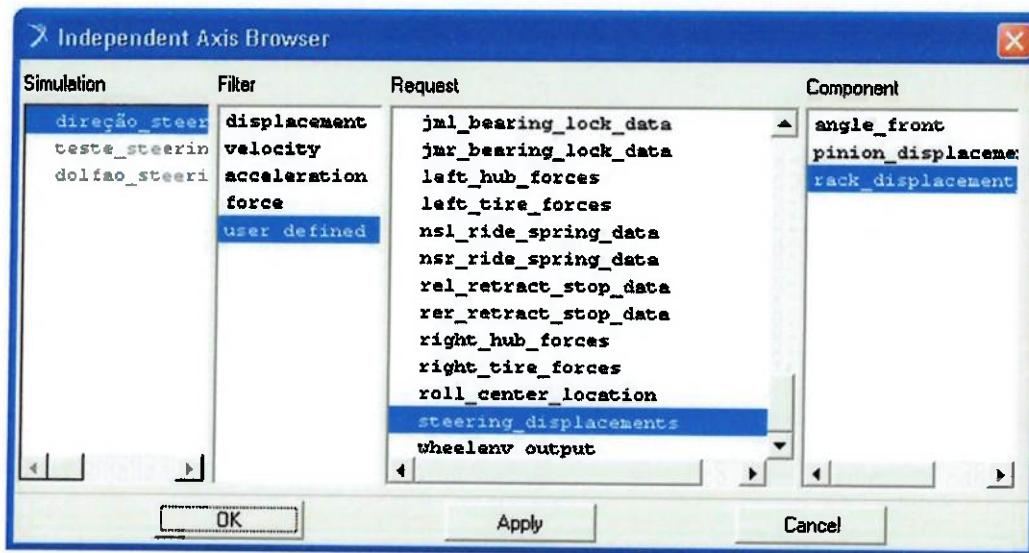


Figura 42 – Eixo X

Após a definição do eixo x, selecione “Results Sets” em “Source”. E uma lista com todos os parâmetros calculados será apresentada no campo “Result Set”, conforme a figura 43 abaixo.

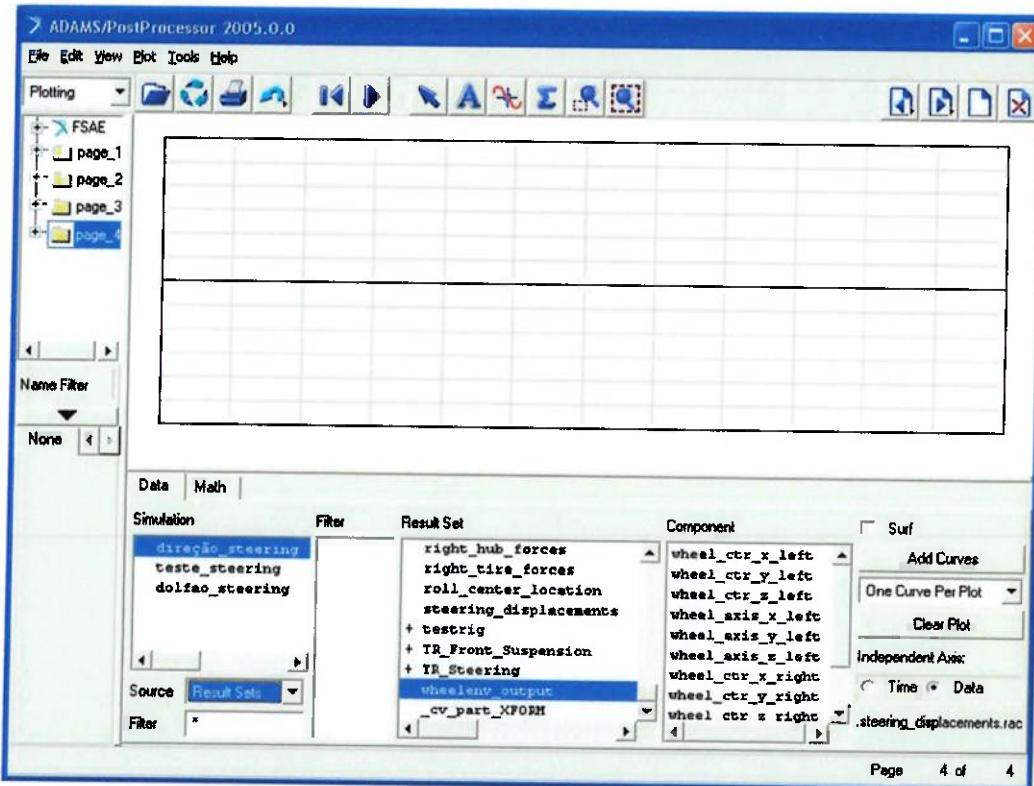


Figura 43 – Selecionando os parâmetros para a plotagem

Abaixo serão apresentados alguns resultados calculados pelo software MSC Adams/car.

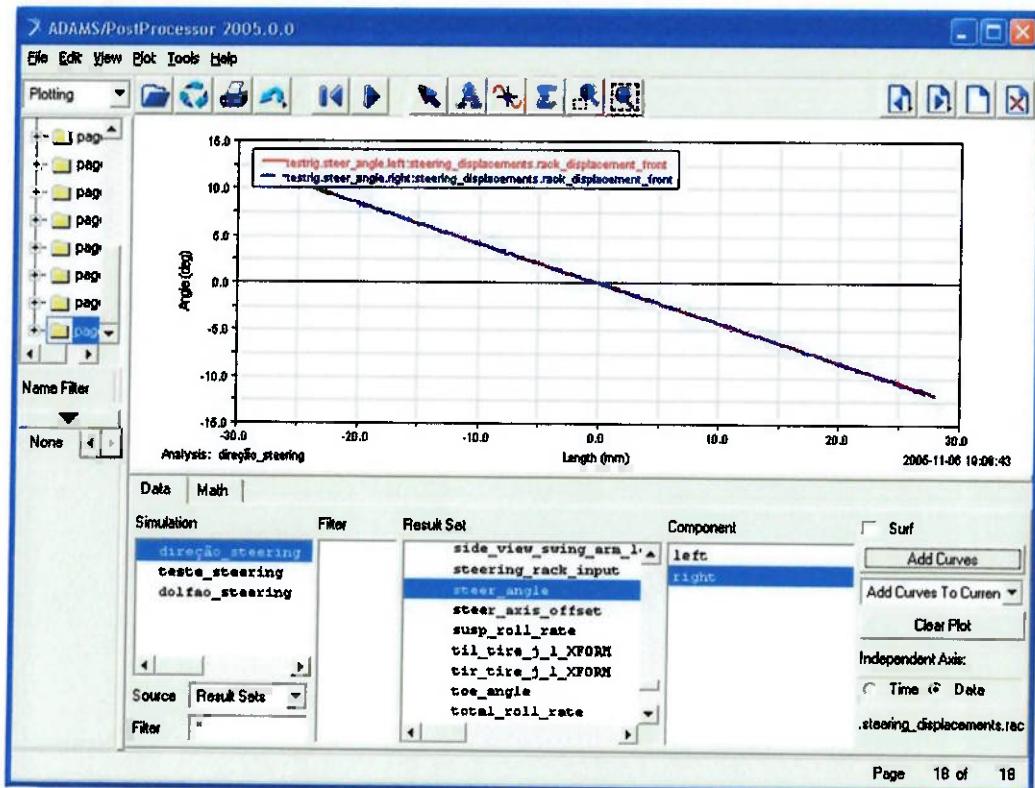


Figura 44 – Ângulo de esterçamento por deslocamento da cremalheira

Na figura 44, pode-se avaliar o ângulo de esterçamento do veículo pelo deslocamento da cremalheira. No deslocamento máximo da cremalheira, ou seja, com 28 mm, o mecanismo apresentará um ângulo de esterçamento de aproximadamente 12°.

Na figura 45, está mostrado o raio de curvatura do veículo também pelo deslocamento da cremalheira. Desta análise pode se avaliar o raio mínimo do veículo, que neste caso é de 6,25m.

Inúmeras outras análises da dinâmica do veículo podem ser feitas com a simulação numérica, quando o usuário já está mais familiarizado com a interface do software.

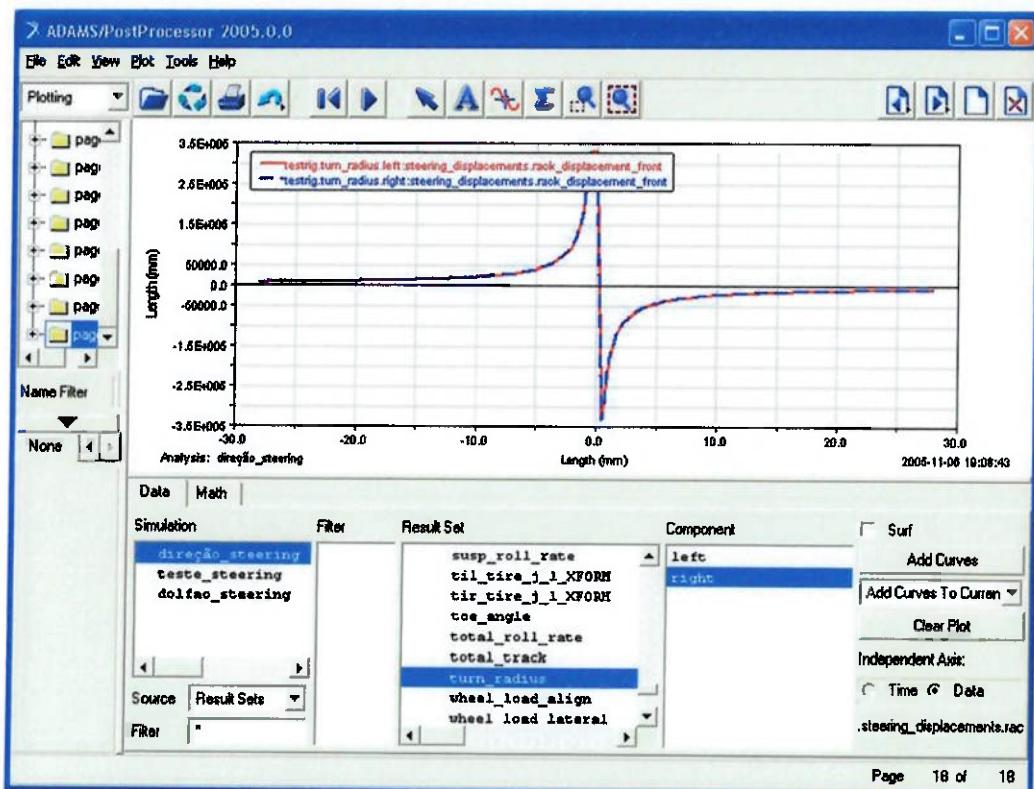


Figura 45 – Raio de curvatura do veículo por deslocamento da cremalheira

Repita os passos do item 10.8.2 ao 10.8.4, num processo iterativo a fim de otimizar o projeto tanto da suspensão como da direção. Melhores simulações podem ser feitas através de modelos completos do veículo.

O uso deste software pode ser um fator importante no desenvolvimento do veículo, mas o projetista não deve se prender totalmente a ele, deixando de lado a visão analítica do projeto.

11. PROJETO DA ESTRUTURA

11.1 Introdução do projeto

Os chassis tubulares estão em cena desde o início das corridas automotivas.

O chassi tubular consiste em tubulações de aço ou alumínio colocadas de modo a triangularizar cada parte da estrutura e deste modo distribuir as cargas à que o veículo é submetido. Estas cargas são causadas pelo: motor, suspensão, excitações na pista de rolagem e a aerodinâmica.

Há dois tipos de chassis em carros de corrida, as estruturas tubulares de aço ou o monobloco de compósitos. No entanto, as estruturas tubulares de aço são mais tradicionais e mais populares no automobilismo amador.

A sua popularidade é mantida por causa da simplicidade, pois as únicas ferramentas requeridas para a construção da estrutura tubular são: serra copo, aparelhos para medição, gabaritos, aparelho de solda e um soldador. A estrutura tubular tem ainda a vantagem sobre o monobloco, de poder ser facilmente reparado e inspecionado após sofrer danos após colisões.

Como visto anteriormente os principais objetivos da estrutura são:

- Garantir a integridade do piloto, mesmo no caso de possíveis choques, e garantir a rápida saída do piloto em caso de alguma emergência;
- Possuir rigidez e resistência estrutural suficiente e geometria adequada para que sirva como estrutura de fixação e/ou apoio para os demais subsistemas, como suspensão, trem de força, direção, etc.

O desenvolvimento do projeto prima pelo atendimento de todos os objetivos propostos, de modo a otimizar a segurança e a funcionalidade.

Tendo isso em vista, inicia-se por atender as exigências do regulamento, atentando principalmente para a geometria dos tubos e as exigências funcionais.

Para aumentar a rigidez estrutural do veículo, todos os nós devem ser posicionados onde as forças significativas oriundas dos subsistemas atuariam. A geometria da porção traseira deve ser adequada tanto para a fixação da suspensão quanto para a acomodação do conjunto de motor e transmissão.

A estrutura do carro bem projetado é o ultimo e maior item a constar em um desenho. Como um meio de conectar a montagem das partes, a estrutura deve ser projetada para localizar cada uma das peças em posições nas quais elas sirvam com maior vantagem, e nas quais as forças envolvidas possam ser retiradas da maneira mais simples possível.

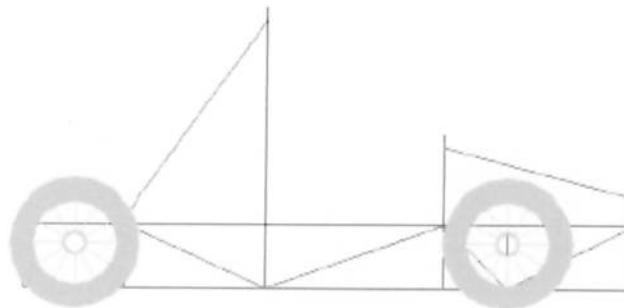


Figura 46 - Layout básico de um veículo Formula SAE

11.2 Objetivos do projeto

Os objetivos principais deste projeto são:

- Pesquisa que relaciona-se o embasamento das informações da regra do Formula SAE Norte-Americana com o design do chassi das outras instituições;
- Pesquisa das características eficazes do chassi de estrutura tubular e descobrir os efeitos dos esforços, torções e deflexão do mesmo levando em conta a manipulação e desempenho do veículo. Além de, analisar os benefícios e desempenho de materiais diferentes para a estrutura.
- Projeto de um chassi eficaz e eficiente que satisfaça as regras da competição. O projeto do chassi deve ser factível com materiais e recursos disponíveis, ao considerar diferentes exigências tais como: motor, suspensão, transmissão, caixa de câmbio, etc.
- Condução dos protótipos de projeto preliminares e testar fatores de carga apropriados
- Fabricação do chassi com um material especificado.
- Mostrar os testes não-destrutivos do chassi determinando a resposta às cargas.

11.3 Critérios de projeto

11.3.1 Determinação das restrições físicas

O projeto de um chassi depende unicamente da classe em que o veículo estará competindo. O chassi envolvido neste projeto é para uma classe do SAE-1 de fórmulas que estão competindo pela primeira vez, onde somente uma parte das regras e das exigências são cobradas no evento. Estas restrições freqüentemente são ajustadas por um corpo de juízes que organizam o evento e neste são reforçados as regras que devem ser seguidas pelas equipes competidoras. Há também algumas restrições colocadas na classe para assegurar-se de que as medidas de segurança sejam aderidas. Em classes amadoras do automobilismo incluindo um fórmula Sae-1 há também muitas limitações para manter uma competição competitiva e para impedir que as equipes com recursos financeiros maiores dominem os eventos.

11.3.2 Exigências do veículo

Os objetivos de projeto da classe são ajustados em torno de um cenário onde uma equipe seja capaz de projetar e produzir um carro do protótipo para a avaliação como um artigo da produção.

O mercado pretendido das vendas é um piloto amador de autocross de fim de semana. Conseqüentemente, o carro deve ter o desempenho elevado nos termos de aceleração e frenagem, assegurando sempre qualidade. Deve também ter baixo custo, ter fácil manutenção, e passar confiança. Além, da habilidade de fazer o marketing dos carros, a qual é realçada por outros fatores tais como a estética, o conforto e o uso de peças comuns. A firma de manutenção deve planejar produzir 4 carros por dia para um funcionamento de produção limitado e o veículo do protótipo deve realmente custar menos de \$25.000. O desafio à equipe de projeto deve ser projetar e fabricar um protótipo do veículo que reúna estes objetivos e intenções. Cada projeto será comparado e julgado com outros projetos competindo ao júri determinar o melhor veículo.

Configuração do habitáculo e do veículo

O veículo deve ter as rodas descobertas e o projeto do habitáculo do piloto aberto (um habitáculo do estilo da fórmula 1) com rodas externas. O veículo deve também ter um bitola, ao menos, de 1525 milímetros entre centros.

Distância do solo

A distância do solo deve ser suficiente para impedir que qualquer parcela do carro (à exceção dos pneus) toque no solo durante eventos de pista.. Para atender esta regra escolheu-se ter uma altura estática de passeio do veículo de 60mm sem piloto. A escolheu-se também para as rodas 13 polegadas com um diâmetro externo de 520mm. O chassi terá que ter os pontos da montagem da suspensão capazes de manter esta altura de passeio do veículo.

Proteção à colisão

O piloto deve ser protegido de capotagens e das colisões do veículo. Isto requer dois restritores de braço que são presos ao cinto de segurança, um anteparo dianteiro com uma zona de esmagamento, e estruturas da proteção lateral. Os acidentes de capotagem são freqüentemente extremos e ocorrem em velocidades elevadas quando a ação das forças no veículo é muito grande e causam danos substanciais. Os outros acidentes sérios que podem ocorrer nas pistas são os de um veículo trafegando rapidamente colidir com um veículo parado. Por isto, que é necessário o anteparo lateral do chassi, os quais servem como zonas de absorção de energia.

Arco de proteção principal

Esta é a barra principal da proteção do capotamento que está ao lado ou atrás do piloto. Este arco de proteção principal protege a cabeça dos pilotos no evento no capotamento do veículo. O arco de proteção principal deve ser construído de um único tubo não cortado unido à base do chassi. O arco de proteção principal deve também ser travado no corpo traseiro do chassi. As barras de travamento devem estar em um ângulo com a horizontal não menor que 30°. Estas regras asseguram de que o arco de proteção esteja muito rígido e seguro com nenhum ponto fraco.

Arco de proteção dianteiro

O arco de proteção dianteiro é a barra secundária da proteção do capotamento, o qual está localizado na frente do piloto e acima de seus pés perto do volante. Este arco protege os braços e as mãos dos pilotos em um capotamento. Define também uma área segura com o arco de proteção principal em casos de capotamento, o qual protege o corpo do piloto em um capotamento. O arco dianteiro deve também ser construído de um único tubo não cortado o mesmo que o arco de proteção principal e este devem ser unidos à base do chassi. O arco dianteiro deve também ser travado na parte da frente da estrutura (no anteparo do chassi).

A seção 3.3.4 2006 fórmula SAE, apêndice D especifica que se uma linha do capotamento (“rollover”) for extraída entre o arco dianteiro e o arco principal, o ponto mais alto do capacete dos pilotos deve ser 50 mm abaixo desta linha como mostrado na figura 47.

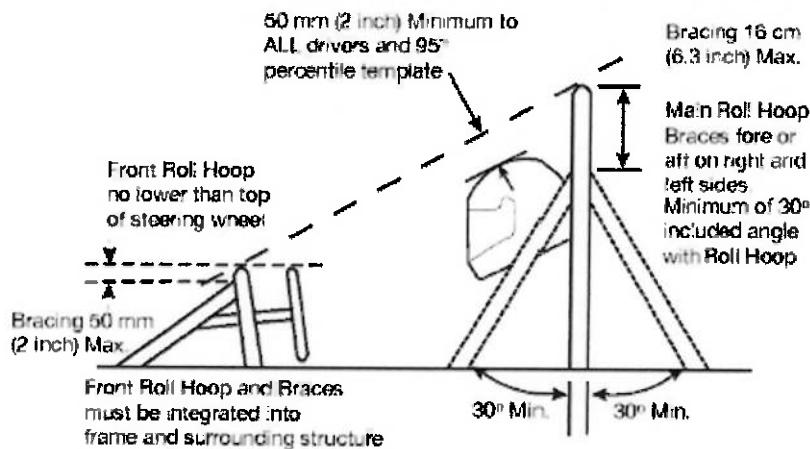


Figura 47 – Restrições do Chassi pela regra do Formula SAE

Proteção lateral de impactos

O piloto deve ser protegido no caso de uma colisão lateral, quando este estiver sentado na posição normal de dirigir (seção 3.3.8, da fórmula 2006 SAE). Esta proteção lateral do impacto deve proteger o corpo do piloto se um outro veículo colidir com a lateral do chassi.

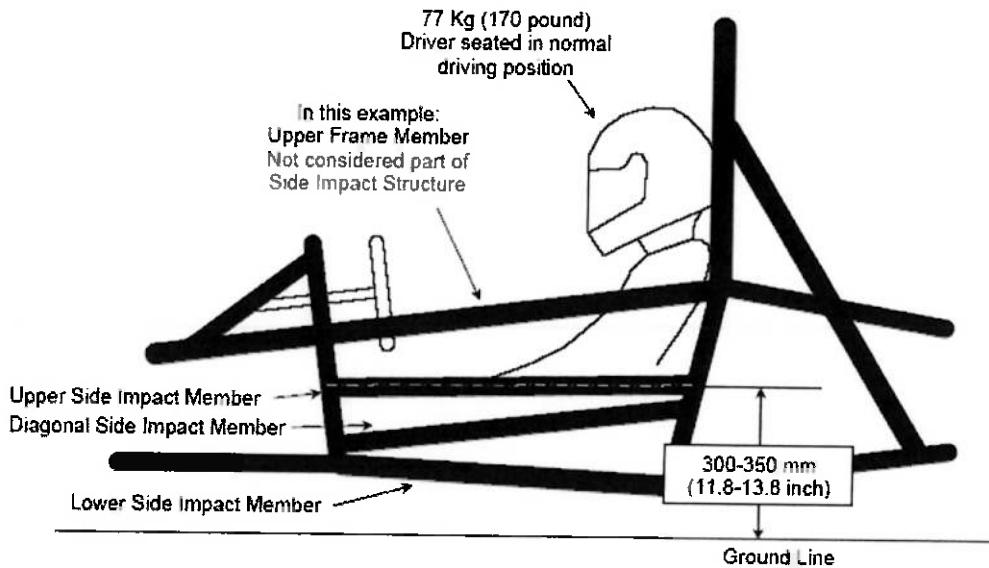


Figura 48 – Barra de proteção lateral

A proteção lateral de impacto deve incluir 3 barras da estrutura construídas de materiais especificados.

- **A barra superior** deve estar entre 200 mm e 350 mm da pista e conectar o arco principal do chassi com o arco dianteiro do chassi.
- **A barra diagonal** deve conectar as barras laterais superiores e inferiores do impacto
- **A barra inferior** deve conectar o fundo do arco principal do chassi com o fundo do arco dianteiro.

Zona de esmagamento

O chassi deve também ter uma zona do esmagamento para frente da estrutura principal do chassi. A zona do esmagamento deve ser projetada a absorver a energia no caso de uma colisão frontal. Esta zona de esmagamento deve ser definida por dois planos separados para frente da estrutura principal do chassi assim em uma colisão frontal podem deformar e retardar o veículo dentro de um limite aceitável.

11.4. Embasamento Teórico

11.4.1. História das estruturas veiculares

Um chassi tubular usa uma série de pequenos pedaços de tubos cilíndricos de modo a conseguir a força e a rigidez necessária para o veículo com peso mínimo. A técnica foi formalizada durante a segunda guerra mundial, quando foram usados para a construção de estruturas de aviões de combate. Este projeto foi desenvolvido primeiramente por Barnes Wallis que era um coordenador inglês da aviação. As vantagens que a estrutura tubular oferecia ao avião eram que permitia que o avião obtivesse quantidades grandes de danos a certas áreas e ainda reter bastante força

para permanecer trafegando por via aérea. Após a guerra em 1947, o Dr. Ferdinand Porsche usou o conceito para construir seu carro de corrida, o Cisitalia. Logo após esse veículo principal, os fabricantes tais como o Lotus e o Maserati adotaram a idéia de produzir carros de corrida, estes carros foram apelidados de carros de corrida do tipo “gaiola” por causa da quantidade de tubos. Os carros modernos de corrida são construídos agora em uma estrutura monobloco feita de materiais compostos.

11.4.2 A Estrutura Atual

Atualmente, uma estrutura é definida por uma série de barras de transferência de cargas, que são cobertas pelos painéis que não oferecem nenhuma sustentação às cargas. As estruturas, entretanto oferecem mais flexibilidade em termos de produção em massa, ao também permitir uma escolha de vários materiais tais como o aço, o alumínio ou os compostos. Quando produções múltiplas e em massa são requeridas, as estruturas tubulares são muito menos econômicas comparadas às estruturas do estilo monobloco.

Cerca de 95% dos produtores mundiais de automóveis usam as estruturas monobloco de aço soldados tradicional como mostrado na figura 49. Esta forma de fabricação forneceu um eficiente meio de reduzir o custo efetivo de produção em massa desde os anos de 1960. As estruturas monobloco são definidas como uma pele estrutural, onde os painéis exteriores (normalmente de aço) sejam soldados antes da montagem, contribuindo à integridade estrutural total do veículo.

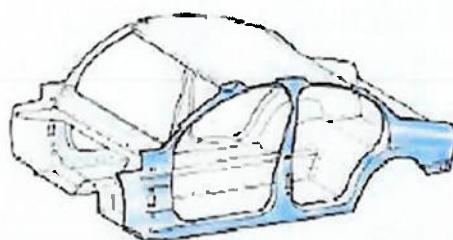


Figura 49 - Chassis Monobloco de aço soldado

11.4.3 A Tecnologia de estruturas

A pesquisa significativa está sendo empreendida atualmente na tecnologia de estruturas tubulares para aumentar o nível de competitividade contra outras estruturas de monoposto. Com técnicas de construção, que esperaram envolver materiais compostos modernos e avançados adesivos para dar forma à estrutura do chassi. Figura 50 mostra um protótipo de uma estrutura para um veículo de passageiro moderno. Uma vez que um chassi contínuo de spaceframe é produzido então os painéis sem cargas podem ser adicionados, os quais são moldados de um termoplástico. A vantagem desta tecnologia moderna do painel da construção e do plástico do spaceframe é que a massa total do veículo é reduzida e o processo da construção tem potencial de ter o custo reduzido.

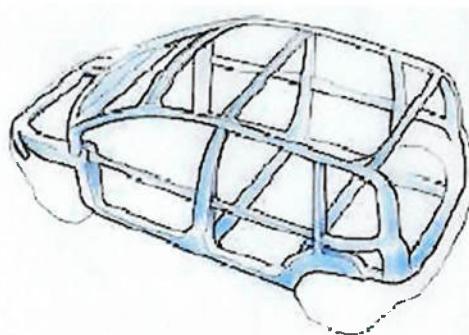


Figura 50 - Spaceframe moderno, mostrado sem os painéis do corpo externo

11.4.4 Técnicas de fabricação

No início de muitas equipes, as estruturas são construídas de tubo oco retangular da seção (RHS) porque este é muito mais fácil de juntar se tiverem as superfícies planas para realizar o trabalho de soldagem. As técnicas fáceis também permitidas da fabricação do RHS, como todas as junções soldadas eram niveladas. As estruturas das equipes modernas são fabricadas agora inteiramente de aço tubulares redondos para fornecer uma rigidez torsional à estrutura. Este processo envolve algumas técnicas mais complicadas de fabricação enquanto a precisão do entalhe requerido para conseguir uma junta estrutural forte. Estes métodos são muito mais fáceis para aços endurecidos com a introdução do trabalho feito com ferramentas de qualidade elevada. Juntar dois tubos redondos com entalhe também aumenta a quantidade de área da solda que aumenta a força, que pode ser vista em figura 51.

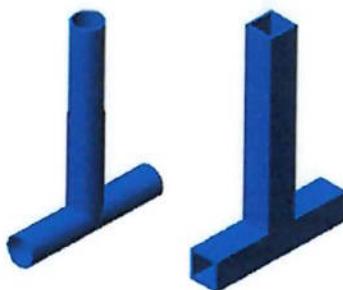


Figura 51 – Junção de tubos redondos e retangulares

Os soldadores modernos e as técnicas de soldagem melhoraram também os processos das fabricações na construção do chassi tubular permitindo que umas soldas mais complexas sejam conseguidas. Os materiais de enchimento melhorados também melhoraram as técnicas soldagem e produzem uma solda mais forte e mais limpa. Quando os aços extraídos frios são usados, a soldagem com gás inerte de tungstênio (TIG) é preferida sobre a soldagem com gás inerte do metal (MIG). A soldagem com TIG produz uma zona afetada localmente pelo calor menor, preservando as propriedades do aço.

12. DINÂMICA DO VEÍCULO FÓRMULA SAE

Estruturas tubulares são usadas na construção do chassi de carros de competição, desde a introdução de carro de competição em 1940s. Estruturas tubulares são usadas ainda hoje embora estes perderem a sua competitividade para os projetos de monopostos compostos de fibra.

O desempenho de um veículo de estrada ou de competição pode ser relacionado ao projeto do chassi. Houve muita pesquisa conduzida na área de projeto do chassi e como os ajustes do chassi causam efeitos no desempenho e resposta dos veículos.

Em veículos de corrida todos os componentes devem trabalhar no seu limite e alcançar o máximo desempenho com os recursos disponíveis. Equipes profissionais de corrida gastam enormes quantidades de dinheiro em testes e pesquisar para alcançar uma posição à frente de seus competidores.

Entretanto a dinâmica de veículos de corrida tem sido profundamente estudada e em todos os seus aspectos e os componentes do veículo analisados. Todos os componentes do veículo são partes de um sistema complexo e o desempenho de muitos componentes frequentemente recai na qualidade e desempenho de outros componentes.

Por exemplo, se a tem-se um sistema de suspensão de alta qualidade montado em uma estrutura flexível, a maioria de seu desempenho será desperdiçado pela flexibilidade do chassi antes da mola do conjunto de suspensão poder contrair. Por isso achar uma configuração ótima do veículo é de vital importância. Para que se tenha um sistema que alcance o seu máximo potencial temos que ter uma configuração correta do chassis e muitos componentes para modificá-lo disponível.

Esta é uma tarefa complexa e difícil otimizar a performance do veículo e obter um ótimo potencial em diferentes condições de pista e evento. Esta tarefa ainda fica mais difícil se um veículo tem vários pilotos em que cada piloto tem uma preferência diferente da configuração do veículo. Com isso admite-se que é irreal produzir um ponto ótimo para o veículo, mas usando métodos de projeto modernos e

alguns pilotos comprometidos, falhas comuns podem ser superadas e desempenhos satisfatórios podem ser alcançados.

A configuração ideal de chassi deve levar em conta o balanço do veículo (direção neutra) em curvas sob condições de cargas laterais para prevenir características sobreesterçantes e sobesterçantes durante curvas. O compromisso entre performance em curvas e velocidades em linhas retas é uma decisão difícil, o que frequentemente tem que ser feito pelas equipes e deve ser decidido bem antes do ínicio do projeto. Pois, estruturas altamente rígidas em veículos que priorizam a habilidade de realizar curvas devem ter um número maior de triangularizações no chassi. E não tendo as barras de triangularização o veículo ficará mais leve tem-se o aumento da velocidade do veículo em retas, entretanto irá resultar em um aumento no rolamento e a deflexão do veículo. Se o chassi tiver o acréscimo de barras de triangularização somente na dianteira ou na traseira terá um aumento do peso do veículo, desse modo aumentará as cargas laterais do chassi, levando o veículo a apresentar características sobesterçantes e sobreesterçantes.

Como o chassi é uma estrutura rígida, esta não permite ajustes para diferentes condições de pista. Entretanto todos os componentes com regulagens tem sido feitos para se ajustar ao chassi. Em equipes de corrida profissionais, regulagens com barras estabilizadoras podem ser usadas para prover alguns ajustes ao chassi para diferentes condições, mas requerem configurações especiais e podem ser aplicadas somente em chassis largos.

12.1 Estruturas

Embora estruturas tenham sido extensivamente pesquisado no passado, cada estilo de veículo tem diferentes características requeridas, fazendo um chassi dos veículos serem diferentes. Os materiais da estrutura e técnicas são geralmente universais não importando a categoria do veículo. As estruturas são feitas ou de seções retangulares ocas de aço (RHS), seções tubulares ocas de aço (THS) e em alguns casos com a combinação de ambos. Seções tubulares são mais encontradas devido a terem uma maior resistência as cargas torcionais porque tem um eixo constante para o momento de inércia, os quais são desejados em chassis de alta performance.

A teoria de estruturas tem-se a triangularização da estrutura para prover mínima deflexão e máxima resistência. Se a estrutura foi feita em formato triangular está irá distorcer facilmente como mostra a figura 52. Uma caixa com a inserção de uma diagonal triangularizada reduzem efetivamente a quantidade de deflexão.

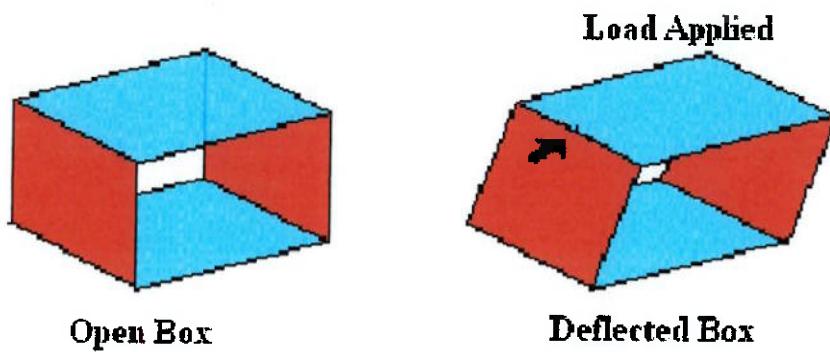


Figura 52 - Box não triangularizado

**Diagonal forms two triangles.
The yellow, and green**

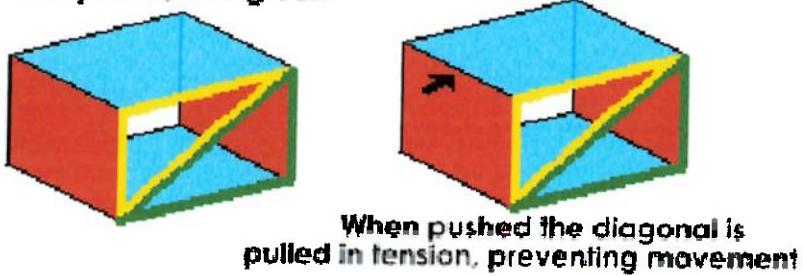


Figura 53 - Box triangularizado

Sabendo-se que a teoria comum atrás das estruturas é criar um chassi de forma a triangularizada para fornecer a força mínima e da máxima da deflexão. Se a estrutura for feita apenas de um formato retangular, esta será distorcida facilmente sob cargas como mostrado em figura 53. Triangularizando a caixa introduzindo um membro diagonal, desse modo, estaremos reduzindo eficazmente a quantidade de deflexão. A maior resistência é ganha quando a seção é carregada como mostrado em figura 53. O membro diagonal é tensionado e os membros da extremidade são comprimidos. Se a força fosse aplicada no sentido oposto, o membro diagonal seria colocado sob compressão e as extremidades serão tracionadas. Porque o membro diagonal é mais longo e sob cargas mais elevadas é capaz de formar ondas se as cargas de compressão forem aplicadas. Por esta razão é importante saber quais são os trajetos da carga e projetar de modo que as diagonais estejam sob cargas de tração.

12.2 Estruturas das competições

Muitas das equipes da competição de Formula Sae, incluem o tipo de materiais do chassi e de construção. Indicam também uma variedade grande dos retratos que ilustram o processo da construção do chassi e dos métodos usados. Devido à natureza de competição do evento Formula SAE, a maioria de equipes são relutantes em publicar resultados e características detalhadas de seus chassis. Os organizadores da competição de Formula SAE publicam apenas regularmente um boletim de notícias.

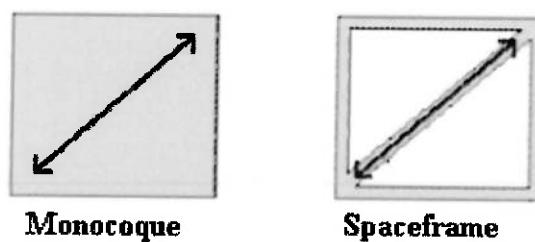


Figura 54 – Alcançando os mesmos resultados com estrutura tubular e materiais compostos.

As regras da competição que relacionam as seções de impacto do chassi mudaram muito com o passar dos anos passados. Muitas das equipes de competição com mais experiência e orçamentos maiores optam usar um chassi de materiais compostos por causa de suas propriedades de peso e desempenho. Alguns livros explicam como os chassis materiais compostos resistem à deflexão e exigem tensões na estrutura similar aos chassis tubulares, entretanto em vez de ter uma diagonal, ele tem um painel inteiro para fornecer a força mostrada na figura 54 acima.

12.3 Crashworthiness

Do ponto de vista da engenharia, o crashworthiness é a habilidade do veículo de impedir os ferimentos dos seus ocupantes no evento de um acidente. As equipes de competição indicam também que o crashworthiness não é o mesmo que a segurança do veículo, e os dois tópicos devem ser distintos.

O comportamento da estrutura tal como uma estrutura tubular sob cargas rapidamente aplicadas é modelada geralmente usando várias análises para deste modo, fornecer uma compreensão melhor dos impactos experimentados durante uma colisão. Os impactos mais comuns ocorrem em todos os ângulos e em todas as superfícies verticais do veículo. Alguns livros indicam que para melhorar o crashworthiness deve impedir 'a segunda colisão' onde o ocupante colide com as partes internas do veículo. As regras do Formula SAE reforçam o uso cinto de cinco pontos e restritores de braço para reduzir os movimentos do ocupante.

Reimpel conduziu testes de impacto repentinos com os chassis de carro de competição e concluiu que a maioria de ferimentos sérios são causadas pela retardação repentina do veículo. Este cenário é provável ocorrer quando o veículo colide com um objeto estacionário contínuo, produzindo quantidades grandes de energia que viajam através do veículo. Porque para competições os chassis são projetados para o desempenho sendo muito rígidos e consequentemente não apresentam muita absorção de energia. Para absorver zonas separadas desta absorção de energia são unidos pequenas estruturas na dianteira da maioria dos chassis para ajudar em colisões da energia elevada.

13. DETERMINAÇÃO DAS CARGAS

Para projetar um chassi, as suposições necessitam ser calculadas a respeito das cargas previstas que poderiam ser experimentadas pelo chassi. Estas cargas devem incluir as cargas estáticas sabidas dos componentes do veículo tais como o piloto e o motor, também incluir as cargas dinâmicas preditas que ocorrerão através da suspensão. As demais cargas devem também ser calculadas e projetadas para impedir o veículo que falha e que venha a ferir o piloto. Quando o veículo está parado tem-se cargas constantes dos componentes do veículo e do próprio peso do veículo que está sendo transmitido através da suspensão a terra. Uma vez que o veículo está em movimento estes componentes causam transferência de cargas que são muito mais complicados. Quando o veículo está realizando curvas, acelerações e desacelerações estas cargas são aplicadas em sentidos diferentes e tendo grandes variações. As forças radiais são produzidas também durante todo o chassi por componentes girantes.

13.1 Cargas Estáticas

Quando o carro está parado as cargas do veículo são transferidas para os outros componentes através da estrutura às rodas e a terra. Ao projetar o chassi é muito importante estar ciente das trajetórias da carga de modo que os componentes sejam suportados com deflexão mínima. Os componentes principais que necessitam ser analisados são o motor e o piloto porque estas duas massas são quase dois terços da massa total do veículo, componentes menores completam o peso restante.

13.2 Cargas Dinâmicas

As cargas dinâmicas do veículo são criadas na aceleração e desaceleração, que são provadas com a lei do Newton de $F=ma$. Quando o veículo está freando tem-se forças de grande intensidade produzidas pelos calibres do freio que pressionam os freios do disco. Quando for analisar estas forças de aceleração e desaceleração, a maioria da análise estará no piloto e no motor usando a lei do Newton.

$$F = m \cdot a$$

Onde:

F = Força aplicada;

m = massa do componente;

a = aceleração

Dos resultados dos anos precedentes nos EUA e Austrália no teste de aceleração, os veículos de competição alcançaram acelerações capazes de 0 a 100 km/h ao redor de 3 segundos. Supondo que a aceleração é constante a fórmula:

$$a = \frac{vf - vi}{dt}$$

Onde:

a = aceleração;

vf = velocidade final;

vi = velocidade inicial;

dt = tempo.

Quando 100 km/hora = 27,77m/s e a velocidade inicial forem 0.

$$a = \frac{27,77 - 0}{3} = 9,25 \text{ m/s}^2$$

Como a aceleração não é constante, um valor para a aceleração de 10 m/s^2 será usado para os cálculos. Com isso temos um baixo fator de segurança.

Cargas Radiais

Há muitas cargas radiais aplicadas ao chassi pelos componentes internos, quando o veículo realiza curvas. Isto é causado pelos componentes que querem continuar em uma linha reta quando o chassi mude de trajeto. Estas forças são muito difíceis de calcular sem registros físicos, testes e dados. A pesquisa de algumas equipes especifica que as forças no veículo de até 1,5 ' g ' podem ser alcançadas em seus veículos. Este valor pode ser usado para estimar as forças reais que podem ser experimentadas pelo veículo sob estas circunstâncias. Para estimar as forças que agem através dos centros de gravidade individuais de cada componente, a segunda lei de Newton pode ser aplicada uma outra vez.

$$F = m \cdot a$$

Onde :

F = Força aplicada;

m = massa do componente;

a = aceleração (gravidade x 1,5)

gravidade = $10m/s^2$

Cargas Torsonais

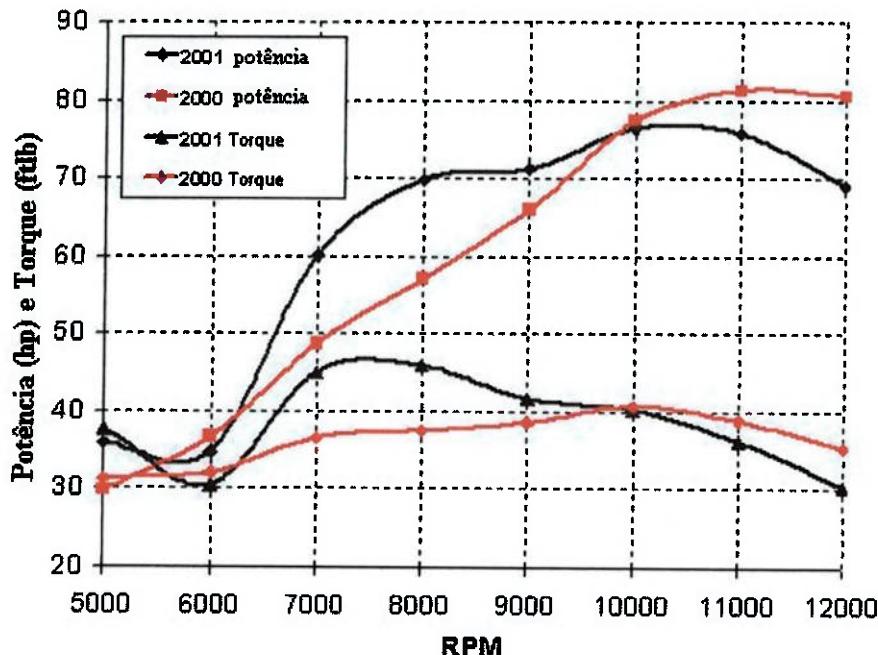


Gráfico 2 - Torque versus rpm e potência versus rpm motor de uma equipe formula SAE.

Quando o veículo acelera, o motor produz o torque que começa amplificado pelo eixo motor e transmitido ao solo através dos pneus. Este torque também tem que ser neutralizado pelo motor através do chassis. O torque máximo produzido pelo motor pode ser encontrado na carta do desempenho do torque do poder do motor mostrada no gráfico 2 (utiliza-se o de 2001). Este gráfico mostra que o motor produz um torque máximo de 48 Ft.Lbs qual é equivalente a 66N.m em 7200RPM. Este torque máximo será aplicado ao veículo quando está saindo do repouso e o motor estar na primeira engrenagem, que terá então uma relação da engrenagem de 2,85: 1. O torque será amplificado também sendo transferido através da engrenagem de da primeira marcha em uma relação de 1,7:1 e outra vez através da movimentação ao eixo traseiro que tem uma relação fixa de 4,6:1 uma vez o torque foi transferido ao eixo traseiro que pode então ser transmitido ao solo através das rodas. Parte do torque será perdida através do deslizamento dos pneus e da embreagem.

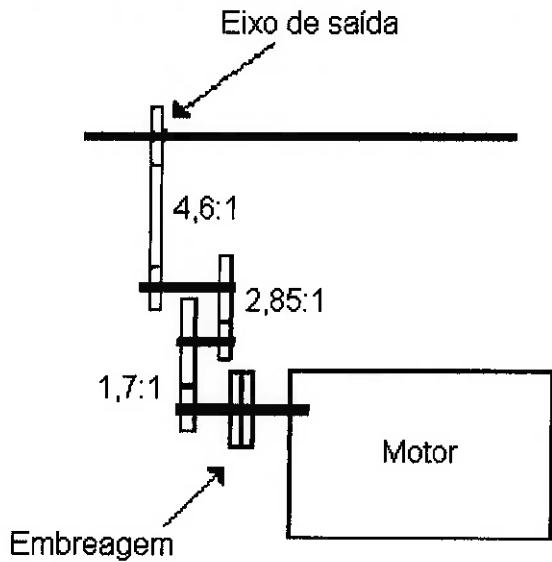


Figura 55 – Esquema das relações de transmissão de um veículo Formula SAE

Torque do motor

Torque produzido pelo motor = 66 N · m

Torque na primeira relação = torque do motor X 1^a relação de engrenagem

$$\begin{aligned} &= 66 \cdot 1,7 \\ &= 112,2 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

Torque na segunda relação = torque da 1^a relação de eng. X 2^a relação de eng.

$$\begin{aligned} &= 112,2 \cdot 2,85 \\ &= 319,8 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

Torque na relação fixa = torque da 2^a relação de eng. X relação fixa

$$\begin{aligned} &= 319,8 \cdot 4,6 \\ &= 1471,1 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

Esta carga é produzida nas rodas traseiras, mas tem que ser neutralizada pela estrutura, pois o motor é mantido berço de motor.

Cargas Torsonais da frenagem

Quando o veículo está freando forças de grande intensidade são produzidas pelos compassos de calibre do freio que pressionam nos freios do disco. Estas forças de frenagem são as maiores forças no Formula Sae e produzem um alto momento devido à natureza girante dos discos de freio. Estas cargas são transmitidas através dos braços da suspensão da estruturas nas rodas dianteiras e através da montagem do compasso de calibre nas rodas traseiras. Sabendo a alta velocidade do veículo e o tempo para o veículo vir a parar, fornecerá dados suficientes para calcular as cargas de frenagem usando o teorema do impulso.

$$F = \frac{m \cdot vf - m \cdot vi}{dt}$$

Onde :

F = Força aplicada;

m = massa do veículo;

v = velocidade final e inicial do veículo

dt = tempo

Assumindo que a frenagem de 100km/h a 0 km/h em 3s, tem-se:

$$F = \frac{230 \cdot 0 - 230 \cdot 27,7 \text{ m/s}}{3} = 2123,7$$

Esta carga tem que ser distribuída através dos 3 discos do freio, predominantemente nos 2 dianteiros. Estima-se então que cada disco dianteiro receberia 1000N da força. Supondo os discos dianteiros tenha diâmetro externo de 190 mm a força pode ser transferida a um momento de 95 N.m a ser transmitidos pelos 2 braços de suspensão.

13.4 Definição das cargas

Estas são aproximações das cargas que podem ser experimentadas pela estrutura de um formula SAE. Deve-se notar que todas estas cargas estão calculadas em suposições, entretanto são similares às cargas reais produzidas. Os valores obtidos ignoram alguns fatores menores e ressaltam os valores que venham produzir cargas máximas em todos os casos, e deste modo a estrutura é capaz de suportar todas as situações possíveis.

Cargas estáticas

Massa do motor e transmissão = 60 Kg

Massa do piloto = 68 Kg

Massa da estrutura e componentes internos = 50 kg

Massa não suspensa = 52 kg

Massa total do veículo = 230 kg

Estas cargas serão aplicadas no sentido da gravidade através do berço do motor e através do assento. A suspensão deve prender a massa total do chassi e todos os componentes.

Aceleração e desaceleração

A aceleração e as forças de frenagem são cargas aplicadas no veículo devido a inércia dos componentes do veículo. Estas forças são transmitidas por todos os componentes no ponto de fixação na estrutura. Estas forças necessitam ser analisadas para assegurar de que não existam forças extras relevantes aplicadas à estrutura. Deste modo, uma outra vez, serão levados em consideração o motor e o piloto que representam quase dois terços da massa total do veículo.

Motor

Força de aceleração no motor = Massa do motor x aceleração

$$= 60 \times 10 \text{m/s}$$

$$= 600 \text{ N}$$

Quando o veículo está acelerando a força estará no sentido oposto do curso do veículo e será transferida através do berço do motor e transmissão.

Força de desaceleração no motor = Massa do motor x desaceleração

$$= 60 \times 10 \text{m/s}$$

$$= 600 \text{ N}$$

Esta força estará no sentido do curso do veículo e tem que também ser suportada pelo berço do motor e transmissão.

Piloto

Força de aceleração no piloto = Massa do piloto x aceleração

$$= 68 \times 10 \text{m/s}$$

$$= 680 \text{ N}$$

Esta força do piloto será distribuída extensamente através do assento e dos pontos de fixação do assento uma parte da carga será transferida também através do cinto e do volante, as cargas estarão no sentido oposto do curso do veículo.

Força de desaceleração no piloto = Massa do piloto x desaceleração

$$= 68 \times 10 \text{m/s}$$

$$= 680 \text{ N}$$

Esta força estará no sentido do curso do veículo e a carga terá que ser suportada inteiramente pelo cinto do piloto.

Cargas em curvas

Devido à aceleração centrípeta existem forças dirigidas para a parte externa da curva. Esta força é proporcional à velocidade em que o veículo viaja durante a trajetória curva. A aceleração centrípeta é medida freqüentemente em termos de gravidade ou de forças G. A aceleração utilizada para estimar as forças aplicadas na estrutura será de 1,5 G como dito anteriormente.

Motor

Força horizontal produzida = Massa do motor x (gravidade x 1,5)

$$\begin{aligned} &= 60 \times (9,81 \times 1,5) \\ &= 883 \text{ N} \end{aligned}$$

Esta força será aplicada em 90 graus ao sentido do curso do veículo. Os pontos de fixação do motor terão que distribuir esta carga à estrutura.

Piloto

Força horizontal produzida = Massa do motor x (gravidade x 1,5)

$$\begin{aligned} &= 68 \times (9,81 \times 1,5) \\ &= 1000,6 \text{ N} \end{aligned}$$

Esta força será aplicada também em 90 graus ao sentido do curso do veículo e será transmitida a estrutura através do assento e cinto.

13.5 Critérios de Tensão

As tensões excessivas na estrutura podem causar a deformação por deflexão, flambagem, deformações plásticas e eventualmente a falha. Por isto é importante compreender os princípios de tensão e o modo que transferidos através da estrutura. A compreensão dos trajetos da carga através da estrutura pode também substancialmente influenciar o projeto dos tubos.

13.5.1 Tensão Axial ou Normal

A tensão axial ocorre quando as cargas são aplicadas perpendicularmente à superfície de corte das barras. Desta forma, tensões normais podem ser forças de tração ou de compressão. A tensão axial é muito comum nas estruturas tubulares porque são feitas de uma série de membros retos, muitos estão no sentido das forças aplicadas.

Um membro tracionado é como uma barra reta da estrutura sujeita sujeito a duas forças que tentam esticar o material. Assumindo que as tensões são uniformemente distribuídas sobre a seção transversal, vemos que a força de tração resultante deve ser igual à intensidade a tensão vezes a área da seção transversal da barra. Dessa forma, obtemos a seguinte expressão para a magnitude das tensões:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Onde:

σ = tensão normal

P = carregamento;

A = área da seção transversal

Um membro comprimido é como uma barra reta da estrutura sujeita sujeito a duas forças que tentam comprimir o material. As teorias fundamentais de flambagem aplicam-se as barras que vão sofrer compressão, porque a barra falhará. Isto é porque as barras que sofrem compressão se tornam interesse principal quando as cargas normais são analisadas.

O comprimento da barra é muito crítico ao modelar a flambagem, porque todas as barras da estrutura são soldadas em ambas as extremidades então assume-se que o comprimento eficaz pode ser reduzido a:

$$Le = 0,7L$$

Este comprimento eficaz pode então ser usado na equação clássica de Euler:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_e^2}$$

Onde:

P_{cr} = carga crítica

E = módulo de Elasticidade

I = momento de inércia

L_e = comprimento efetivo

Esta equação supõe que a barra é perfeitamente reta e homogênea. Se a barra for sujeito a uma carga abaixo da carga crítica P_{cr} pode defletionar ligeiramente, mas o momento elástico interno remanescerá adequado e a barra irá voltar a se tornar reta quando a carga for removida. Quando a carga crítica P_{cr} é excedida o deslocamento lateral produzirá o momento de dobra excêntrico maior do que o momento restaurador elástico interno tendo por resultado a falha da barra e não se pode carregar a barra por um tempo maior que esse.

13.5.2 Deflexão

Os capítulos precedentes têm explicado os efeitos indesejáveis da deflexão dentro do chassi. Entretanto, se o chassi fosse construído de modo que nenhuma deflexão ocorresse, requereria quantidades extensivas de material tendo por resultado o peso adicional.

A deflexão pode ser causada por muitas tensões diferentes, tais como forças axiais na tração ou na compressão e mesmo nas tensões de torção causada a torção ou a rotação. A análise da deflexão pode então se tornar cada vez mais complicada com a introdução de forças biaxiais.

$$\delta = \frac{P \cdot L}{E \cdot A}$$

Onde: δ = deflexão

E = módulo de Elasticidade

P = carga

L = comprimento

A = Área da seção transversal

13.5.3 Dobras

As tensões da dobra ocorrem quando um membro é sujeito a um momento. Este momento faz com que um lado do membro esteja sob tração quando o outro estiver na compressão. A tensão da dobra pode ser usada-se calculado:

$$\sigma_b = \frac{Mx \cdot y}{Ix}$$

Onde: σ = tensão da dobra

Mx = momento de dobra sobre a linha neutra central

y = distância da linha neutra central.

Ix = momento de inércia da seção transversal sobre a linha neutra central.

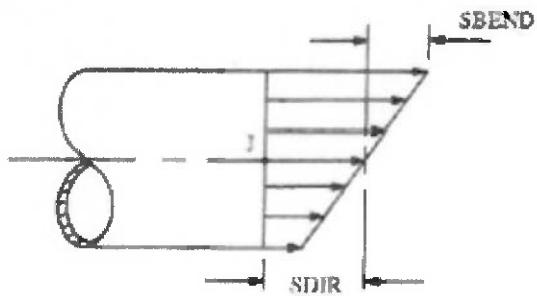


Figura 56 - Tensão da dobra

Como mostrado na figura 56, a tensão máxima da dobra ocorre na extremidade. Para situações de dobra, somente é importante ter material nas extremidades, pois este é o local em que se tem a máxima tensão. Por isso, os tubos ocos são materiais excelentes para resistir a tensões de dobra. As tensões de dobra são comuns no chassi devido aos momentos de grande intensidade causados por componentes tais como o motor e a transmissão, assim como outras forças dinâmicas causadas pelo veículo dinamicamente.

3.5.4 Análise de Tensão

As tensões podem ser medidas e calculada usando várias técnicas. Os métodos comuns usados devem aplicar cargas fisicamente ao chassi e medir as deflexões. Quando a deflexão é sabida a tensão pode ser calculada. As tensões podem também ser calculadas usando fórmulas e cálculos simples à mão, mas esta requer geralmente muitas simplificações. Quando estruturas complexas tais como chassis são analisados, as fórmulas tornam-se muito grandes e complexas, consequentemente programas de computador são requeridos para calcular as tensões envolvidas.

Quando tiver os testes físicos e numéricos do chassi do formula SAE. Deve-se analisar para calcular as tensões reais que puderam ser experimentados no chassi sob condições de corrida. Usando ambos os métodos, as comparações podem ser feitas para verificar a exatidão dos resultados.

Testes Numéricos

Por causa da complexidade do chassi tubular, a realização de cálculos numéricos seria extremamente longa. Consequentemente os testes numéricos serão terminados usando o software de análise de elementos finitos (FEA). Este software permite que os cálculos numéricos complexos sejam executados em tempo hábil. Os ajustes das propriedades dos materiais requeridos para conduzir FEA, podem ser freqüentemente complicados para simular as circunstâncias reais.

Testes Físicos

Alguns testes físicos devem ser conduzidos no chassi, mas empreendidos simplesmente para verificar os resultados do FEA. Testes físicos asseguram também que não haja nenhuma falha crítica no chassi.

14. SELEÇÃO DE MATERIAL

Esporte a motor é uma competição altamente contestada onde as equipes procuram encontrar vantagens para aumentar o desempenho dos veículos. Materiais diferentes para o chassi podem reduzir o peso do veículo, melhorando a eficiência do veículo no quesito de relação de transmissão. A seleção de material pode também fornecer vantagens reduzindo a deflexão das barras e pode determinar a quantidade de reforço requerida.

As regras do formula SAE não permitem o uso de ligas de titânio para a construção do chassi, mas são permitidos todos os demais materiais. Os materiais para construção de uma estrutura tubular praticável incluiriam:

- Aços carbono lisos;
- Aços liga;
- Alumínio;
- Compostos da fibra.

14.2 Especificação dos materiais

Para reforçar uma estrutura segura para o veículo, as regras do Formula SAE especificam uma linha base de matérias para as barras chaves do veículo indicando que o tubo de aço deve ser redondo, liga e conter um mínimo de 0,1% carbono.

O diâmetro externo deve ser no mínimo de 25,4mm para os arcos de proteção e ter uma espessura de parede de 2,4mm. Em seções diferentes do chassi é permitido ter diâmetros diferentes, mas para simplificar a fabricação do chassi deve-se construí-lo do mesmo material.

Uma geometria alternativa da tubulação pode ser usada além da linha base, como especificado na regra do formula SAE 2005. Esta regra permite que tubos de maior diâmetro sejam usados com uma espessura de parede menor. Mesmo com um tubo do diâmetro maior a espessura de parede mínima é restrita a 2,1mm. Não é permitido o uso de aços de desempenho elevado e consequentemente todos os aços devem ser tratados igualmente.

Quando a equipe usar tubos de maior diâmetro o tubo escolhido deve ter um equivalente, ou maior módulo de flambagem do que o material da linha de base

como especificado na regra do formula SAE 2005. A equação para calcular o módulo de flambagem é dada por:

$$\text{Módulo de flambagem} = E \cdot I$$

Onde:

$$\begin{aligned} E &= \text{módulo de elasticidade} \\ I &= \text{Momento de Inércia} \end{aligned}$$

Porque todos os aços têm que ser tratados igualmente o módulo de elasticidade deve ser o mesmo. Conseqüentemente:

$$I_{\text{linhabase}} = I_{\text{novo}}$$

Onde se for um tubo é dado por:

$$I = \frac{\pi}{64}(de^4 - di^4)$$

Onde:

de = diâmetro externo

di = diâmetro interno

Tabela 19 - Escalas da porcentagem de carbono para o aço carbono liso

Aço baixo carbono	Abaixo de 0,05% de carbono
Aço Doce	Entre 0,05% e 0,3% de carbono
Aço médio carbono	Entre 0,25% e 0,6% de carbono
Aço alto carbono	Entre 0,55% e 1,1% de carbono

De acordo com as regras, o tubo de diâmetro de 31,75mm pode ser usado com uma espessura de 2,1mm e ainda ter um módulo de flambagem ligeiramente maior do que o da linha base de 25.4mm.

14.3 Seleção de material

14.3.1 Aço

Aço liga de carbono

O aço é uma liga de ferro e de carbono altamente versátil. Outros elementos tais como o silicone, manganês, enxofre, molibdênio, fósforo, níquel e cromo, podem ser adicionados à liga para melhorar as propriedades materiais. O aço pode ser dividido em dois grupos principais: Carbono liso ou aço não ligado e aço liga. Muitos formulários diferentes de aço estão disponíveis dependendo da composição individual dos elementos.

Os aços carbono lisos contêm o carbono como elemento de liga principal com quantidades pequenas de outros elementos adicionadas. A resistência do aço de carbono liso aumenta com a porcentagem de carbono como mostrado na figura 57 abaixo. Enquanto que um aumento no carbono melhora a resistência do material, diminui sua ductilidade que o torna mais suscetível à fratura frágil. No grupo liso do aço carbono há três tipos principais que são classificados dependendo de sua porcentagem de carbono.

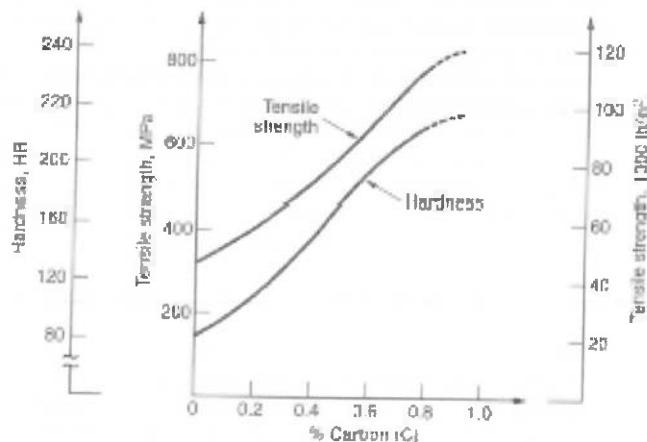


Figura 57 - Tensão e dureza de aços carbono lisos

- **O aço de baixo carbono** é o aço o mais usado porque é também o mais barato. O aço de baixo carbono é fácil de dar forma e moldar. É usado geralmente para as aplicações onde não são requeridas forças elevadas.
- **O aço de médio carbono** está entre aços de baixo e elevado carbono, e tem resistência elevada e consegue ter ainda alguma ductilidade. Fornece ainda a força moderada e manter a conformabilidade.
- **O aço de elevado carbono** é especificamente para as aplicações elevadas de força onde a rigidez e a dureza são necessárias. Os aços de elevado carbono tem também uma resistência elevada ao desgaste.

Os tratamentos térmicos e os processos conformação realizados nestes aços podem melhorar suas propriedades de dureza e/ou de tenacidade, dependendo dos métodos usados.

Aços Liga

Os aços liga são os aços de ferro-carbono que contêm elementos significativos adicionados na liga. Os aços liga tem propriedades mecânicas superiores aos aços carbono lisos. Os elementos de liga que são adicionados incluem o cromo, o manganês, o molibdênio, níquel e o vanádio. A porcentagem dos elementos adicionados a liga podem influenciar as propriedades mecânicas como o aumento da resistência, a dureza, a dureza a quente, a resistência ao desgaste e a resistência a fatiga..

- **O aço inoxidável** é o nome genérico para um número de aços liga diferentes usados primeiramente para resistência à corrosão. O aço inoxidável deve ter um mínimo do cromo de 12%, sendo este o elemento chave. Embora os outros elementos, particularmente níquel e molibdênio sejam adicionados para melhorar a resistência de corrosão. A vantagem principal a usar um aço que seja resistente à corrosão é que este terá uma vida extremamente longa. A desvantagem da aplicação do aço inoxidável é que este é muito caro.
- **O cromo molibdênio SAE4130** é um aço liga que contem o silicone, o cromo e o molibdênio. Estes elementos ligados dão uma resistência superior quando comparado a outros aços comuns. Esses elementos fornecem também uma barreira protetora dentro do aço o que acarreta em um aumento da resistência a corrosão. Uma outra vantagem do aço cromo molibdênio é que a tem uma capacidade de solda muito boa. A desvantagem do aço cromo molibdênio é que este aço é frágil e consequentemente pode desgastar quando exposta às cargas flutuantes. O cromo molibdênio é também muito caro e tem-se grande dificuldade para se encontrar um fornecedor.

14.3.2 Alumínio

Alumínio é um metal não ferroso com resistência a corrosão muito elevada e é muito leve quando comparado aos aços. O alumínio não tem a mesma resistência do aço, mas a relação resistência-peso pode torná-la competitiva em determinadas aplicações de tensão. O alumínio pode também pode ser ligado ou ser tratado termicamente para melhorar as propriedades mecânicas, que pode tornar o alumínio muito mais competitivo com aços, entretanto o custo aumenta dramaticamente.

As ligas de alumínio são disponíveis no mercado, mas são materiais especiais. Estas ligas são extremamente resistentes e leves quando comparados aos outros materiais. Além de o alumínio ser muito caro estes não estão prontamente disponíveis em tubos.

As ligas de alumínio são aplicadas nas seguintes áreas: forças armadas, aviação e aeroespacial.

14.4 Produção do tubo

As seções de aço oca podem ser produzidas por muitos métodos diferentes. Estes métodos podem também influenciar as propriedades mecânicas do material.

14.4.1 Tubos extraídos a frio sem emenda

O tubo (C.D.S.) sem emenda extraído a frio é produzido pelo método de perfuração. Um tarugo aquecido move-se através dos rolos de pressão enquanto é dirigido sobre um mandril estacionário gerando como produto um tubo sem emenda. Esta seção oca é então extraída a frio através de dados das dimensões terminadas e a precisão requerida. A tubulação sem emenda extraída fria foi uma vez um dos tubos mecânicos com uma alta performance no mercado, mas agora são tem desempenho similar ao Trefilado a frio.

O processo de manufatura produz tolerâncias excelentes, propriedades mecânicas, e defeitos de superfície reduzidos. As propriedades da dureza e da resistência são aumentadas também pela quantidade de redução de temperatura.

As propriedades dos materiais do C.D.S. cumprem as exigências do chassi, porém os custos desses materiais não justificam seu uso quando comparado a outros materiais.

14.4.2 Tubos Soldados à resistência elétrica

Os tubos soldados à resistência elétrica (E.R.W.) é o tipo mais barato e o mais comum do tubo de aço disponível. O processo de soldagem envolve ligeiramente uma costura e produz uma solda contínua fina ao longo da sobreposição. O processo de soldagem não envolve nenhum material de enchimento (que seria adicionado na ligação do tubo). A temperatura de fundição é produzida aplicando a corrente elétrica na sobreposição que funde as duas camadas. Este processo é feito continuamente usando os elétrodos enrolados em rodas que pressionam o tubo como mostrado na figura 58.

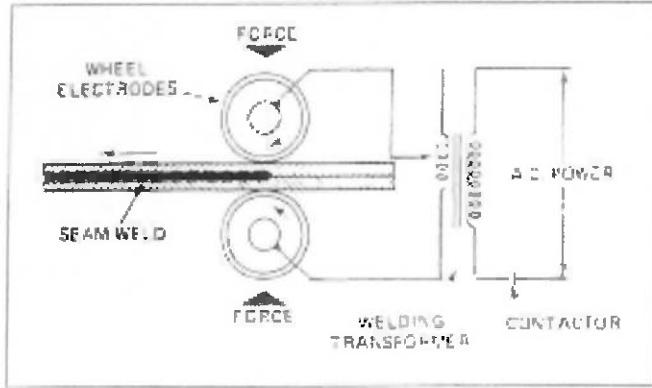


Figura 58 - Processo de emenda por soldagem

14.4.3 Processo de Trefilação a Frio

Como no Brasil é mais comum este tipo de produção de tubos, aqui se terá o estudo detalhado desta produção.

O processo de deformação a frio, consiste em reduzir a secção transversal do tubo através de uma força de tração, utilizando ferramental externo (fieira) e interno (mandril), conforme desenho abaixo.



Figura 59 - Esquema do ferramental utilizado na trefilação

O tubo a trefilar primeiramente recebe um tratamento térmico, depois é decapado, fosfatizado e lubrificado antes da trefilação.

Entre o diâmetro interno da fieira e o externo do mandril forma-se uma coroa circular, que corresponde a espessura da parede desejada, através da qual se traciona o tubo a trefilar.

Neste processo, se reduz o diâmetro e a espessura, como também melhora a superfície interna e externa. Através da trefilação a frio, ocorre um encruamento do material, isto é: o limite de escoamento, a dureza e a resistência à tração aumentam e o alongamento diminui.

As empresas no Brasil estão capacitadas a oferecer tubos trefilados para diferentes aplicações, segundo normas ou critérios solicitados mediante prévia consulta.

Dimensões e tolerâncias

Para dimensões de diâmetros e espessuras, assim como as suas respectivas tolerâncias, são conformes as normas NBR 5599 e NBR 8476.

O peso dos tubos pode ser calculado pela fórmula abaixo:

$$P = (D - e) \cdot e \cdot 0,02466$$

Onde:

P = Peso teórico em Kg/metro.

D = diâmetro externo em mm.

e = espessura de parede em mm.

0,022466 = constante

Exemplo: tubo 40 x 2 mm

$$P = (40 - 2) \cdot 2 \cdot 0,02466 \Rightarrow P = 1,874Kg / m$$

Tabela 20 - Estado de Fornecimento

Identificação	Denominação	Explicação
BK / TD	Trefilado Duro	Nenhum tratamento térmico após a deformação a frio.
BKW / TM	Trefilado Macio	Após o tratamento térmico segue uma leve redução de acabamento (trefilação à frio). O tubo dentro de certo limite pode ser curvado/expandido.
GBK / RD	Recozido	Os tubos são recozidos em fornos com atmosfera controlada.
NBK / ND	Normalizado	Os tubos são normalizados em fornos com atmosfera controlada em temperatura acima da zona crítica.

Acabamento

Retilineidade

Para diâmetros externos maiores que 15 mm, é garantida uma flecha máxima de 0,25% do comprimento, menores que 15 mm, não há como garantir a retilineidade, sendo a mesma verificada visualmente.

Tolerâncias para comprimento de fabricação

Os tubos em geral são fabricados em comprimentos de 3 a 7 m. Para comprimentos fixos e múltiplos a tolerância deverá ser previamente acordada.

Ensaios

Os tubos podem ser fornecidos sob consulta prévia contemplando os seguintes testes:

- . Hidrostático
- . Elétrico Não Destrutivo (Eddy Current ou por Partículas Magnéticas)
- . Charpy
- . Outros

Superfície

Os tubos são lisos, externo e internamente, podendo apresentar pequenos poros provenientes da condição superficial da matéria-prima utilizada.

Tubos nos estados de fornecimento BK e BKW podem ter nas superfícies interna e externa, uma camada de lubrificante (estearato de zinco) aderida pela trefilação.

As maiorias das empresas no Brasil possuem tecnologia para garantir em seu processo de fabricação parâmetros de rugosidade controlada.

As extremidades são fornecidas com corte perpendicular ao eixo do tubo, isentas de rebarbas. Os tubos NBK e GBK podem ter superfícies escuras provenientes do tratamento térmico.

Certificado

Mediante solicitação, os tubos podem ser fornecidos com certificados que atestam a análise dimensional, composição química e as propriedades mecânicas.

14.4.3.1 Tubos de Aço Trefilado com Costura

Norma

NBR 5599/95 - DIN 10305-02/03 (antiga DIN 2393)

Medidas

Diâmetro Externo: 6 mm a 215 mm - Espessura: 0,50 mm a 9 mm

Aplicação

Utilizados para fins mecânicos, onde se exige exatidão dimensional e uniformidade de propriedades.

Nestes tubos geralmente é garantida uma superfície adequada e de boa qualidade, após tratamento prévio, para cromar, zinchar, pintar, etc..

Estes tubos são também adequados para uso em tubulações de equipamentos hidráulicos, cardans, móveis e autopeças.

Tabela 21 - Tipos de Aço e Composição Química, conforme NBR 5599/95

Grau do Aço	C (%) máx.	Mn (%) máx.	P (%) máx.	S (%) máx.
A0	0,23	0,90	0,05	0,05
A1	0,15	0,60	0,04	0,04
A2	0,15 - 0,23	0,30 - 0,90	0,04	0,04
A3	0,22	1,60	0,04	0,04

Tabela 22 - Propriedades Mecânicas, conforme NBR 5599/95

Grau do Aço	Trefilado Duro (TD/BK)		Trefilado Macio (TM/BKM)		Recozido (RB/GBK ou RD/GZF)		Normalizado (NB/NBK ou ND/NZF)		
	Resistência à tração mín. (MPa)	Alongamento % mín.	Resistência à tração mín. (MPa)	Alongamento % mín.	Resistência à tração mín. (MPa)	Alongamento % mín.	Resistência à tração mín. (MPa)	Límite de escoamento mín. (MPa)	Alongamento % mín.
A0	400	6	350	12	270	25	290 mín.	200	20
A1	420	6	360	11	310	26	320 - 440	215	28
A2	520	5	450	8	390	21	410 - 540	255	21
A3	590	4	540	6	490	22	490 - 630		

14.4.3.2 Tubos de Aço Trefilado sem Costura

Norma

NBR 8476/84 - DIN 10305-01/03 (antiga DIN 2391)

Medidas

Diâmetro Externo: 6 mm a 240 mm - Espessura: 0,50 mm a 20 mm

Aplicação

Estes tubos são aplicáveis em conjuntos estruturais mecânicos, máquinas, sistemas fluidodinâmicos e em operações onde são exigidos alto grau de precisão e boa qualidade de superfície.

Tabela 23 - Tipos de Aço e Composição Química, conforme NBR 8476/84

Graus de Aço	Análise de corrida (%)				
	C	Mn	Si	P	S
A1	0,18 máx.	0,25 - 0,60	0,35 máx.	0,04 máx.	0,05 máx.
A2	0,18 - 0,28	0,30 - 0,60	0,10 - 0,35	0,04 máx.	0,05 máx.
A3	0,28 - 0,38	0,40 - 0,90	0,10 - 0,35	0,04 máx.	0,05 máx.
A4	0,10 - 0,21	1,00 - 1,60	0,10 - 0,55	0,04 máx.	0,05 máx.

Nota: Os aços mais utilizados são: SAE 1010, SAE 1020, SAE 1021, SAE 1035, SAE 1045, A53, A106 e ST52, todavia, as empresas recomendam consulta prévia.

Tabela 24 – Propriedades Mecânicas, conforme NBR 8476/84

Grau do aço	Trefilado Duro (TD/BKM)		Trefilado Macio (TM/BKM)		Recozido (RB/GBK ou RD/GZF)		Normalizado (NB/NBK ou ND/NZF)		
	Resistência à tração mín. (MPa)	Alongamento % mín.	Resistência à tração mín. (MPa)	Alongamento % mín.	Resistência à tração mín. (MPa)	Alongamento % mín.	Resistência à tração mín. (MPa)	Límite de escoamento mín. (MPa)	Alongamento % mín.
A0	450	6	380	10	320	28	350/450	240	25
A1	550	5	480	8	400	24	450/550	260	21
A2	650	4	-	-	500	18	550/650	300	17
A3	600	4	550	6	500	24	520/620	360	22

14.4.3.3 Tubos especiais

Materiais e Aplicações

Os tubos especiais trefilados podem ser fornecidos com ou sem tratamento térmico. Os aços mais utilizados são: SAE 1008; SAE 1010; SAE 1012; SAE 1020; SAE 1021; ST 52; e SAE 1026. Além dos materiais acima, os tubos podem ser fabricados com outros aços como os do tipo estrutural de alta resistência à corrosão atmosférica.

Propriedades Mecânicas

Para estes tubos, os valores de propriedades mecânicas são determinados mediante acordo entre o cliente e a empresa fabricante, e dependem da aplicação e do aço utilizado. Assim, os valores de resistência à tração podem variar de acordo com o tipo de aço utilizado e o processo de trefilação previamente estabelecido pela Engenharia de Processos e Desenvolvimento.

Acabamento

Além do estado de fornecimento e dos acabamentos previstos nas Normas NBR 5599/ 8476, os tubos podem ser fornecidos com a superfície externa lisa, própria para retífica, brunimento, cromeação, pinturas e outros.

14.4.3.4 Perfil Tubular de Aço Carbono

Norma

NBR 8261 - ASTM A500 - com ou sem costura seção quadrada, circular, retangular para usos estruturais.

Medidas

Tubos quadrados: geralmente de 20 x 20 mm até 200 x 200 mm

Tubos retangulares: geralmente de 20 x 30 mm até 140 x 220 mm

Espessuras: Geralmente de 1,50 até 12,70 mm

São tubos utilizados principalmente para fins estruturais e em indústrias de máquinas, equipamentos, móveis, etc.

Materiais e fabricações

São fabricados com aço SAE 1008/1026 deformados a frio.

Tabela 25 - Tolerâncias dimensionais (conforme NBR 8261)

Dimensões Externas Especificadas D (mm)	Variação da dimensão externa para perfis tubulares, de seção circular, quadrada e retangular
D = 65	± 0,5 mm
65 < D = 90	± 0,7 mm
90 < D = 140	± 0,9 mm
D > 140	-

Notas:

- a) As medições devem ser feitas em posição localizadas a pelo menos 10mm das extremidades.
- b) Excluindo os perfis tubulares da seção circular, os afastamentos incluem a margem para o abaulado, convexidade ou concavidade.

Espessura da parede

Mais ou menos 10% para todas as espessuras.

Comprimentos e tolerâncias

Segundo as normas e fabricação

Retilineidade

O máximo desvio de retilineidade deve ser 2,5 mm por metro de comprimento.

Torção

São os seguintes os valores de especificações para torção:

Dimensão Lado Maior $D(\text{mm})$	Torção Máxima $V (\text{mm/m})$
$D = 38,0$	1,4
$38,0 < D = 63,5$	1,7
$63,5 < D = 101,6$	2,1
$101,6 < D = 152,4$	2,4
$152,4 < D = 203,2$	2,8
$D > 203,2$	3,1

Raio externo dos cantos

O raio externo de qualquer dos cantos não deve exceder três (3) vezes a espessura da parede.

Obs.: Em alguns casos, o raio poderá exceder o valor especificado acima.

Esquadros dos lados

Para tubos quadrados e retangulares os lados adjacentes podem se desviar mais ou menos dois graus do ângulo reto.

Propriedades mecânicas

Esta norma não especifica valores de propriedades mecânicas para os tubos com ou sem tratamento térmico; porém, pode-se esperar os seguintes valores:

Tabela 26 - Propriedades de Tração em Função do Grau

Características	Propriedades de Tração em Função do Grau					
	Seção Circular			Seções Quadrada e Retangular		
	A	B	C	A	B	C
Limite de Resistência Tração L _r mín. (MPa)	310	400	427	310	400	427
Limite de escoamento L _e mín. (MPa)	228	290	317	269	317	345
Alongamento (%) A4 (L ₀ = 50mm) mínimo	25(A)	23(B)	21(C)	25(A)	23(B)	21(C)

Nota: Os valores A, B e C são determinados em função do grau do aço da Norma NBR 8261.

14.5 Comparações

Para decidir o material mais apropriado para a construção da estrutura, todos os materiais necessitaram ser comparados assim como suas vantagens e desvantagens. Aços liga e as ligas de alumínio são provavelmente os materiais ideais porque suas propriedades são superiores a outras. O alumínio puro é também um material possível e é muito mais leve, mas não tem a mesma resistência que o aço liga para os esforços requeridos pela estrutura e necessitará de reforços estruturais. Este material extra aumenta o peso e reduz a vantagem do peso dos materiais. E quando requer solda o alumínio não poderá ser usado. Quando comparar o tubo de aço possível calcular as dimensões do tubo de 25.4mm x de 2.4mm e do tubo de 31.75mm x de 2.1mm onde as únicas dimensões do tubo consideraram.

Tubo 25,4mm x 2,4 mm

$$P = (25,4 - 2,4) \cdot 2,4 \cdot 0,02466 \Rightarrow P = 1,3612Kg/m$$

$$I = \frac{\pi}{64}(de^4 - di^4) = \frac{\pi}{64}(25,4^4 - 23^4) = 6695,05mm^4$$

módulo de flambagem = E · I

Tubo 31,75mm x 2,1 mm

$$P = (31,75 - 2,1) \cdot 2,1 \cdot 0,02466 \Rightarrow P = 1,5355Kg/m$$

$$I = \frac{\pi}{64}(de^4 - di^4) = \frac{\pi}{64}(31,75^4 - 29,65^4) = 11944,61mm^4$$

módulo de flambagem = E · I

Como a diferença de peso é mínima e a resistência a flambagem é maior no de diâmetro externo maior 31,75mm, visto que o módulo de elasticidade é o mesmo ($E=200$ GPa).

O material escolhido é o Aço liga 31,75mm x 2,1mm.

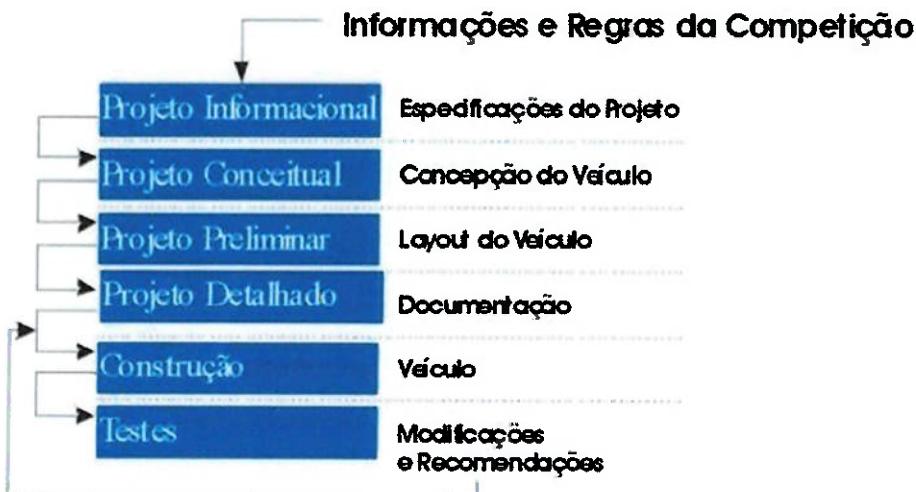
Os métodos diferentes da formação do tubo podem aumentar ou diminuir as propriedades materiais. O funcionamento frio aumenta a resistência, pois ao ter uma costura soldada tem-se a produção de uma área frágil. Como a extração a frio é um processo muito caro. E no Brasil é comum de o uso de trefilação a frio. Tem-se que o melhor para a equipe de formula SAE é o uso de tubo trefilado a frio sem costura.

A liga do material deverá ser escolhida de acordo com a norma NBR8476/84-DIN 10305-01/03 (antiga DIN 2391), e seguindo a tabela 26 tem-se que a melhor liga seria a da classificação A4.

15. METODOLOGIA DE CONSTRUÇÃO

15.1 Metodologia de projeto

No desenvolvimento do trabalho, recomenda-se utilizar uma adaptação da Metodologia de Projetos de Produtos Industriais proposta por Back, através da qual pretende-se reduzir o tempo de projeto, além de focar e contemplar de maneira mais eficiente possível as necessidades dos clientes internos, intermediários e externos. Pretende-se também diminuir de forma considerável o custo do projeto, devido ao planejamento de todas as etapas de produção, minimizando os custos com operações desnecessárias ou retrabalhos. Esta metodologia ficou composta das fases descritas a seguir.



15.1.1 O desenvolvimento do trabalho

O desenvolvimento do projeto prima pelo atendimento de todos os objetivos propostos, de modo a otimizar a segurança e a funcionalidade.

Tendo isso em vista, inicia-se por atender as exigências do regulamento, atentando principalmente para a geometria dos tubos e as exigências funcionais.

Para aumentar a rigidez estrutural do veículo, todos os nós devem ser posicionados onde as forças significativas oriundas dos subsistemas atuariam. A geometria da porção traseira deve ser adequada tanto para a fixação da suspensão quanto para a acomodação do conjunto de motor e transmissão.

A estrutura do carro bem projetado é o ultimo e maior item a constar em um desenho. Como um meio de conectar a montagem das partes, deve ser projetado para localizar cada uma das peças em posições nas quais elas sirvam com maior vantagem, e nas quais as forças envolvidas possam ser retiradas da maneira mais simples possível.

Considerando dessa maneira o chassi, sua finalidade principal é prover a montagem conveniente de todos os componentes do carro. Em ordem decrescente de magnitude, as principais forças envolvidas no carro, são:

- Suspensão traseira e o torque máximo;
- Suspensão dianteira e curvas;
- Motor e cambio;
- Tanque de combustível;
- Assentos e ocupantes, coluna de direção, pedais, e outros controles;
- Radiador;
- Bateria.

É o layout desses componentes que determina em grande parte o desenho do chassi, e nos primeiros estágios do planejamento a maior atenção deve ser dada à suspensão traseira e dianteira que deve caracterizar os pontos de aplicação de força dentro da estrutura.

15.1.2 O desenho preliminar

O projeto preliminar inclui também a configuração de sistema total, os diagramas esquemáticos básicos e a disposição. A primeira etapa é a de assegurar-se de que os parâmetros de controle são conhecidos, e estes incluem:

- Regras do formula SAE;
- As restrições dos outros componentes na estrutura;
- As finanças da equipe;
- Tempo de projeto.

Os primeiros projetos foram esboçados usando o software Microstation no computador tridimensionalmente. Durante este estágio do projeto o chassi inteiro foi projetado mesmo através do tipo do motor e o formato traseiro da suspensão ainda não precisa estar decidido. O volume requerido para a habitáculo do piloto requer dados dos fatores humanos, que foi obtida através de idéias de ergonomia.

Durante o projeto preliminar, diversos estilos possíveis do chassi foram considerados, mas todos de acordo com os parâmetros requeridos de controle. Este projeto progrediria então completamente ao estágio seguinte do projeto.

15.1.3 Construção do protótipo e redesenhar

Para o habitáculo tem-se a dificuldade de projetar o chassi para fatores humanos permitindo o conforto do piloto. Então se envolve as análises de ergonomia do compartimento onde estará o corpo do piloto. Um protótipo real do tamanho da cabina do piloto deve ser construído então de madeira, de PVC ou de fios. Isto permitirá que os pilotos sentem fisicamente no habitáculo do piloto e então pode-se definir alguns componentes, tais como o assento, a direção e a suspensão dianteira poderiam se alocar na estrutura. A Figura 60 mostra alguns protótipos com um piloto, testando os parâmetros de conforto humano estaticamente.

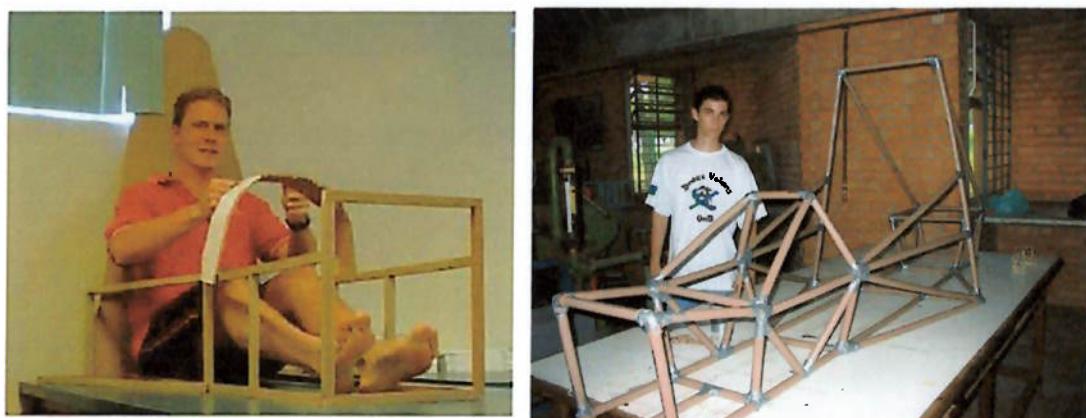


Figura 60 - Protótipos de estruturas de formula SAE

Uma vez que o protótipo tenha sido testado, as modificações e os ajustes poderiam ser incluídos no projeto. A adição destas melhorias é conhecida como reprojeto. Sem o protótipo muitas mudanças de projeto não seriam possíveis e conduziriam problemas no veículo construído.

A seguir estão algumas mudanças que podem ser realizadas após a construção do protótipo:

- Alargar o arco dianteiro (conforto do joelho do piloto);

Alargar o arco de proteção principal (permitir um assento maior para proteger os ombros do piloto)

Aumentar o bico do veículo (para alocar os pedais e os cilindros mestres do freio).

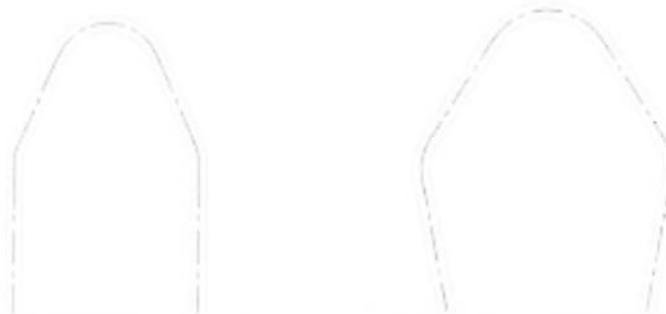


Figura 61 - Mudanças feitas no arco dianteiro



Figura 62 - Mudanças feitas no arco de proteção principal

15.1.4 Projeto Detalhado

A finalidade da fase detalhada do projeto é desenvolver um desenho e as especificações que descreva completamente o projeto final. É neste estágio do projeto onde cada parte do chassi é especificada em detalhe. É também durante este estágio em que as exigências dos componentes são incorporadas no projeto.

O projeto detalhado inclui também as especificações que relacionam:

- Parâmetros do piloto;
- Exigências de manutenção;
- Exigências do material;
- Confiabilidade do projeto;
- Vida útil do chassi.

O projeto detalhado deve ser terminado com desenhos detalhados para permitir a manufatura da estrutura, assim como desenhos de conjunto e desenhos de fabricação do chassi.

Uma vez que o modelo contínuo seja aprovado os desenhos detalhados foram produzidos então para a manufatura.

Geralmente tem-se muito poucas especificações do produto final do chassi alocadas no projeto detalhado porque foram ajustados antes do projeto ou como parte das regras do formula SAE.

A manutenção requerida no chassi é muito pequena com exceção de observar as soldas e possíveis rachaduras. Se uma rachadura for encontrada em uma solda então a solda deverá ser removida e o tubo deve ser soldado novamente. As exigências do material foram especificadas também na confiabilidade da seleção do material. O projeto do chassi requer uma confiabilidade elevada devido à natureza severa da falha se uma ocorrer. A vida útil do chassi é relacionada próxima à confiabilidade dos tubos. Para a maioria das estruturas de veículos Formula SAE a vida do chassi é terminada devido a colisões.

A parte do projeto detalhado deve garantir que as regras e os regulamentos do formula SAE sejam assegurados.

Além disso, é recomendável projetar subsistemas do veículo de forma que possam ser fabricados independentemente da estrutura (sub-assembly). Isso descentraliza a fabricação, facilita a manutenção e montagem. Além disso, rende vários pontos nas provas estáticas.



Figura 63 – Ilustração do sub-assembly de subsistemas

Abaixo estão os desenhos finais da estrutura.

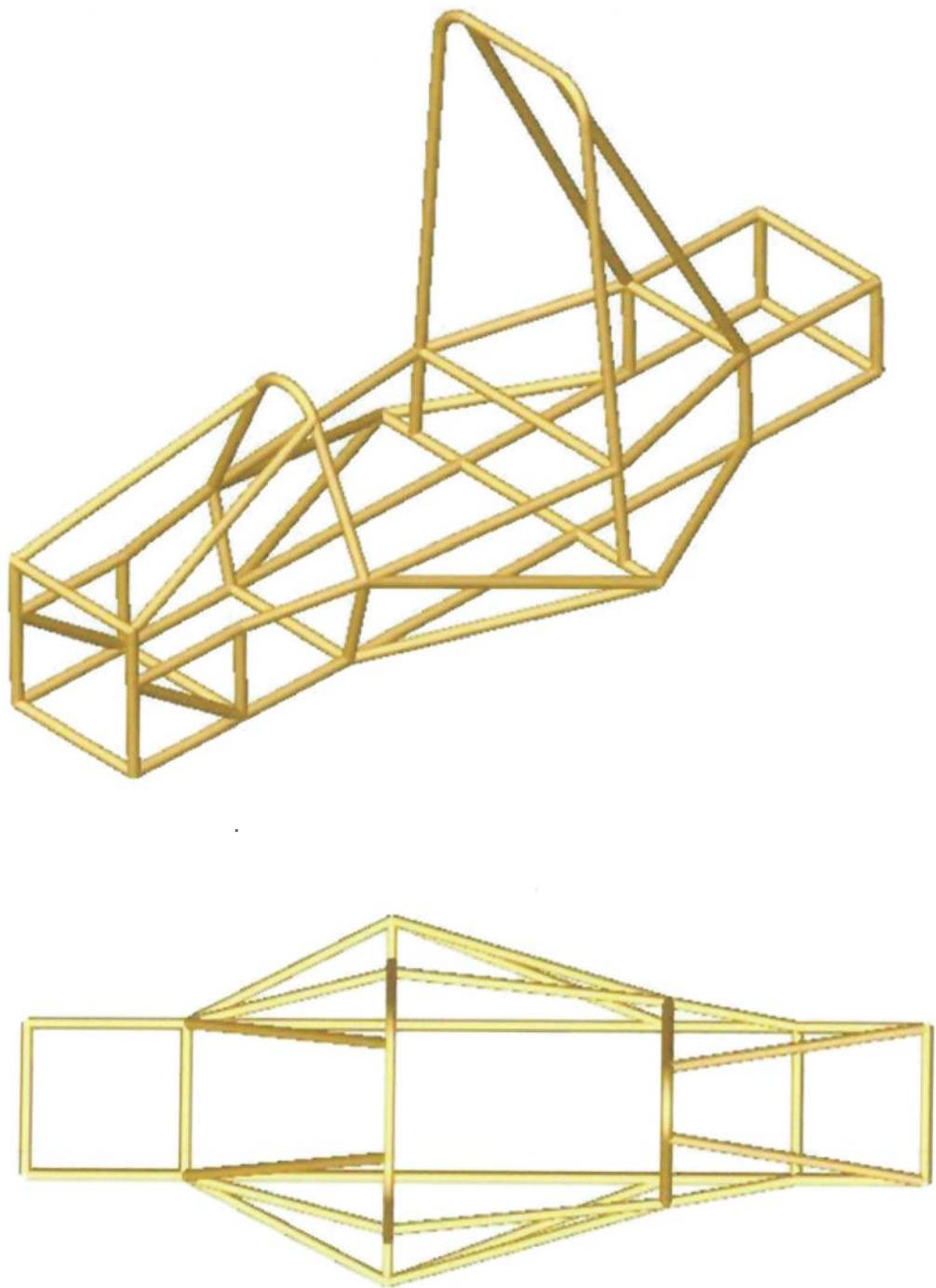


Figura 64 – Desenho da estrutura em Solidworks.

15.1.5 Planejamento da construção da estrutura

O processo do planejamento da construção é iniciado porque é necessário atentar para uma série de fatores:

- Identificar que equipamento e máquinas serão necessários
- Que ferramentas de trabalho são requeridas
- A seqüência dos procedimentos;
- A exatidão requerida;
- Tempo estimado de produção.

O estágio de planejamento da construção é freqüentemente um processo em que pulamos o que acarreta em muitos problemas no estágio da construção. Conseqüentemente tendo um processo bem planejado da construção melhorará a eficiência e diminuirá o número de mudanças de projeto e atrasos de construção. O processo de construção da estrutura envolve primeiramente a procura do material requerido e de um fornecedor.

O processo de construção requer:

- Uma oficina apropriada para a construção e pintura;
- Soldagem por processo MIG ou TIG / MAG;
- Gabaritos para a estrutura e bandejas;
- Máquinas para cortar e esmerilar os tubos;
- Cortes de chapas à plasma (CNC);
- Conformação;
- Usinagem – torneamento e fresamento;
- Montagem
- Equipamentos de proteção Individual (EPI's)
- Compressor;
- Pistola, mangueira de engate;
- Regulador de pressão.

15.1.6 Construção

O processo da construção da estrutura requer entorno de 40 horas homem. As etapas da fabricação requereram primeiramente a medição dos comprimentos do tubo e cortá-los no comprimento requerido, para se ter uma maior precisão recomenda-se:

- Corte e ajuste da junção de tubos realizado com serra copo e dispositivo de fixação regulável, como na figura abaixo.



Figura 65 – Esquema da bancada de fixação da serra copo

Ou cortar o tubo com um acréscimo de 2 cm para permitir o entalhe, com a utilização do programa tubemiter.zip, como na figura 66 abaixo.

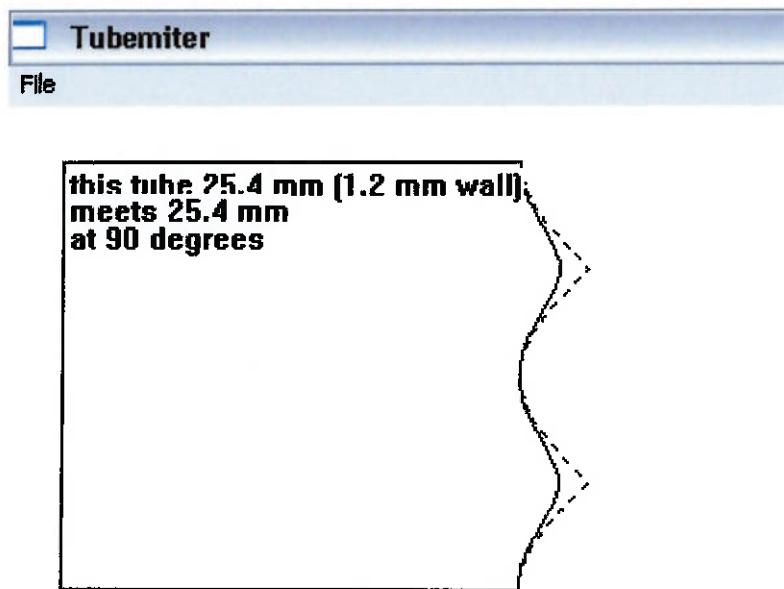


Figura 66 – Programa Tubemiter

Então se tem o processo de dobras nos tubos como para o arco de proteção principal e arco dianteiro.

Como alguns subsistemas podem se atrasar é recomendado iniciar a construção pela parte dianteira para não atrasar o projeto de construção.

Para ajudar o processo de soldagem todas as barras devem ser lixadas para remover a corrosão superficial ou sujeiras. Devem então ser mergulhados em solventes para remover qualquer óleo ou fluído na superfície do tubo.

A fabricação da estrutura requer um gabarito para fixar os tubos firmemente. Para auxiliar devem-se imprimir os planos da estrutura em escala 1:1 e fixar este desenho no gabarito, como na figura abaixo.



Figura 67: Ilustração da fixação das barras sobre o desenho em escala 1:1

Então após os planos principais estiverem soldados, deve-se montar uma mesa para fixar os planos e soldá-los. Após os processos de soldagem tem-se que fazer a análise de tensões residuais e se possível deve-se esquentar a área com maçaricos para distribuir as tensões.

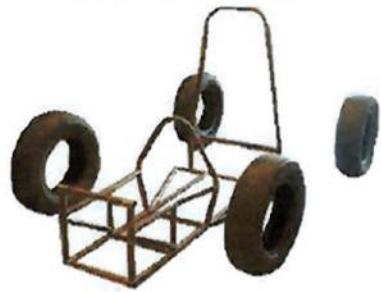


Figura 68: Ilustração da preparação dos planos da dianteira do veículo para soldagem

Construção das bandejas da suspensão

Abaixo estão alguns exemplos de metodologias de construções das bandejas da suspensão.



Figura 69: Exemplo de fixação dos tubos.

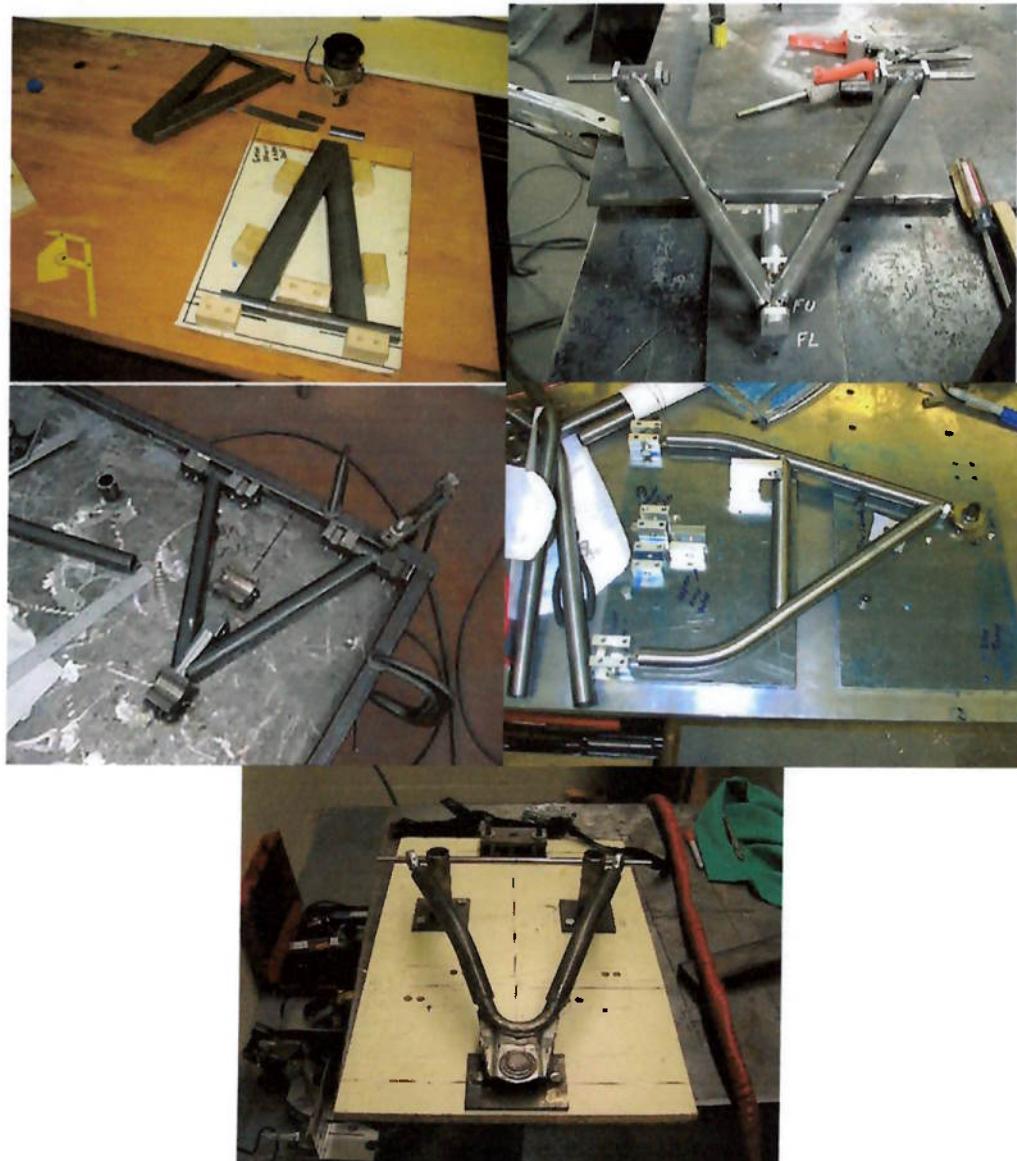


Figura 70: Exemplos de fabricação de bandejas

O projeto do gabarito da equipe mini-baja deste ano, contempla a fabricação de bandejas de tubos $\frac{3}{4}$ " 7/8" 1" e $1 \frac{1}{4}$ ", sendo necessária apenas a troca dos jogos de tarugo e dos espaçadores dos oscilante de acordo com o diâmetro desejado. Dentro de um mesmo diâmetro basta adaptação da geometria desejada utilizando as regulagens já previstas de projeto.

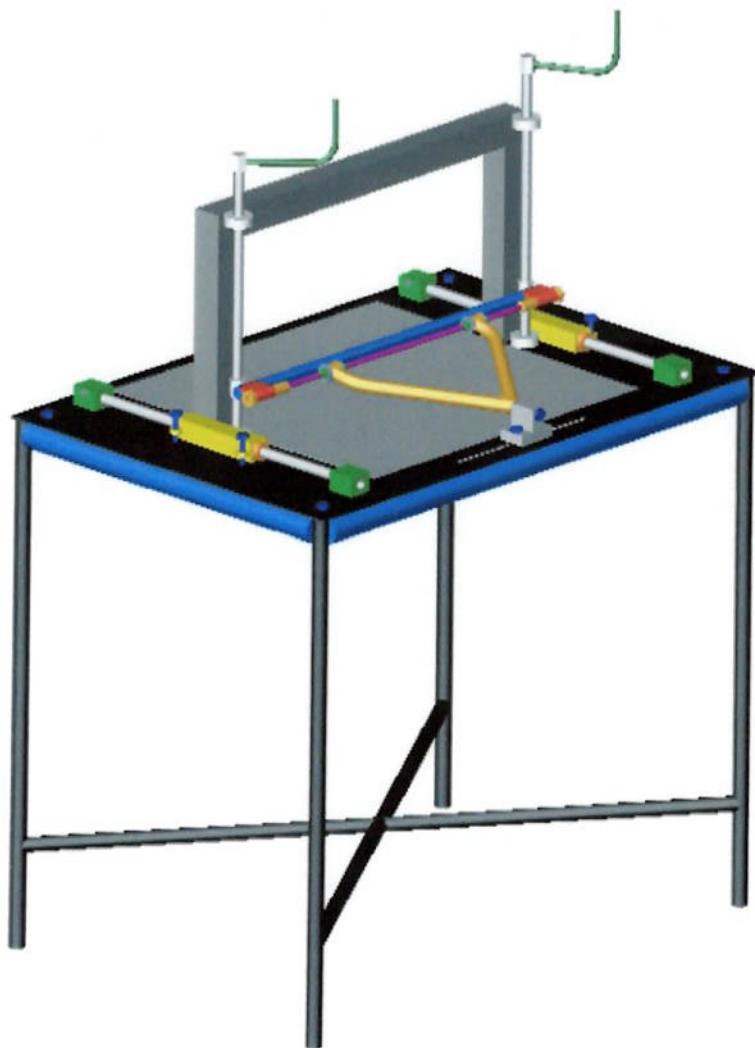


Figura 71 – Desenho em solidworks da mesa para construção de bandejas

Quando a construção da estrutura estiver finalizada deve-se montar a cabine de pintura e realizar um revestimento do metal com primer, para impedir a corrosão da superfície e garantir a aderência da tinta. Lembrando que a estrutura deve estar limpa antes da pintura. Quando estiver próximo da competição (após os testes) deve-se lixar levemente o chassi e reaplicar o primer antes que o revestimento final da pintura seja aplicado.

16. AVALIAÇÃO DO CHASSI

Avaliar as propriedades do chassi é uma fase crítica de testes, para assegurar que o chassi não falhe quando são aplicadas cargas críticas a estrutura. A posição do centro de gravidade, da quantidade de deflexão das barras e da rigidez a torção são os parâmetros significativos que influenciarão na dirigibilidade do veículo. Estes parâmetros serão analisados usando vários procedimentos assegurar-se de que o chassi tenha um desempenho ótimo. As tensões que os materiais podem alcançar seria uma outra área de testes, mas sob as circunstâncias das exigências da pista serem mínimos estes não serão testados.

As propriedades materiais usadas na análise do chassi são muito críticas. E podem causar erros severos no cálculo e podem conduzir à resultados incorretos que mostram que o chassi é muito mais resistente do que é realmente. As propriedades materiais para o tubo trefilado usado na construção do chassi são alistadas na tabela 27, abaixo. As propriedades materiais foram feitas exame das tabelas das normas e de fornecedores como mtp (metalúrgica de tubos de precisão) e Tuberfil Indústria e comércio de tubos Ltda.

Tabela 27: Propriedades do material Isotrópico trefilado a frio

Modulo de Young (E)	200GPa
Densidade	7800 kg/m ³
Coeficiente de Poisson	0,3
I _{xx} (momento principal de inércia)	11711mm ⁴
Área da Seção transversal	95,38x10 ⁻⁶

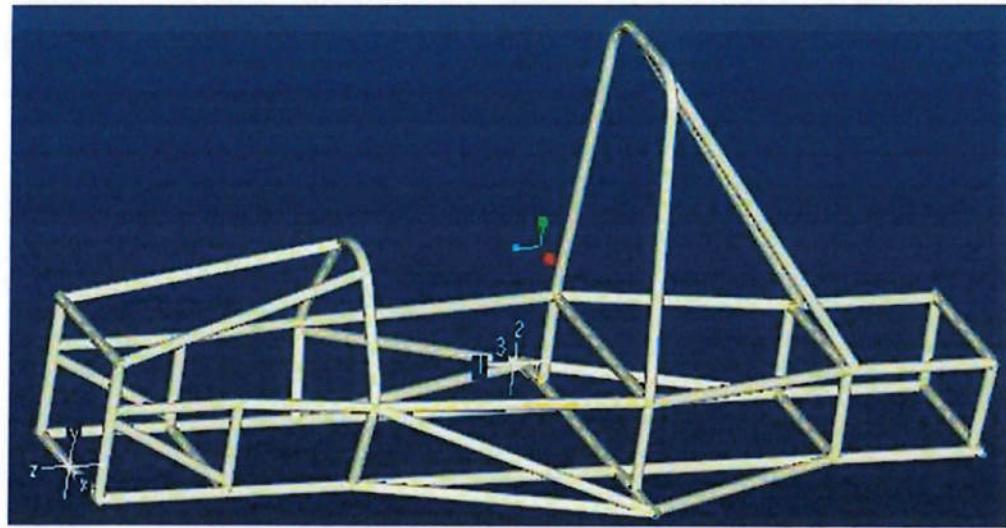


Figura 72: Centro de Gravidade do chassi

Para encontrar o centro de gravidade do veículo os outros componentes principais tiveram que também ser simulados. O motor e o piloto tiveram que ser construídos como modelos contínuos e a densidade foi ajustada então de modo que o motor e transmissão tivessem uma massa de 60kg e a massa da pessoa fosse 68kg. Os modelos do motor e do piloto foram montados então no modelo contínuo com o chassi para determinar o CG total como mostrado na figura 73 abaixo.

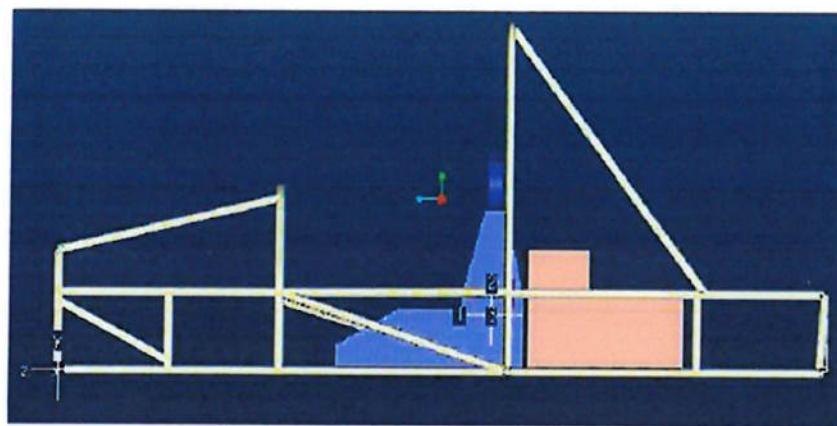


Figura 73: Centro de gravidade incluindo piloto, motor e transmissão

O CG dos componentes principais é 1377 mm no sentido de Z e 185 mm acima no sentido de Y e é mostrado também como a origem 1.2.3 em figura 72. Agora que o CG do veículo está estimado as porcentagens da carga da roda podem também ser calculadas. Isto ajudará no projeto da suspensão e nos ajustes do veículo. Algumas características de desempenho podem também ser preditas dependendo do CG do veículo. Como centro de rolagem do veículo. O ponto estimado do CG pode também ser usado para assegurar de que o veículo passe no teste da inclinação.

Podem-se utilizar programas como o ProEngineer para análise do teste de inclinação, como mostrado na figura abaixo.



Figura 74 - Teste de inclinação de 60° do veículo

A posição do CG mostra também como as cargas da roda estão sendo distribuídas na parte dianteira e na parte traseira do veículo. Figura 75 mostra que o CG do veículo do formula SAE faz com que a carga favoreça ligeiramente as rodas traseiras. As porcentagens são ainda muito perto de 50% que é o ideal. Esta posição do CG pode também ligeiramente ser melhorada com a adição de outros componentes na parte dianteira do veículo.

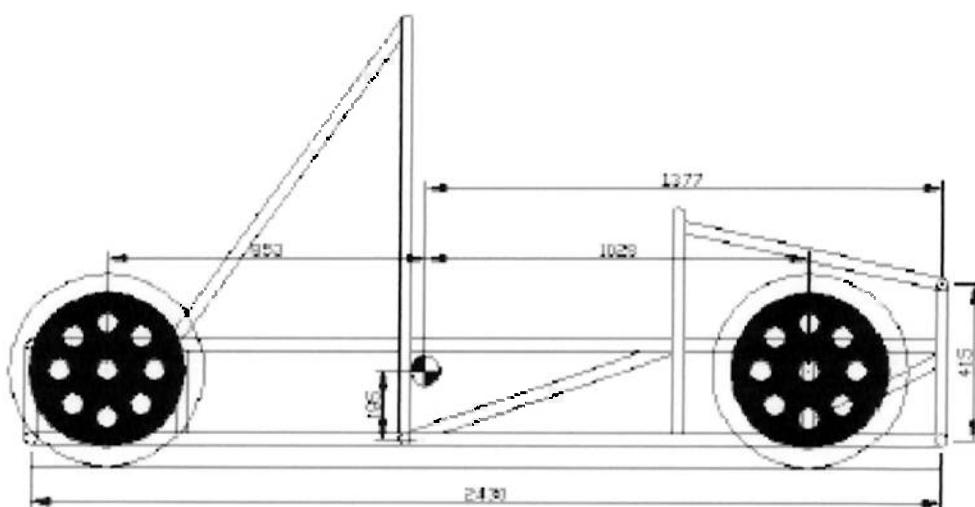


Figura 75 – Distância do CG das rodas dianteiras e traseiras

A estrutura do formula Sae foi analisado para deflexão estática usando o software de análise de elemento finitos (ANSYS).

Para a construção da estrutura no software ANSYS foram retirados do programa Microstation as coordenadas de cada nó da estrutura. Com isso, foram colocados os pontos no Excel e feita uma concatenação dos pontos. Passando para o bloco de notas e passando todos os pontos de uma única vez para o programa.

Para as construções das linhas é usado o mesmo método acima e faz a concatenação com todos os pontos que estão ligados. Então gera-se a seguinte malha.

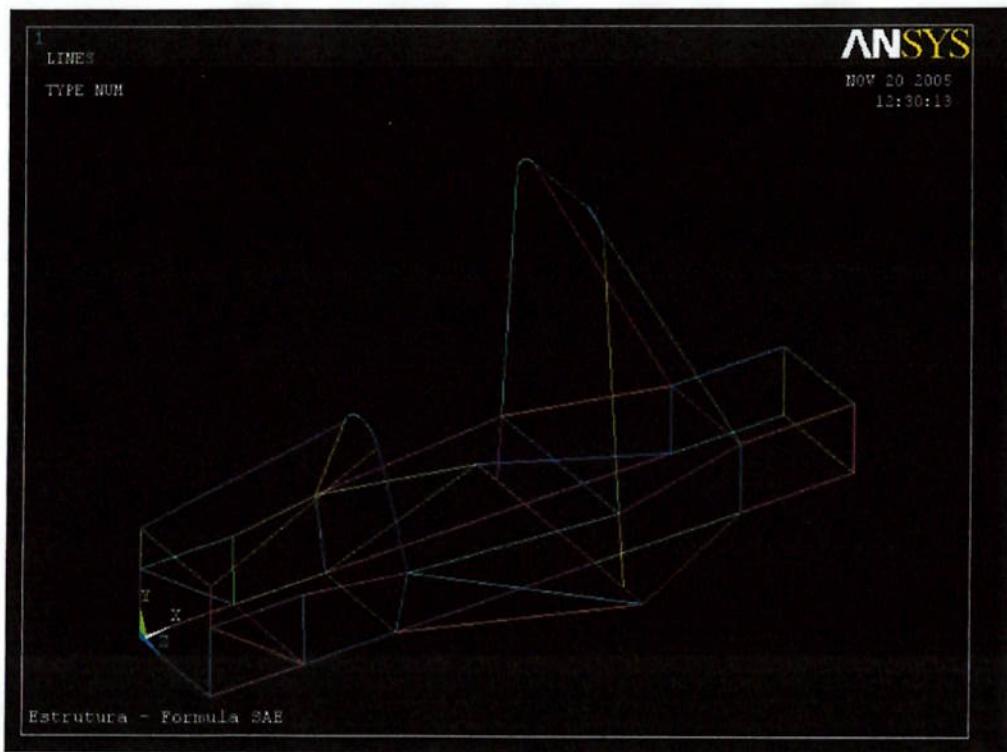


Figura 76 – Estrutura alocada no ANSYS

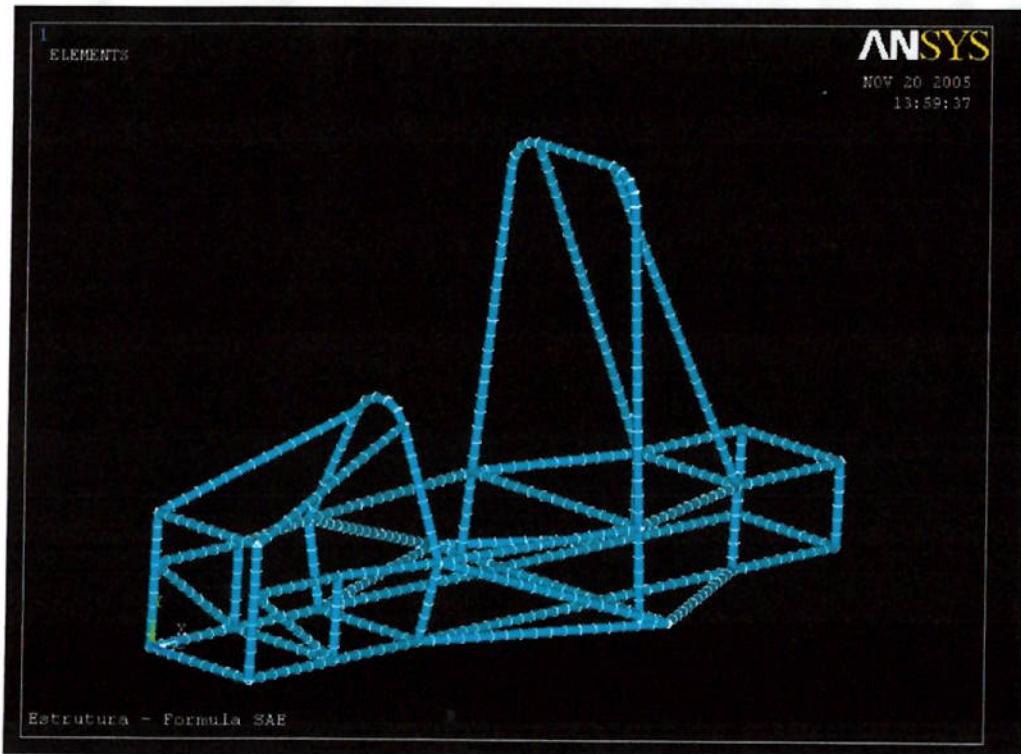


Figura 77 - Malha gerada no ANSYS

Então cada elemento da estrutura tem-se a discretização de cada propriedade do material, e as características reais desse material. Os dados da tabela (que está nesse capítulo) são colocados nesse ponto da simulação.

Os tubos são colocados como elementos pipe16. Os quais são definidos no programa como um elemento uniaxial capacidade de tração-compressão, torção e dobras. O elemento tem 6 graus de liberdade e dois nós

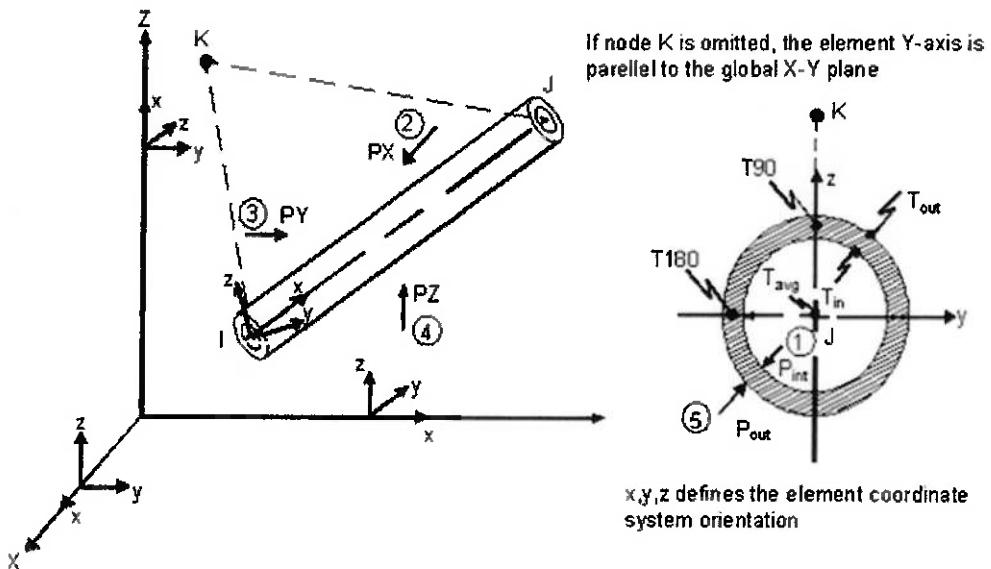


Figura 78 – Geometria do Pipe 16

Então, foram alocadas duas massas concentradas, a massa do piloto, banco e capacete (75 kg) e o sistema motopropulsor (60 kg) a essas massas foi alocado elementos de concentração de massa (mass 21).

Para a análise da estrutura, há a necessidade de se ter o projeto de suspensão bem definido, ou seja, definido o tipo de mecanismo que será utilizado e os pontos de fixação das articulações, isto é, em quais pontos da estrutura serão ligados os braços da suspensão e em quais pontos será fixado a direção. Como o projeto da suspensão ainda não foi desenvolvido, a metodologia será apresentada utilizando um modelo básico com mecanismo de suspensão chamado “Duplo A”.

E para alocar a suspensão, então forma definidos as bandejas do sistema duplo A atribuindo o elemento pipe 16 novamente e o cubo de roda foi definido uma linha, pois assim temos como travar os graus de liberdade de modo real para o

veículo. Mas o modelo de suspensão do formula SAE não dá para simular como uma treliça e deve-se, pois este sistema é ligado horizontalmente à estrutura. Então foi feito um sistema vertical para mostrar a metodologia.

O sistema de suspensão e molas foi definido como um elemento link 8, e para as partes reais da suspensão são necessários à área da seção transversal e a pré-compressão. E para definição do material da mola precisa-se da rigidez longitudinal.

A rigidez longitudinal é definida como:

$$E = \frac{L \cdot k}{A}$$

Onde:

E = rigidez longitudinal;

L= comprimento da treliça (link 8);

K= constante da mola;

A = área da seção transversal da mola.

Tem-se com o trabalho de formatura de Daniel Custódio Lopes Trigo, que a constante da mola dianteira será de 17 e da traseira de 30. O valor da pré-compressão será de 0,5. Com os comprimentos das barras tem-se os seguintes valores para as rigidez longitudinal da suspensão.

Então, após o modelo definido, pode-se colocar as condições de contorno no veículo. As condições críticas de um veículo fórmula SAE são as condições da estrutura em trajetória curva. Então foi aplicado um binário nas fixações das bandejas de suspensão do veículo para ver se as condições de deformação.

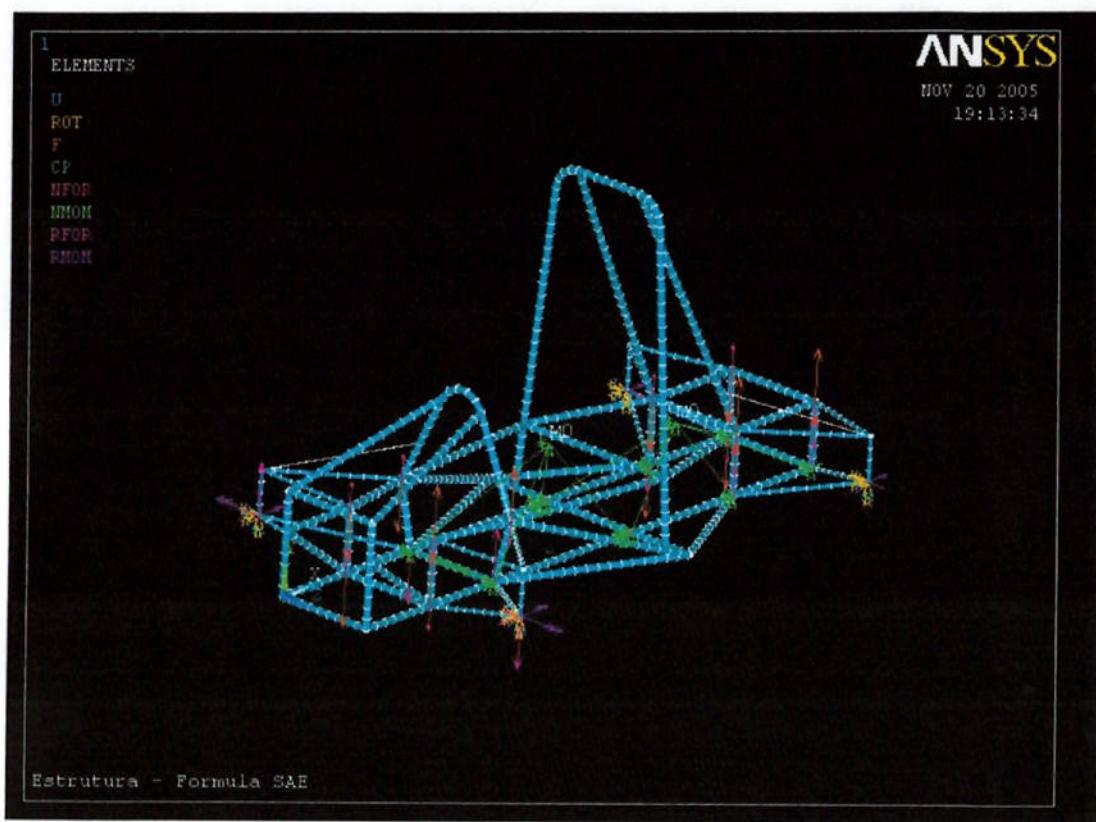


Figura 79 - Ilustração das condições de contorno (Binário de forças)

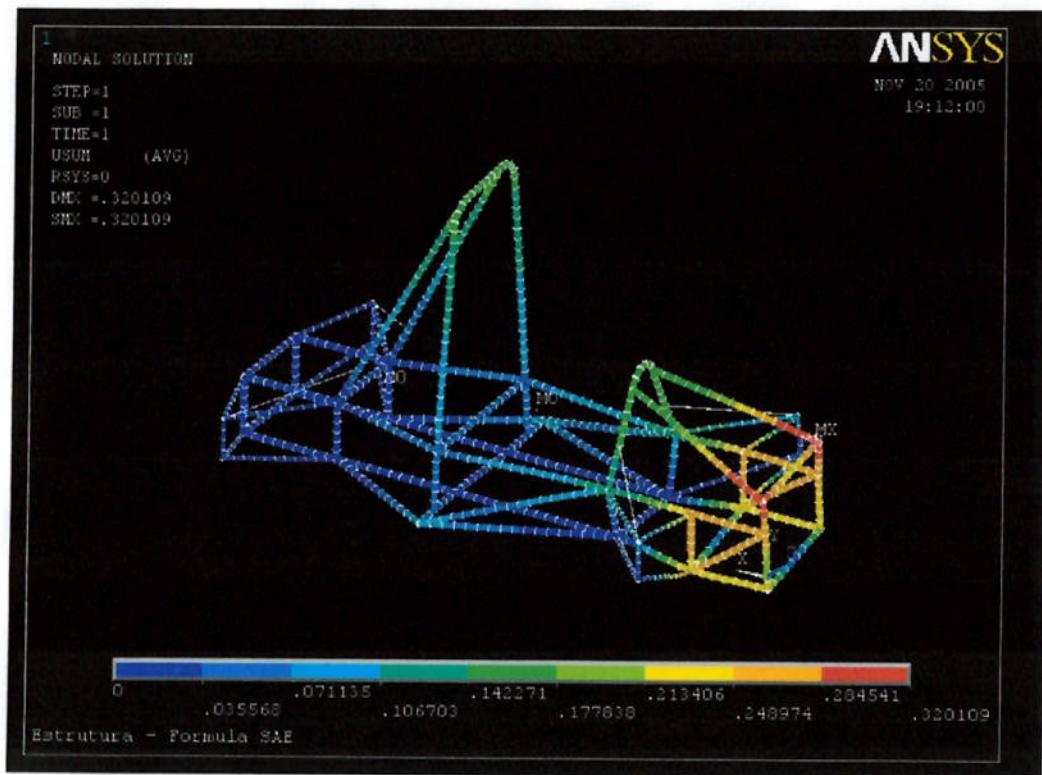


Figura 80 – Ilustração da deformação (Von mises) ampliado em 100 vezes

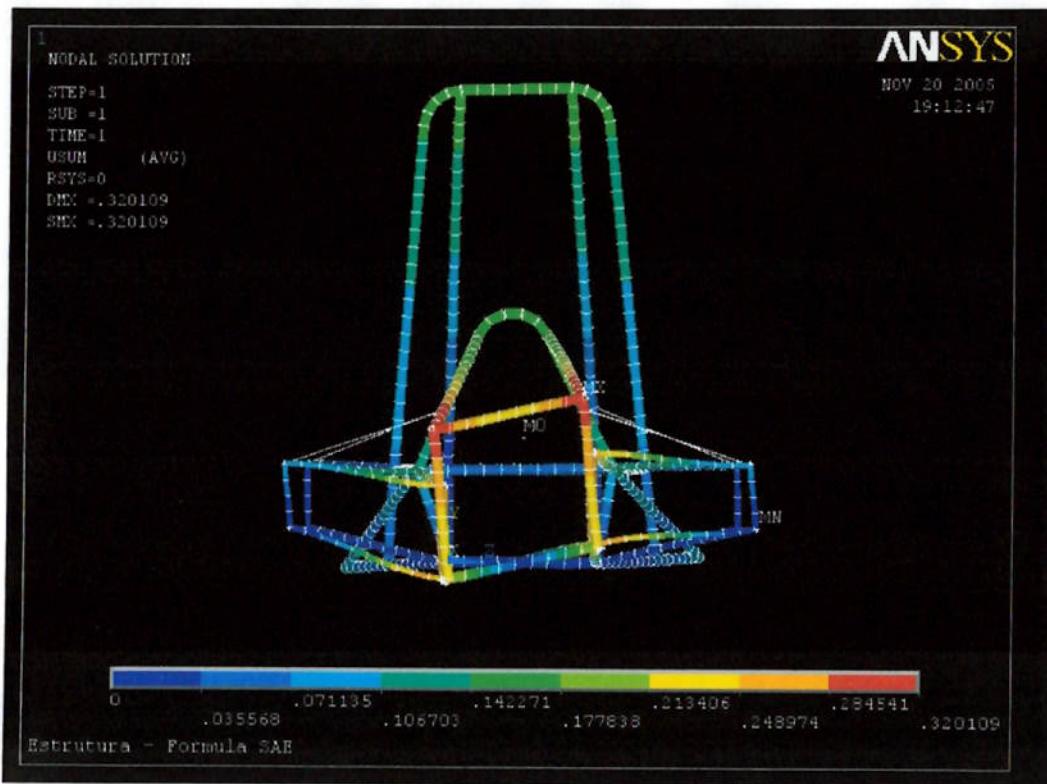


Figura 81 - Ilustração frontal da deformação (Von Mises) ampliado em 100 vezes

Nas figuras 80 e 81, pode-se avaliar que o máximo deslocamento do veículo será de 0,32mm para uma carga aplicada de 500 N, para cada ponto de fixação do binário como calculado em capítulos anteriores. Com isso mostra que as condições em curvas não virão a intervir no desempenho do chassi.

Para se ter uma noção do esmagamento da estrutura, foi simulada uma aceleração para baixo do veículo em um valor de 4'G', que mostra a resistência da estrutura.

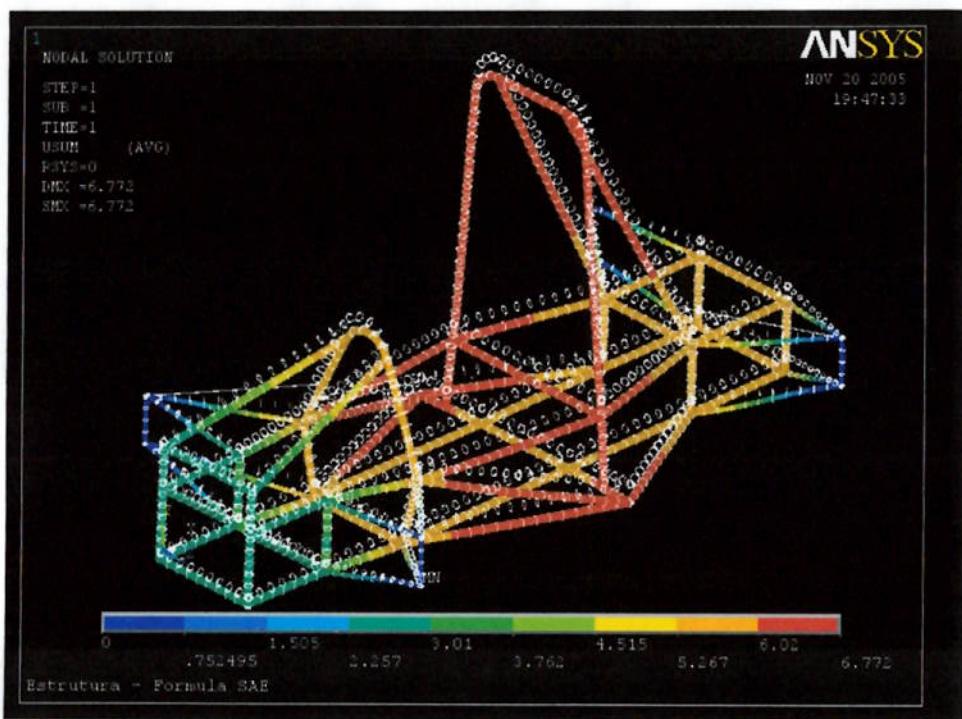


Figura 82 - Condições extremas de um esmagamento da estrutura (valor de 4 G)

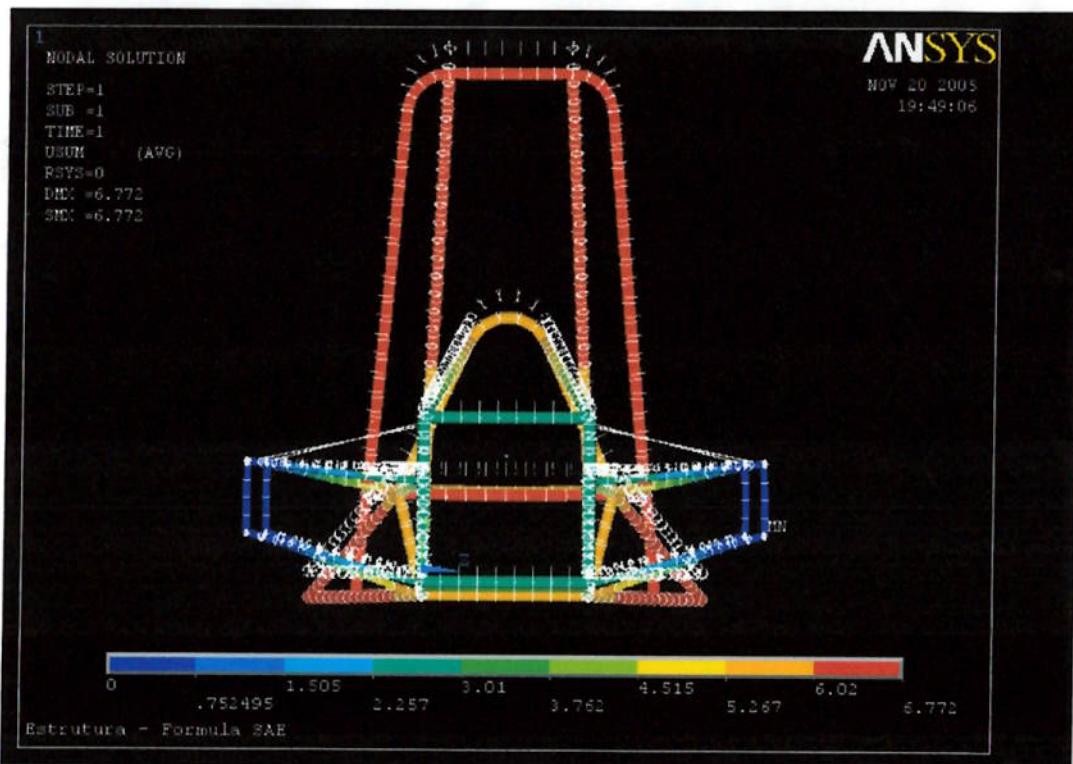


Figura 783 - mostrando o esmagamento frontal da estrutura – aumentado 200 vezes

Com isso, tem que o deslocamento da estrutura em condições de esmagamento, chega-se a 6 mm, um valor bem baixo que o exigido em regra de um valor máximo de 16 mm.

Inúmeras outras análises da dinâmica do veículo podem ser feitas com a simulação numérica, quando o usuário já está mais familiarizado com a interface do software.

A avaliação dos resultados é muito importante para o projeto. Pois permite que a equipe prediga as características de desempenho do chassi sem dirigir o veículo. Os resultados aqui apresentados mostram que a estrutura experimentará deflexões mínimas sob condições de corrida.

Tem-se ainda que buscar um software para fazer testes de “crash” em acidentes do veículo a altas velocidades (120 km/h). Como sugestão, tem-se para absorção desta energia de colisão o acréscimo de uma pequena estrutura adicional na parte dianteira do veículo, como mostrado na figura abaixo.



Figura 84 - Estrutura frontal para absorção de impacto

17. CONCLUSÕES

O relatório aqui apresentado buscou apresentar todos os recursos necessários não só para o término desse trabalho, mas também para a execução de um protótipo a partir do seu conteúdo.

Com os dados até aqui apresentados nos primeiros capítulos, é possível iniciar o projeto básico de todo o veículo. E com os dados apresentados no final do trabalho, permitirá aos integrantes a possibilidade de aprofundamento do estudo da estrutura e da direção.

Para o início de um projeto consistente, foram apresentadas as regras da competição e suas peculiaridades referentes à direção. E ainda, uma explanação sobre os principais conceitos e suas interações.

Foram expostos os mecanismos de acionamento da direção e, de acordo com o tipo do veículo e suas aplicações foi determinado e dimensionado o que melhor correspondia a todos os requisitos. Ainda, as interfaces do projeto da direção com os sistemas onde existam interações foram explicitadas e devidamente analisadas.

A metodologia de simulação numérica apresentada possibilita um meio de desenvolver o projeto numa fase mais avançada, isto é, depois da definição exata dos projetos da estrutura e da suspensão, é possível alcançar uma solução de mecanismo que satisfaça os requisitos descritos no trabalho, em um processo iterativo, rápido e de pouco custo.

Para todo veículo, o chassi é a espinha dorsal do sistema. Cada componente confia no chassi diretamente ou indiretamente. O piloto confia também no chassi para a sua proteção no caso de um acidente. Este trabalho cobre os procedimentos que devem ser usados para projetar e construir com sucesso um chassi funcional do formula SAE. O projeto da direção foi dividido nos seguintes âmbitos: Primeiramente foi apresentada a história de estruturas tubulares e a evolução tecnológica das estruturas. Foi falado também os procedimentos relevantes requeridos para a construção de uma estrutura tubular. Depois tem-se uma revisão da literatura recente usado para ajudar a ter o conhecimento e as técnicas requeridas para projetar um chassi eficiente e eficaz. E por fim tem-se a discussão dos critérios

do projeto (incluindo as restrições da regra), que envolve todas as áreas que de alguma forma influenciam no projeto da estrutura..

Então, iniciando o projeto tem-se:

- A seleção do material, que cobriu todos os materiais possíveis que poderiam ser usados na construção da estrutura e foi relatado as vantagens e as desvantagens de cada um.
- A metodologia do projeto que deve se ter para a construção da estrutura e o planejamento para esta.
- A avaliação do da estrutura discutiu o procedimento de análise em elementos finitos e foi demonstrado alguns resultados.

Um trabalho adicional a este poderia ser na área de análise de tensões. O estudo das tensões do veículo sob circunstâncias de funcionamento e em casos de colisões podia também ser muito útil na compreensão de características da estrutura.

Com esse trabalho, esperamos ter construído um guia para os futuros projetos de um veículo Formula SAE. Deixando todo o procedimento desenvolvido para o projeto e construção de um veículo Formula SAE, de tal forma que o tempo direcionado para os mesmos estudos aqui entregues diminua e que aumente o tempo para o aprimoramento e desenvolvimento de tecnologias novas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BASTOW, D., “Car Suspension and Handling”. 1.ed. Londres Pentech Press, 1993. Engineers Inc, 1992.
- [2] ERDMAN, A.G., SANDOR, G.N., “Mechanism Design Analysis and Synthesis.” Volume 1. 3^a ed.. Prentice Hall. EUA, 1997.
- [3] FENTON, J., “Handbook of Automotive Powertrains and Chassis Design”. Professional Engineering Publishing Limited. London, 1998.
- [4] GILLESPIE, T.D., “Fundamentals of Vehicle Dynamics”, 1.ed. Nova York. Society of Automotive
- [5] HAC, A., “Rollover Stability Index Including Effects of Suspension Design”. SAE Technical Papers, 2002.
- [6] HEISLER, H, “Advanced Vehicle Technology”. 2.ed.. Society of Automotive Engineers Inc., 2002.
- [7] JUVINALL, R.C., MARSHEK, K.M., “Fundamentals of Machine Component Design”. 3.ed.. Danvers, John Wiley & Sons Inc., 2003.
- [8] KAMINSKI, P.C., “Desenvolvendo produtos, planejamento, criatividade e qualidade”. LTC Editora S.A., 1.ed. Rio de Janeiro, 2000.
- [9] REIMPELL, J., STOLL, H., “The Automotive Chassi: Engeneering Principles.” 1.ed. Nova York, Society of of Automotive Engineering, Inc. 1996.
- [10] SERVIÇO DE BIBLIOTECAS DA EPUSP, “Diretrizes para apresentação de trabalhos Finais”. São Paulo, 2005.
- [11] VALKENBURGH, P.V., “Race Car engineering & mechanics”.
- [12] MADUREIRA, O.M., “Curso de Direção e Estabilidade”. São Paulo.
- [13] CROUSE, W. H. & ANGLIN, D. L. , “Automotive Chassis and Body, Automotive” Technology Series, 5.ed, McGraw-Hill, USA, 1955.
- [14] DIXON, J. C. , “Tyres, Suspension and Handling”, 2.ed., London, U.K, 1996.
- [15] ERTAS, A. & JONES, J. C. , “The Engineering Design Process”, 2.ed., John Wiley and Sons, Inc, United States of America, 1996.

- [16] GARRETT, T. , “The Motor Vehicle”, 13.ed., Butterworth Heinemann, Stanford, California, 2001.
- [17] SHIGLEY, J.E.; MISCHKE, C.R.; BUDYNAS, R.G. “Mechanical Engineering Design”. 7. ed. Nova York, McGraw Hill, 2004.

Site www.howstuffworks.com/HowCarSteeringWorks.htm, ultimo acesso em 27/09/05.

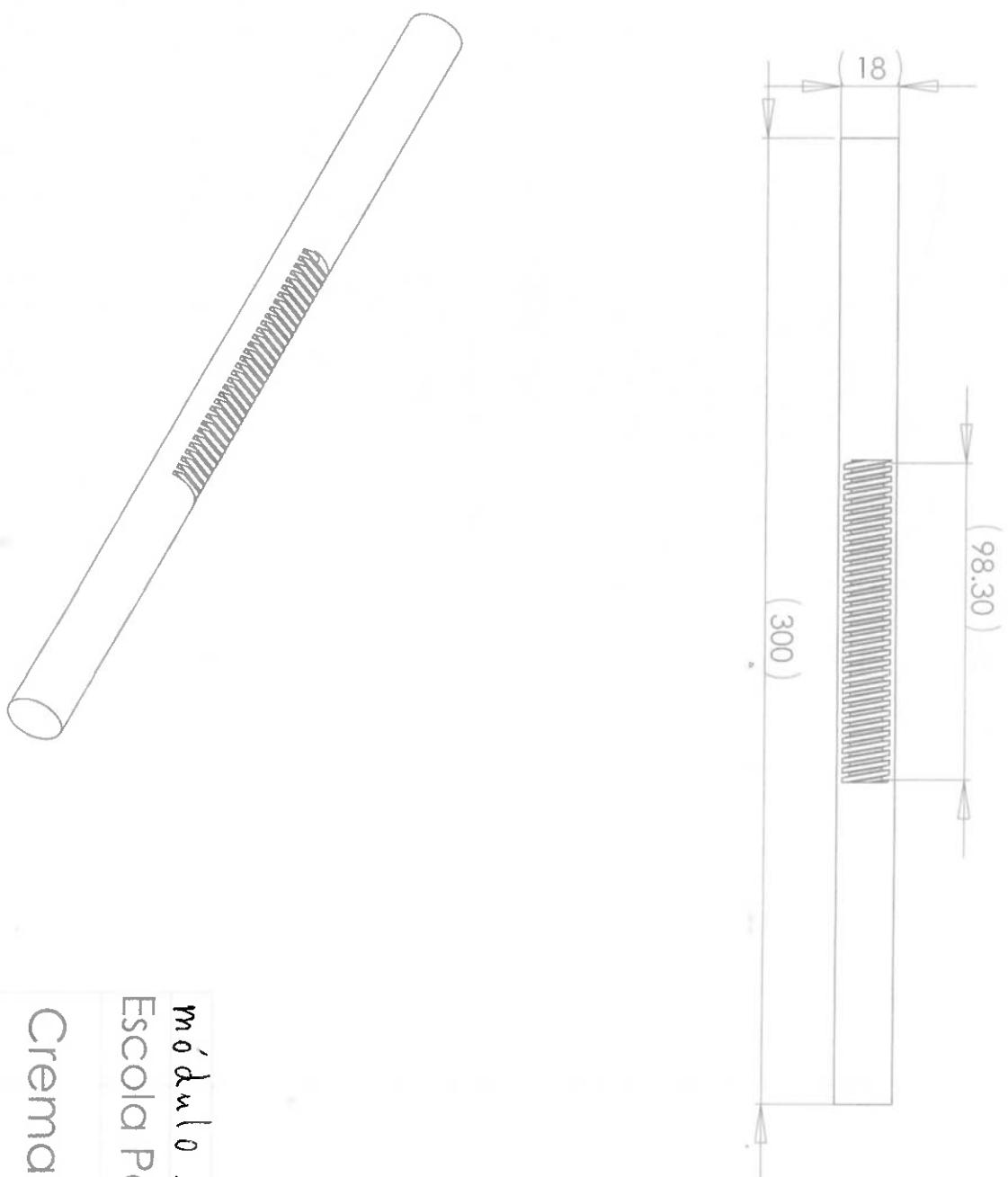
Site www.students.sae.org/competitions/formulaseries, último acesso em 27/09/2005

Site www.sae-a.com.au/fsae/index.html, último acesso em 27/09/2005

Site <http://www.saebr.org.br/>, ultimo acesso em 27/09/2005

Site <http://www.gmecca.com/byarc/images/tortionalrigity.gif>, ultimo acesso em 27/09/2005.

Site http://metalworking.com/DropBox/_2000_retired_files/, ultimo acesso em 27/09/2005.



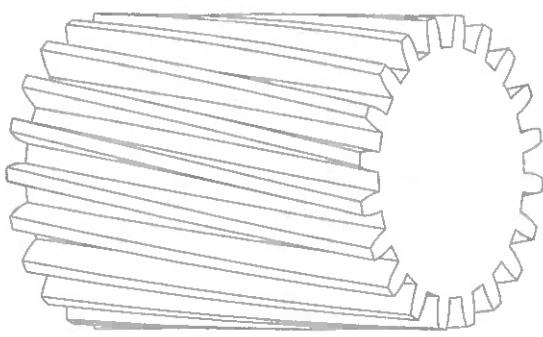
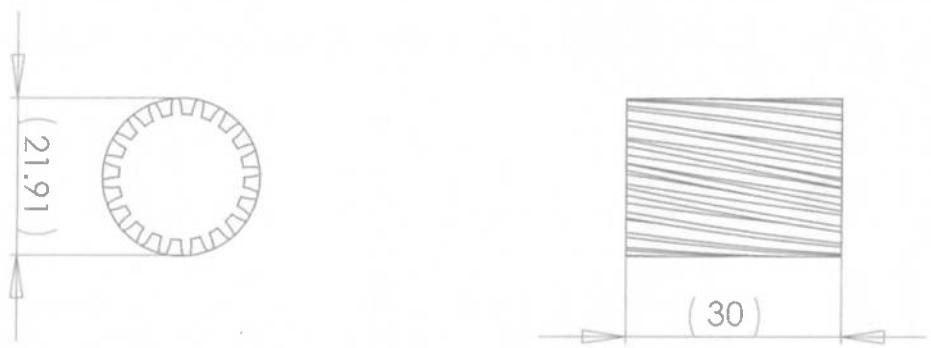
medidas em mm

Aço SAE 8620

A4

módulo 1 Anexo B
Escola Politécnica da USP
Cremalheira Helicoidal

medidas em mm



módulo 1 Anexo A
Escola Politécnica da USP

Pinhão helicoidal

Aço SAE 8620

ESCALA: 1:1

Folha 1 de 1

A4