



Giovane Turra
Marcelo Burkhard da Silva

**PROJETO DE DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE SUSPENSÃO DE UM
PROTÓTIPO DE FÓRMULA SAE**

Horizontina - RS

2021

Giovane Turra
Marcelo Burkhard da Silva

**PROJETO DE DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE SUSPENSÃO DE UM
PROTÓTIPO DE FÓRMULA SAE**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica na Faculdade Horizontina, sob a orientação do Prof. Paulo Marcos Flores, Me.

Horizontina - RS

2021

FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA
CURSO DE BACHARELADO ENGENHARIA MECÂNICA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o trabalho final de curso

**“PROJETO DE DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE SUSPENSÃO DE UM
PROTÓTIPO DE FÓRMULA SAE”**

**Elaborada por:
Giovane Turra
Marcelo Burkhard da Silva**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecânica

Aprovado em: 29/11/2021
Pela Comissão Examinadora

Me. Paulo Marcos Flores
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador

Me. Francine Centenaro Gomes
FAHOR – Faculdade Horizontina

Me. Alexandre Kunkel da Costa
FAHOR – Faculdade Horizontina

**Horizontina - RS
2021**

Aos nossos familiares, que nos proporcionaram todo apoio necessário para completar essa etapa. Dedico também aos colegas e amigos que nos acompanharam todos esses anos de trabalho realizado.

AGRADECIMENTO

Primeiramente agradecemos a Deus pela vida e iluminar nossos caminhos.

Agradecemos a todos os professores que nos instruíram ao longo da graduação, especialmente ao Paulo Flores pela instrução, dedicação e conhecimento compartilhado, e também a todos os membros da equipe E-Racing do Fórmula SAE.

“Tente uma, duas, três vezes e se possível tente a quarta, a quinta e quantas vezes for necessário. Só não desista nas primeiras tentativas, a persistência é amiga da conquista. Se você quer chegar aonde à maioria não chega, faça o que a maioria não faz.”
(Bill Gates)

RESUMO

Este trabalho propõe estabelecer o estudo técnico para o desenvolvimento de um projeto de suspensão para um veículo Fórmula SAE. A Fórmula SAE é uma competição estudantil que mobiliza estudantes de engenharia do Brasil e do mundo com o intuito de os mesmos desenvolverem veículos para competirem entre si. O objetivo deste trabalho é projetar e analisar uma suspensão para aplicar no primeiro protótipo da equipe E-Racing. Para isso foram definidos os principais parâmetros da suspensão dianteira e traseira com base em pesquisas bibliográficas. Os principais componentes que constituem a suspensão foram projetados com a ferramenta de CAD *Autodesk Inventor Professional*. Afim de verificar o comportamento estrutural de tais componentes, foram realizadas simulações de dinâmica da suspensão e dinâmica veicular com a ferramenta *SuspensionSim* e *CarSim* para a coleta das forças em que a suspensão é exposta. A metodologia utilizada para a execução do protótipo teve várias etapas, onde foram adotados parâmetros e suas justificativas de escolha. Com base nisso, reuniu-se informações importantes para o projeto da suspensão do Fórmula SAE.

Palavras-chave: Fórmula SAE. Sistema de suspensão. Dinâmica da suspensão.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Eixo rígido com feixes de molas.....	16
Figura 2 – Eixo rígido com barra de controle, a barra Panhard.....	16
Figura 3 – Suspensão Duplo A.....	17
Figura 4 – Ângulo de <i>camber</i> positivo e negativo.....	18
Figura 5 – Cinemática do <i>camber</i>	19
Figura 6 – Pino mestre e braço a terra.....	20
Figura 7 – Ângulo de <i>caster</i> positivo e negativo.....	20
Figura 8 – Geometrias de direção	21
Figura 9 – Geometria de Ackermann	21
Figura 10 – Suspensão duplo A	22
Figura 11 – Biblioteca do <i>software</i> SuspensionSim	26
Figura 12 – Tabela dos parâmetros em mm, SuspensionSim.....	27
Figura 13 – Parâmetros da suspensão carregados no <i>software</i> CarSim	27
Figura 14 – Etapas para o projeto cinemático da suspensão.....	28
Figura 15 – Suspensão exposta no veículo.....	31
Figura 16 – Rodas e pneus	32
Figura 17 – Ilustração das medidas bitolas e entre-eixos	33
Figura 18 – Esboço do chassi	34
Figura 19 – Braços ou bandejas.....	34
Figura 20 – Manga de eixo.....	35
Figura 21 – Componentes internos da roda em CAD.....	36
Figura 22 – Esboço do ângulo de <i>caster</i> e <i>caster trail</i>	37
Figura 23 – Sistema de suspensão criado no ambiente virtual	37
Figura 24 – Variação do ângulo de cambagem suspensão dianteira.....	38
Figura 25 – Variação do ângulo de cambagem suspensão traseira.....	39
Figura 26 – Suspensão Duplo A.....	40
Figura 27 – Movimento da suspensão lateralmente.....	40
Figura 28 – Rigidez e o amortecimento equivalentes na roda.....	41
Figura 29 – Comportamento da suspensão em paradas bruscas	42
Figura 30 – Amortecedores traseiros	43
Figura 31 – Amortecedores dianteiros	44
Figura 32 – Esboço da caixa de direção	45

Figura 33 – Gráfico da cinemática da roda esquerda.....	46
Figura 34 – Gráfico da cinemática da roda direita.....	46
Figura 35 – Simulações <i>software CarSim</i>	47
Figura 36 – Simulações <i>software CarSim</i> com os gráficos	48
Figura 37 – Sistema de suspensão montado no carro	48
Figura 38 – Sistema de suspensão da traseira montado no carro	49
Figura 39 – Sistema de suspensão da dianteira montado no carro	49

LISTA DE ABREVIATURAS E/OU SIGLAS

SAE: Sociedade de Engenheiros da Mobilidade.

CAD: Desenho assistido por computador.

Fórmula SAE: Veículo fora de estrada projetado por estudantes.

Offset: Distância entre a face de apoio do cubo e a linha de centro do aro.

Scrub Radius: Ponto de intersecção entre o prolongamento da linha do pino mestre com o solo.

Software: Programa projetado para executar um grupo de funções, tarefas ou atividades coordenadas para o benefício do usuário.

Camber: Braço de ligação superior da suspensão traseira.

Benchmarking: processo de busca das melhores práticas.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	TEMA.....	12
1.2	DELIMITAÇÃO DO TEMA	12
1.3	PROBLEMA DE PESQUISA	12
1.4	HIPÓTESES	13
1.5	JUSTIFICATIVA.....	13
1.6	OBJETIVOS.....	14
1.6.1	Objetivo Geral	14
1.6.2	Objetivos Específicos.....	14
2	REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1	A COMPETIÇÃO FÓRMULA SAE BRASIL.....	15
2.2	SUSPENSÃO	16
2.2.1	Suspensão dependente.....	16
2.2.2	Suspensão independente.....	17
2.2.3	Sistema duplo A.....	17
2.2.4	Ângulo de <i>Camber</i>	18
2.2.5	Pino Mestre e Braço a terra.....	19
2.2.6	Ângulo de <i>Caster</i> e <i>Caster Offset</i>	20
2.2.7	Geometria de Ackerman.....	20
2.2.8	Razão de instalação.....	22
2.2.9	Escolha do sistema de suspensão (tipo Duplo A).....	22
2.3	NORMAS DO PROJETO	23
2.3.1	Requerimentos da suspensão	23
3	METODOLOGIA	25
3.1	TIPO DE PESQUISA	25
3.2	PESQUISA QUANTO AOS OBJETIVOS	25
3.3	SOFTWARE EMPREGADO.....	25
3.4	PLANEJAMENTO DO PROJETO	27
3.5	PROJETO DA SUSPENSÃO	28
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	30
4.1	CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO	30
4.1.1	Escolha do sistema de suspensão (tipo Duplo A).....	31
4.1.2	Escolha das rodas e pneus.....	31
4.1.3	Definição da bitola e entre-eixos	32
4.1.4	Esboço simplificado do chassi.....	34
4.1.5	Esboço dos componentes internos da roda.....	34
4.1.6	Definição dos ângulos de <i>caster</i> , pino mestre, <i>scrub radius</i> e <i>caster trail</i>	36
4.1.7	Simulações nos <i>Softwares</i>	37
4.2	PARÂMETROS DINÂMICOS.....	39
4.2.1	Rigidez e amortecimento.....	41
4.2.2	Escolha dos amortecedores	42
4.2.3	Definição da geometria de direção	44
4.2.4	Simulações no <i>software CarSim</i>	47
4.2.5	Modelagem da suspensão em CAD.....	48
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	50
	REFERÊNCIAS	51
	APÊNDICE – SUSPENSÃO TRASEIRA E DIANTEIRA.....	53
	ANEXO – REGULAMENTO TÉCNICO.....	56

1 INTRODUÇÃO

Entende-se por suspensão de veículos como o conjunto de componentes responsáveis pela absorção de choques, vibrações ou desníveis do terreno, que serão transmitidos aos edifícios ou ocupantes. Além de absorver vibrações provenientes das irregularidades dos terrenos, o sistema de suspensão também está diretamente relacionado à estabilidade e, portanto, à segurança do veículo.

A origem dos sistemas de suspensão utilizados atualmente em carros teve sua origem em veículos de tração animal por volta do ano de 1650. As rodas das carroças eram rígidas e não havia movimento de translação em relação às carrocerias, e todas as cargas geradas pelo movimento de rolamento eram transmitidas diretamente do piso para a tripulação. Após as carroças, surgiu a suspensão que possuía rodas rígidas fixadas ao veículo por meio de feixes de mola.

Para garantir que o sistema de suspensão seja dinâmico e ergonomicamente razoável, é necessário ter um amplo conhecimento dos tipos de suspensão, e assim selecionar o modelo mais adequado para o projeto. Neste contexto, este estudo consiste inicialmente em rebuscar pressupostos teóricos que possam fornecer um norte para o desenvolvimento de um modelo específico de suspensão, cuja finalidade destina-se a reduzir os efeitos da vibração no sistema que compõe o protótipo Fórmula SAE FAHOR.

Assim, o desafio proposto neste trabalho consiste no projeto e construção de um sistema de suspensão do tipo duplo braço em "A". Esta suspensão é conhecida mundialmente como "*Double wishbone*" ou "*Double A arm*", e sua principal característica é a presença de dois braços ou bandejas, um superior e outro inferior que geralmente tem um formato triangular. Esse tipo de suspensão tem por finalidade priorizar a segurança do veículo, adotando ângulos e medidas que tornam o carro bastante estável nas curvas e nas situações de maior sollicitação. O resultado dessa configuração é uma suspensão bastante dura, que faz com que o piloto se sinta desconfortável, mas tenha um carro com o máximo de aderência e potência transmitida (PINTO, 2007).

O propósito deste trabalho é dimensionar o sistema de uma suspensão em um veículo de competição Fórmula SAE. Se faz de grande importância considerando que está ligado diretamente com a instabilidade do carro. Definir um correto desenvolvimento da suspensão torna-se uma tarefa complexa, devido ao grande

número de parâmetros para ajustar em um veículo, como ângulo de cambagem, ângulo de *caster*, pressão dos pneus, rigidez das molas. Além desses fatores, existem outros fatores como características do piloto de conduzir o veículo, tipo de pneus, tipo de pista, condições elétricas, que também devem ser considerados no dimensionamento. Com a utilização dos *softwares SuspensionSim e CarSim*, é possível simular a dinâmica do veículo, possibilitando assim obter-se os resultados.

1.1 TEMA

Este trabalho insere-se na temática de suspensão aplicada a um veículo de competição acadêmica do tipo fórmula, com auxílio do *software SuspensionSIM e CarSim*.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Este trabalho delimita-se na coleta de dados, através simulações computacionais, da utilização do protótipo do fórmula em rua asfaltada contendo retas e curvas, levantamento das informações, dimensionamento da suspensão, aquisição de novos amortecedores de acordo com os resultados colhidos, implementação do mesmo no protótipo em estudo e finalizando com testes.

1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

A eficácia de um sistema de suspensão é medida pela capacidade de diminuir as vibrações, proporcionar conforto aos passageiros e garantir o máximo de contato dos pneus do veículo com o solo. Desenvolver uma suspensão que garanta a dirigibilidade do carro, aliada com conforto e segurança são os princípios para o desenvolvimento de um projeto para suspensão. Agora, neste estudo de caso, adiciona-se o aumento de performance, considerando que o projeto é para um veículo de competição. Além disso, o sistema de suspensão deverá atender os requisitos de desempenho e segurança do projeto.

Considerando estes aspectos, com este trabalho, pretende-se responder a seguinte questão: é possível desenvolver um sistema de suspensão tipo duplo A para um veículo de competição, que atenda às exigências de performance e segurança requeridos nas normas da Fórmula SAE?

1.4 HIPÓTESES

Inicialmente, se estabelecem algumas hipóteses para o sistema de suspensão da Fórmula SAE. Considera-se que geralmente é um sistema otimizado, feito pela maioria das equipes utilizando materiais leves e resistentes, mas que atendem com segurança às necessidades causadas pelo movimento do veículo. Assim, visando a melhor maneira para desenvolver o sistema de suspensão, construiu-se as seguintes hipóteses:

- É tecnicamente possível dimensionar um sistema de suspensão utilizando materiais mais leves e resistentes;
- Os componentes do sistema de suspensão atenderão os parâmetros propostos;
- É possível utilizar um sistema de suspensão tipo duplo A que atenderá as normas da competição;
- O dimensionamento apresentará viabilidade em construção no protótipo;

1.5 JUSTIFICATIVA

Anualmente, a Sociedade de Engenheiros da Mobilidade (SAE) no Brasil realiza a competição acadêmica Fórmula SAE na cidade de Piracicaba – São Paulo, em que os participantes devem projetar, testar e competir com pequenos carros do tipo fórmula, com o objetivo de expandir o conhecimento técnico e as habilidades de liderança dos alunos. Neste sentido, o presente trabalho é motivado pelo desenvolvimento do sistema de suspensão do veículo da equipe FAVOR E-Racing para a participação na competição anual.

Este trabalho tem grande importância para a equipe, porque o sistema de suspensão é uma parte essencial do veículo e afeta muitos aspectos de seu comportamento dinâmico. Além disso, seus componentes devem resistir a condições operacionais adversas, razão pela qual a análise estrutural também deve ser realizada.

Assim, este trabalho justifica-se pela necessidade em compreender o processo envolvido no projeto da suspensão, tendo em mente que os resultados contribuirão para a equipe FAVOR E-Racing e outras equipes de projetos semelhantes desenvolvidos dentro da instituição, pois o desenvolvimento do trabalho se inicia na

parte do conceitual, passando por avaliações cinemáticas, até chegar nas análises estruturais.

1.6 OBJETIVOS

1.6.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é projetar e construir o sistema de suspensão tipo duplo A, especificamente para o veículo desenvolvido por engenharia e destinado para competição de fórmula SAE.

1.6.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo proposto ao presente trabalho, se fez necessário estabelecer os seguintes objetivos específicos:

- Pesquisar os parâmetros e tipos de suspensão;
- Projetar os principais componentes do sistema de suspensão em CAD;
- Modelar e simular o sistema de suspensão no *e SuspensionSim* e *CarSim*;
- Verificar os principais pontos de fadiga dos componentes do sistema de suspensão.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão literária consiste no embasamento teórico norteador para que seja possível alcançar os objetivos traçados para o projeto do produto. Assim, abordam-se os conceitos de um sistema de suspensão, principalmente, os conceitos dos componentes do sistema de suspensão para um veículo do tipo fórmula, características específicas e a utilidade dos conjuntos do sistema como um todo.

A análise abrange as nuances da competição realizada pela SAE BRASIL, a sistemática da equipe Fahor E-Racing e os materiais utilizados na fabricação dos componentes do sistema de suspensão dos veículos tipo fórmula.

2.1 A COMPETIÇÃO FÓRMULA SAE BRASIL

A Fórmula SAE BRASIL, bem como as demais provas elencadas, proporciona metas significativas aos alunos de Engenharia visando aplicar de forma prática os conhecimentos construídos durante o curso, por meio da criação de um projeto completo e construindo um carro tipo Fórmula. Formulada em 2004, 16ª edição completa um exitoso ciclo em 2021, buscando repetir o sucesso de 2018, ano em que o projeto envolveu mais de 1030 inscritos. As equipes que conquistam as melhores classificações representarão o Brasil e naturalmente o nome da instituição de ensino em duas competições internacionais nos Estados Unidos. (SAE BRASIL, 2021).

O evento tem o prazo estipulado de três dias, os carros são avaliados mediante provas estáticas e dinâmicas. Assim, a performance de cada projeto na pista, as apresentações técnicas das equipes e uma explanação de marketing forma o escopo final. É durante um bom período da competição, que os alunos remetem para o comitê organizador relatórios de estrutura, custos, atenuador de impacto e projeto. Engenheiros especialistas analisam cada pesquisa, e comunicam a nota desta primeira avaliação. Provas dinâmicas são realizadas no segundo dia do evento sendo que cada uma é mediada por pontuações distintas. (SAE BRASIL, 2021).

Mesmo com cunho de grande importância para futuros engenheiros, o desafio e a oportunidade de crescimento acompanham os envolvidos desde a primeira fase, o qual o trabalho de colaboração é um ícone fundamental para avançar para os próximos passos. Os alunos que destacarem-se, inúmeras vezes já conquistam um bom contrato de trabalho de uma grande montadora que apoia a competição já premeditando reter esses futuros talentos (SAE BRASIL, 2021).

2.2 SUSPENSÃO

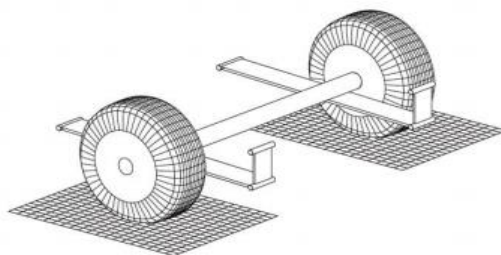
Durante a década de 1650 os primeiros indícios de um sistema de suspensão veicular foram registrados com o grande objetivo de reduzir o impacto que as carroças sofriam nas vias terrestres. Porém, somente no ano de 1878, que os primeiros arranjos de sistema de suspensão surgiram de forma independente (GENTA; MORELLO, 2009). Molas, amortecedores, pneus e mecanismos de atuação pertencem ao sistema de suspensão veicular. Existem muitas maneiras de configurar tais mecanismos, porém as mais comuns são:

- Eixo rígido e suas variações;
- Duplo A e suas variações;
- *McPherson* e suas variações.

2.2.1 Suspensão dependente

Segundo Jazar (2009), o sistema de suspensão dependente é aquele que apresenta uma conexão rígida que opera mediando as rodas de um eixo (eixo rígido), assim como é a maneira simplificada de fixar as rodas à estrutura do veículo. Atualmente, utiliza-se este tipo de suspensão, com mais frequência, no eixo traseiro de veículos de carga acompanhado, geralmente, por feixes de mola como apresentado na figura 1.

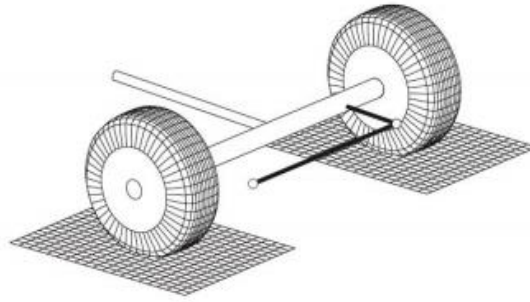
Figura 1 – Eixo rígido com feixes de molas



Fonte: Jazar, 2009

Conforme cita Jazar (2009) o eixo rígido pode ser alocado em conjunto com molas helicoidais, barras de controle, molas a ar ou demais articulações com a finalidade de potencializar a cinemática da estrutura e a dinâmica do veículo. A figura 2 retrata uma possibilidade de eixo rígido por meio de barra de controle, a barra *Panhard*, tendo a maior meta de condicionar o eixo.

Figura 2 – Eixo rígido com barra de controle, a barra *Panhard*



Fonte: Jazar, 2009

Existem diversos mecanismos de barras de controle que melhoram a cinemática das suspensões dependentes e, conseqüentemente, a dinâmica veicular. Porém, o próximo passo para um sistema mais eficiente é a utilização de mecanismos de suspensão independentes.

2.2.2 Suspensão independente

A denominação de sistemas de suspensão independentes se elenca onde o movimento de uma das rodas não entra em contato com a outra em um mesmo eixo. Os sistemas independentes menos complexos e preferidos como uso em veículos são McPherson e Duplo A, e os dois podem ser modelados cinematicamente em um formato de quatro barras ou demais variações (JAZAR, 2009).

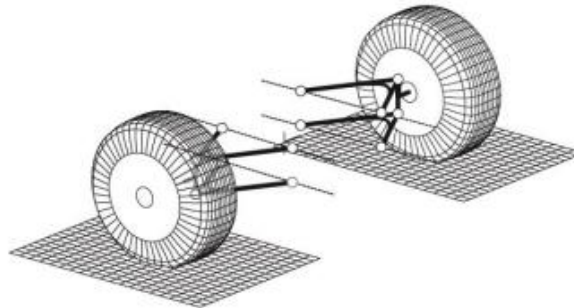
Desse modo, conforme cita Genta (2009) a suspensão independente possui braços sobrepostos, com nomenclaturas variadas dependendo de características do sistema, tendo como exemplo, os braços sobrepostos com formato "A" (Duplo "A"). A forma estilo forquilha é chamada também de Wishbone, pois é semelhante ao osso o qual pode ser encontrado no peito de aves.

2.2.3 Sistema duplo A

Nunes afirma que o conceito de suspensão tem como base a Segunda Guerra Mundial, pois a manga do eixo era composta por dois braços sobrepostos (NUNES, 2011). O sistema de suspensão Duplo A possui como grande característica duas barras de controle transversais em ambos os lados do veículo montados na carroceria ou chassi em uma superfície, já os demais são fixados em partes presentes na roda (manga de eixo) na outra extremidade.

A figura 3 demonstra como os elementos são acoplados conforme citados acima. A versatilidade geométrica a respeito da cinemática do mecanismo é a grande vantagem que tange o sistema de suspensão Duplo A. Essa forma de relacionar a suspensão fornece importantes parâmetros como ângulo de *camber*, para que mudanças com maior facilidade ocorram no intuito de condicionar o comportamento do veículo ao seu desempenho. (REIMPELL; STOLL; BETZLER, 2001).

Figura 3 – Suspensão Duplo A



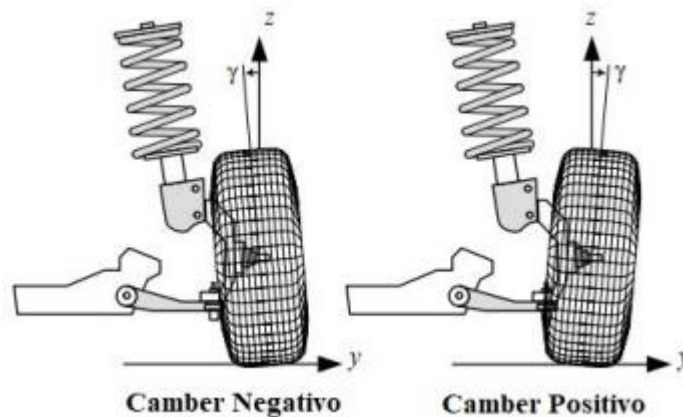
Fonte: Jazar, 2009

Mesmo com essa vantagem, a utilização de motores dianteiros transversais, que reduzem o espaço para os componentes da suspensão Duplo A, e o valor elevado da mesma fizeram com que outras formas de disposição emergissem do sistema de suspensão (GUENTA, 2009).

2.2.4 Ângulo de *Camber*

Já definidos os eixos e suas direções, pode-se então estabelecer um dos ângulos mais importantes para a dinâmica veicular lateral, o ângulo de *camber* (REIMPELL et. al., 2001). O ângulo de *camber* é definido como o ângulo entre o plano central da roda e o eixo z, conforme disposto na figura 4:

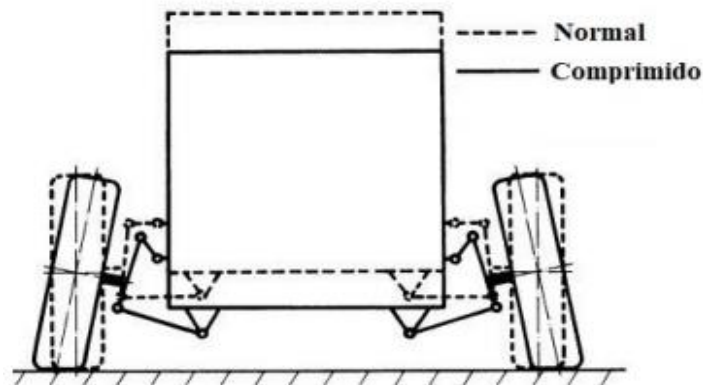
Figura 4 – Ângulo de *camber* positivo e negativo



Fonte: Adaptado de Jazar, 2009

Quando a parte superior da roda está inclinada em direção ao centro do veículo, pode-se afirmar que o ângulo de *camber* é negativo e vice-versa e como apresentado na figura 5, onde o ângulo em questão é representado por γ (REIMPELL et. al., 2001).

Figura 5 – Cinemática do *camber*



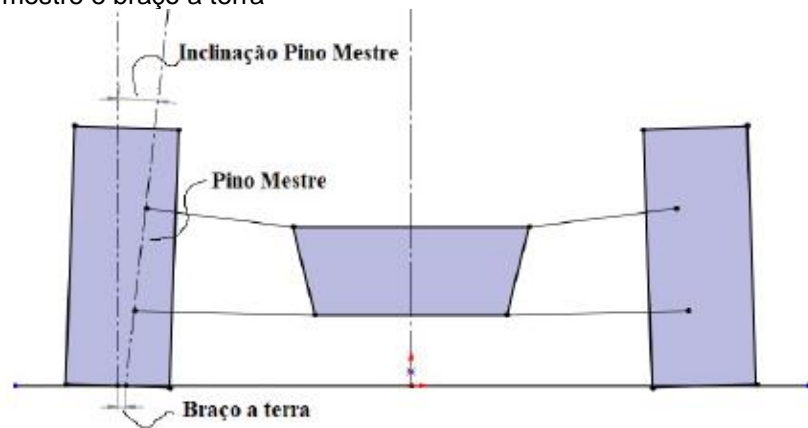
Fonte: Adaptado de Reimpell et al, 2001

Para a maior absorção de cargas laterais pelo pneu, atualmente utiliza-se o *camber* negativo em carros de passeio, onde utilizava-se o *camber* positivo por conta da concavidade das vias (REIMPELL et. al., 2001).

2.2.5 Pino Mestre e Braço a terra

O eixo de inclinação do pino mestre determina a exata posição do eixo de esterçamento das rodas (REIMPELL et al, 2001). Este é dependente de cada tipo de suspensão e o acondicionamento dos seus componentes, conforme figura 6.

Figura 6 – Pino mestre e braço a terra



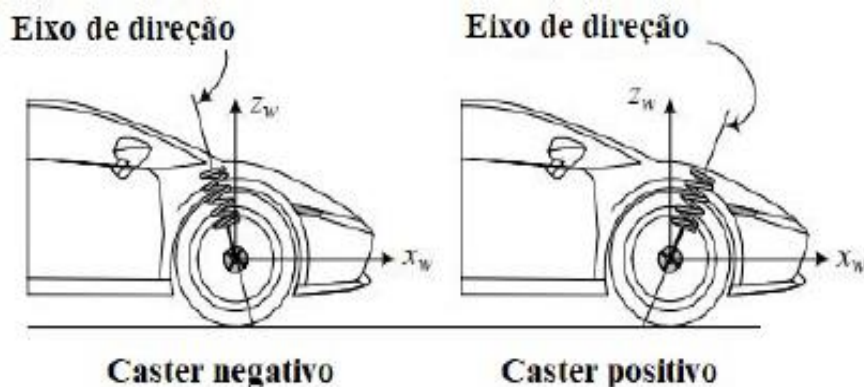
Fonte: Adaptado de REIMPELL et al, 2001

O braço a terra mostrado na figura 6, é a distância entre o ponto de intersecção do pino mestre com o solo e o plano médio do pneu na altura do contato com o solo. (REIMPELL et al, 2001).

2.2.6 Ângulo de *Caster* e *Caster Offset*

O ângulo entre a linha vertical traçada no centro do pneu e o eixo de esterçamento projetado no plano XZ é chamado de *Caster* (REIMPELL et al, 2001). Assim como o braço a terra, o *caster offset* é a distância entre o ponto de intersecção do pino mestre com o plano médio do pneu na altura do contato com o solo, conforme figura 7.

Figura 7 – Ângulo de *caster* positivo e negativo



Fonte: Adaptado de Jazar (2009)

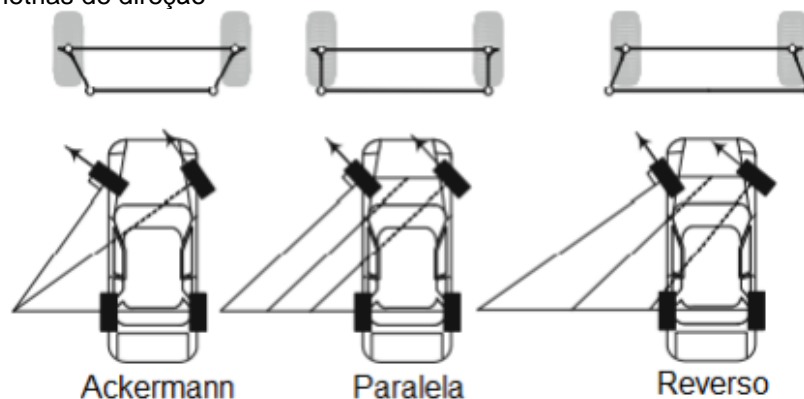
O *caster offset* afeta as forças e momentos resultantes nas rodas, ou seja, alinhamento do veículo em manobras como aceleração, frenagem e situações de

curvas. Adicionalmente, o ângulo de *caster* é responsável por variações de *camber* influenciadas pelo esterçamento e, com isso, a capacidade do veículo em fazer curvas, conforme menciona Jazar (2009).

2.2.7 Geometria de Ackerman

Jazar (2014) classifica as geometrias de direção em três configurações: Ackermann, Direção Paralela e Anti-Ackermann, também chamado de Ackermann reverso (Figura 8).

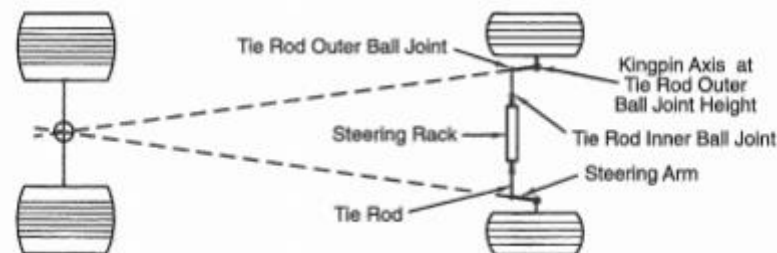
Figura 8 – Geometrias de direção



Fonte: Adaptado de Jazar, 2014

Gillespie (1992) aponta que a geometria de Ackermann apresenta grande influência em manobras de velocidade reduzida, porque a roda interna à curva se constitui em um ângulo de esterçamento maior que a externa, não havendo assim arrasto nas rodas ao efetivar as manobras. Milliken e Milliken (1995) ainda discutem para sobre a obtenção de uma geometria de Ackermann, com o braço alinhado na direção com o ponto central do eixo traseiro, segundo a figura 9.

Figura 9 – Geometria de Ackermann



Fonte: Milliken e Milliken, 1995

Ainda, conforme Milliken e Milliken (1995), o braço da direção é o segmento de reta que liga o ponto externo da caixa de direção à manga de eixo e deve ser cuidadosamente posicionado.

2.2.8 Razão de instalação

A forma como rigidez e amortecimento da suspensão são transmitidos para as rodas é ditada pela razão de instalação. De acordo com Milliken e Milliken (1995), a Razão de Instalação $I R$ é definida como a razão entre o deslocamento da suspensão Δ_S e o deslocamento vertical da roda relativo à carroceria Δ_W :

$$I R = \frac{\Delta_S}{\Delta_W} \quad (1)$$

Esta razão e também o seu inverso pode ser chamado de Razão de Movimento ou Ganho Mecânico ($M R$) e é adimensional. Segundo Milliken e Milliken (1995), a razão de instalação reduz tanto a força quanto o deslocamento e a mesma deve ser elevada ao quadrado para identificar a rigidez equivalente na roda K_W , resultando na equação:

$$K_W = K_W * I R^2 \quad (2)$$

O estudo da razão de instalação, em um veículo de classe Fórmula SAE, levando em conta os deslocamentos de um sistema de suspensão foi realizado por Menezes (2016). O desenvolvimento do projeto deve ser fortemente baseado nas contribuições propostas no trabalho supracitado.

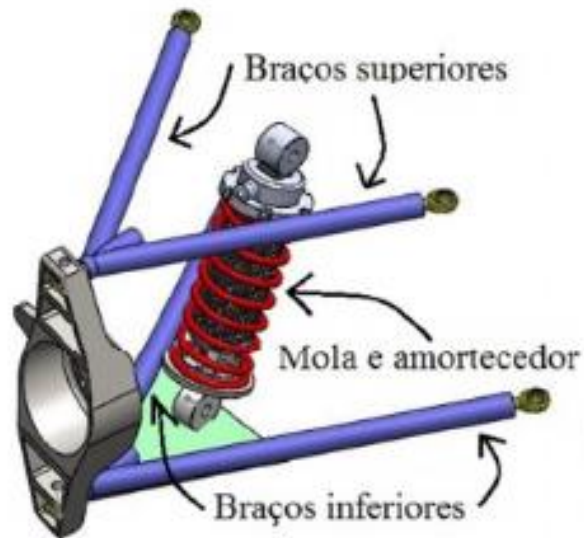
2.2.9 Escolha do sistema de suspensão (tipo Duplo A)

É por meio de um sistema de suspensão Duplo A que duas barras de controle transversais são fixadas em elementos em ambos os lados do veículo ligando uma extremidade a outra (REIMPELL et al, 2001).

A versatilidade geométrica referente a cinemática do mecanismo é a grande vantagem do sistema de suspensão Duplo A (REIMPELL et al, 2001). Além disso, essa suspensão fornece parâmetros de grande relevância, como ângulo de *camber*, condicionando com facilidade o comportamento do veículo em sua competência. Molas, amortecedores, bandejas e manga de eixo são alguns dos elementos que

compõem o veículo. A figura 10 aponta uma suspensão Duplo A-arm e alguns dos seus componentes fundamentais.

Figura 10 – Suspensão duplo A



Fonte: Autores, 2021

2.3 NORMAS DO PROJETO

A SAE disponibilizou normas e requerimento para serem seguidos na realização do projeto do Fórmula SAE, onde todas as equipes devem seguir esses itens para que atenda todos requisitos solicitados.

2.3.1 Requerimentos da suspensão

Os itens a seguir consistem em recortes obtidos a partir da regra geral para o desenvolvimento do veículo de competição classe Fórmula SAE (SAE BRASIL, 2021):

- B6.1.1 O carro deve ser equipado com suspensão de amortecedores e molas, dianteiro e traseiro, com pelo menos 50.8mm de curso vertical, 25,4mm para cima e 25,4mm para baixo. Os juízes têm o direito de desqualificar os carros que não cumprirem tal regra ou se o protótipo apresentar uma suspensão visivelmente falha na prova.
- B5.8.1 Para manter as pernas do piloto longe de componentes ponteados, toda parte móvel da suspensão, sistema de direção e outros componentes ponteados que estejam dentro do cockpit devem ser cobertos por um escudo de material sólido.

- B5.8.2 Os escudos da suspensão e da direção devem ser removíveis para inspeção.
- B6.1.2 Todos os pontos de conexão da suspensão devem estar visíveis para inspeção técnica.
- B6.2 Não existe uma distância mínima entre o chão e o chassi do carro. Porém, a regra D1.1.2 diz que a equipe pode ser penalizada caso alguma parte do carro venha ocasionar danos a superfície da pista.

3 METODOLOGIA

3.1 TIPO DE PESQUISA

Para o desenvolvimento do presente trabalho fez-se necessária a realização de pesquisas bibliográficas, para compor um referencial para o desenvolvimento do projeto de sistema de suspensão para o protótipo de carro elétrico tipo fórmula de maneira eficiente e eficaz. Com a realização de uma pesquisa, é possível de maneira mais clara e objetiva determinar qual deve ser o sistema a ser utilizado na suspensão, assim como nos outros sistemas que compõem o protótipo.

3.2 PESQUISA QUANTO AOS OBJETIVOS

Pesquisa exploratória: devido às competições do Fórmula SAE serem apenas para acadêmicos de engenharia e associados do SAE e o sistema proposto de suspensão é utilizado nas competições.

Pesquisa descritiva: descrever as competições do Fórmula, dimensionamento da suspensão e limitações da competição.

Bibliográfico: Estudo de literaturas sobre suspensão e regulamentos da competição.

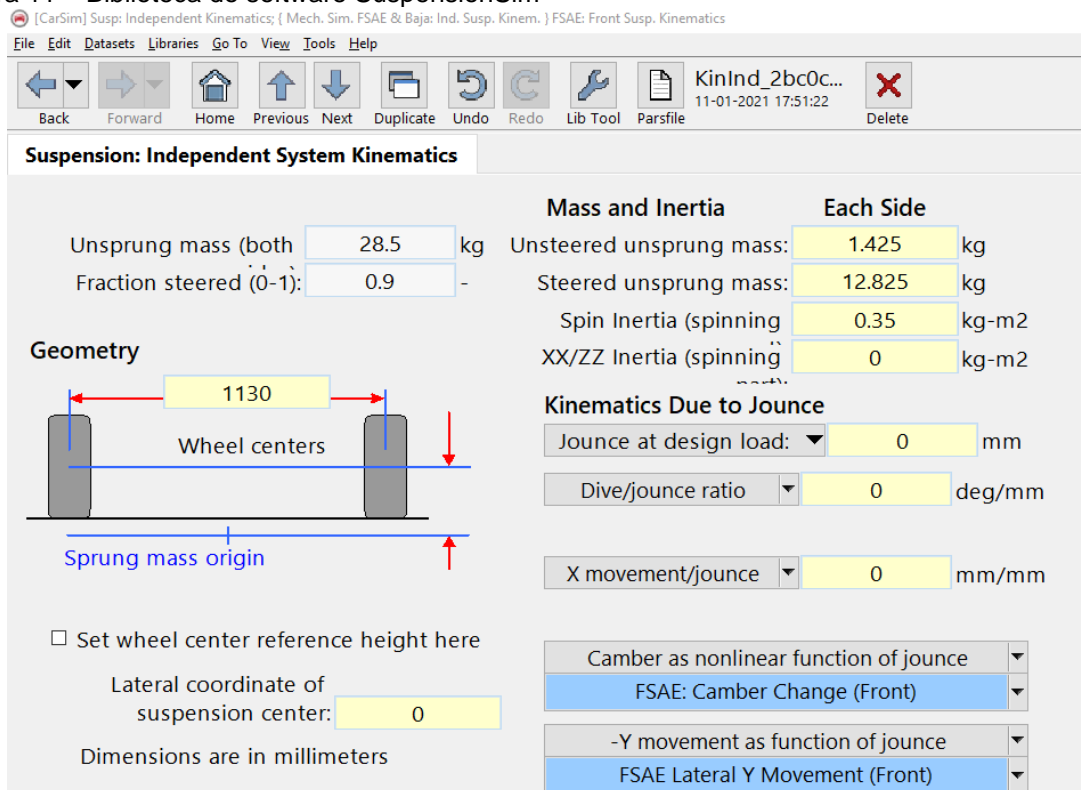
O protótipo deve possuir características de um carro de corrida, para que possa atender as suas funções de maneira que não prejudique a operação que está exercendo. O protótipo será composto por quatro rodas um motor elétrico, possibilitando tração traseira, além de um sistema de suspensão dependente que possibilitará o protótipo enfrentar obstáculos.

3.3 SOFTWARE EMPREGADO

Os *softwares* escolhidos para realização de simulações computacionais do projeto são o *SuspensionSim* e o *CarSim*, disponibilizados pela SAE Brasil, devido a uma licença acadêmica obtida pela equipe em 2021 por meio da faculdade.

Através da biblioteca do *software* como mostra a figura 11, é possível criar e testar o mecanismo de suspensão utilizando modelos disponíveis. Para a dianteira e traseira, utilizou-se o modelo base de suspensão duplo-A com amortecedores posicionados no braço inferior.

Figura 11 – Biblioteca do software SuspensionSim



Fonte: Autores, 2021

Para realizar as simulações de ambas as suspensões foram necessários informar os seguintes parâmetros de entrada para o *software* na figura 12, (as dimensões são em mm). Essa tabela de parâmetros foi disponibilizada pela SAE BRASIL, onde as medidas foram pegas no projeto em CAD, abaixo seguem parâmetros:

- Centro das rodas;
- Barra de amarração para rack;
- Barra de amarração da junta;
- Junta esférica inferior;
- Bucha frontal inferior;
- Bucha traseira inferior;
- Junta esférica superior;
- Bucha frontal superior;
- Bucha traseira superior;
- Topo da mola;
- Fundo da mola.

Figura 12 – Tabela dos parâmetros em mm, SuspensionSim

Tempos simulados pela equipe		
Aceleração	0,000	[s]
Skid Pad 1	0,000	[s]
Skid Pad 2	0,000	[s]
Autocross	0,000	[s]

SAE BRASIL
A CASA DO CONHECIMENTO EM INGENHARIA



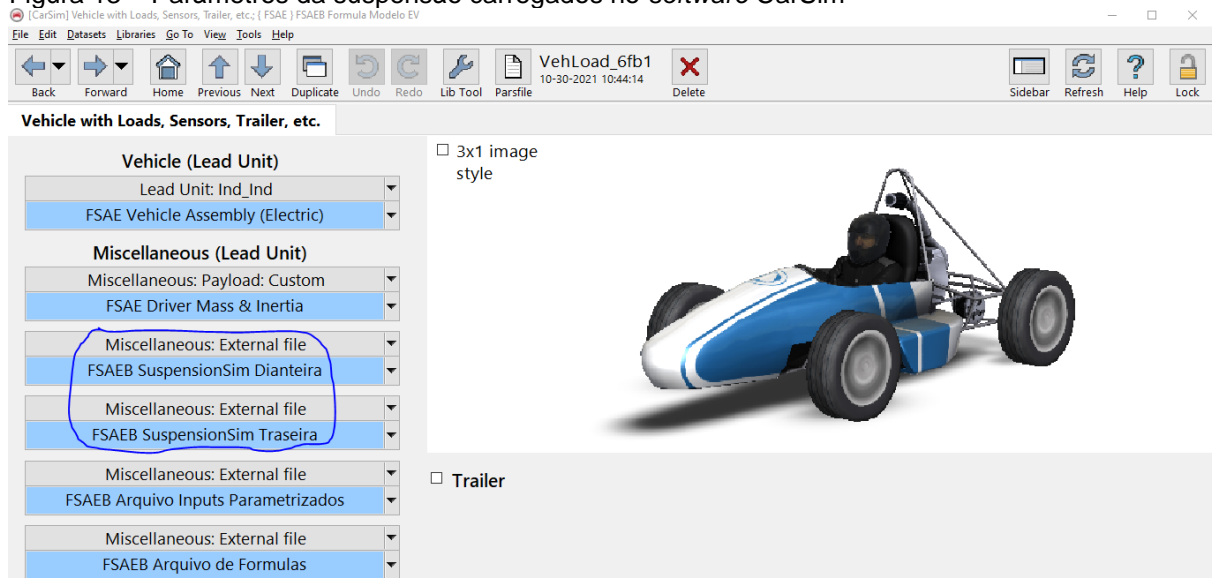
Inputs SuspensionSim															
Suspensão Dianteira					Suspensão Traseira					Limites					
Name	Symbol	X	Y	Z	Name	Symbol	X	Y	Z	Xmin	Xmax	Ymin	Ymax	Zmin	Zmax
Wheel center	p_wc	0	565	260	Wheel center	p_wc	0	574	260	0	0	50	700	260	260
Tie rod to Rack	p_tr	-120	250	152	Tie rod to Rack	p_tr	-120	250	152	-800	800	50	700	80	1000
Tie rod to Knuckle	p_tk	-108	540	218	Tie rod to Knuckle	p_tk	-108	540	218	-800	800	50	700	80	1000
Lower Ball Joint	p_ball_low	0	543	158	Lower Ball Joint	p_ball_low	0	543	158	-800	800	50	700	80	1000
Front-lower Bushing	p_bf_low	160	285	110	Front-lower Bushing	p_bf_low	160	285	110	-800	800	50	700	80	1000
Rear-lower Bushing	p_br_low	-160	285	110	Rear-lower Bushing	p_br_low	-160	285	110	-800	800	50	700	80	1000
Upper Ball Joint	p_ball_up	-30	509	338	Upper Ball Joint	p_ball_up	0	509	338	-800	800	50	700	80	1000
Front-upper Bushing	p_bf_up	160	285	300	Front-upper Bushing	p_bf_up	160	285	300	-800	800	50	700	80	1000
Rear-upper Bushing	p_br_up	-160	285	300	Rear-upper Bushing	p_br_up	-160	285	300	-800	800	50	700	80	1000
Spring top	p_st	0	275	370	Spring top	p_st	0	275	370	-800	800	50	700	80	1000
Spring bottom	p_sb	0	390	180	Spring bottom	p_sb	0	390	180	-800	800	50	700	80	1000

Dimensões em mm

Fonte: Autores, 2021

Após definidos todos os parâmetros no SuspensionSim, deve-se carregar para o software CarSim para executar as simulações conforme figura 13.

Figura 13 – Parâmetros da suspensão carregados no software CarSim



Fonte: Autores, 2021

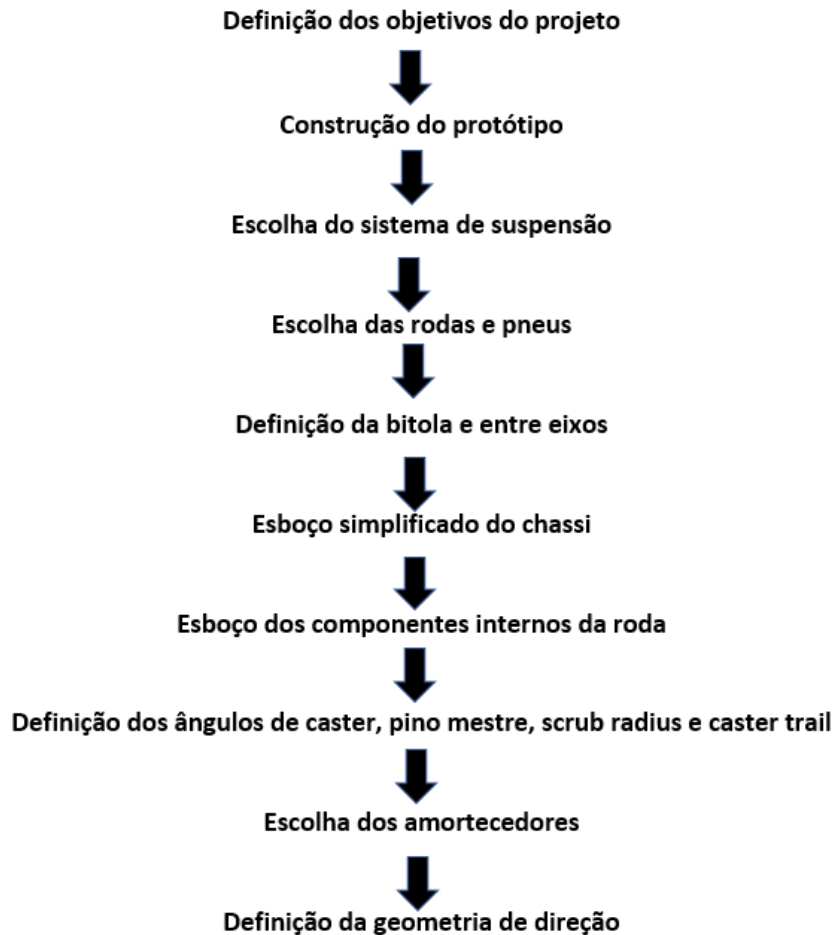
Dentro do CarSim, como mostra na figura 13, se define o tipo de motor, o modelo de pneus, opção por pacote aerodinâmico e rotação de largada, executadas manualmente através da interface gráfica. A massa do veículo é automaticamente atualizada baseada na escolha do motor, pacote aerodinâmico e baterias.

3.4 PLANEJAMENTO DO PROJETO

São necessárias várias interações para se obter resultados satisfatórios no desenvolvimento do projeto da suspensão, pois em muitos casos os parâmetros a

serem determinados influenciam-se mutuamente. Para economizar tempo e melhorar a eficiência neste processo, desenvolveu-se uma série de etapas para o projeto cinemático da suspensão, de acordo com a figura 14.

Figura 14 – Etapas para o projeto cinemático da suspensão



Fonte: Autores, 2021

Com base no planejamento, o projetista precisa observar que essas etapas não anulam as iterações necessárias para a realização do projeto de uma suspensão, porém indicam um caminho a ser seguido.

3.5 PROJETO DA SUSPENSÃO

Considerando que a função mais importante da suspensão de um carro de competição é manter os pneus em contato com o solo e com as maiores áreas de contato possíveis para assim garantir um comportamento ágil e proporcione confiança

ao piloto. Para iniciar o projeto deve-se definir metas que devem ser alcançadas por meio de suas realizações e, em seguida essas metas e as razões são:

- a) Redução de peso: Este parâmetro é indispensável para o sucesso na competição pois a potência instalada não pode passar de 80kW, segundo norma, e assim os carros ficam mais leves e são mais ágeis;
- b) Maximize a área de contato: Quanto maior a área de contato entre o pneu e o solo, maior será a aderência e, portanto, maior será a carga suportada, fazendo com que o veículo se desloque em curvas de alta velocidade. Nesse sentido, a cambagem deve desempenhar bem seu papel no cumprimento das condições apresentadas pelo veículo;
- c) Melhorar a manobrabilidade: Para ter um bom desempenho na competição o veículo precisa ter um conjunto de características favoráveis em testes dinâmicos. Uma das características consiste em permitir a execução de curvas com um raio relativamente pequeno, o que significa ter cuidado ao definir a direção e o tamanho da geometria do veículo.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

O desenvolvimento de um sistema de suspensão e análise dos resultados de um veículo de competição classe Fórmula SAE, cujo dimensionamento dos componentes da suspensão baseou-se e teve seu desenvolvimento seguindo as normas da competição, simulações via *software* e também em outros veículos de competição.

4.1 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

Durante o desenvolvimento do projeto, foram considerados e se buscou por componentes que atendam às normas, restrições e estivessem acessíveis, de acordo com as características mais importantes do protótipo, assim foram selecionados materiais e componentes para construir o protótipo, com base em outros tipos de competições de corrida, e o modo de funcionamento de cada componente, para que possa desempenhar as suas funções da forma mais eficiente. Na construção do protótipo o quadro 1 mostra os requisitos do projeto estabelecidos.

Quadro 1 – Requisitos do projeto

Descrição do requisito	Parte interessada
Atender ao regulamento FSAE	SAE
Possuir dois amortecedores na dianteira e na traseira	Equipe
Amortecedores devem possuir curso vertical de 50,8mm	SAE
Suportar peso do carro	Equipe
Deslocar a massa suspensa	Equipe
Pontos de fixação nos nós do chassi	Equipe
Finalizar o projeto até final de dezembro 2021	Equipe

Fonte: Autores, 2021

Ressalta-se que a relação custo-benefício deve ser priorizada na obtenção dos componentes do protótipo, portanto, o protótipo e seus componentes não são testados nas melhores condições de qualidade, pois a otimização dos custos do protótipo busca fazer com que o projeto se adapte a um custo mais baixo.

4.1.1 Escolha do sistema de suspensão (tipo Duplo A)

Para a escolha da suspensão, se utilizou como base estudos e dados de outras equipes de Fórmula SAE, onde o sistema de duplo A mostrou-se ser ideal para o modelo de protótipo, por trabalhar de forma independente cada roda, fornecendo mais conforto e controle de regulagem além de apresentar um designer moderno e arrojado para uma suspensão que fica exposta no veículo conforme figura 15.

Figura 15 – Suspensão exposta no veículo



Fonte: Autores, 2021

4.1.2 Escolha das rodas e pneus

No quesito rodas, o regulamento informa que devem ter 203,2 mm (8 polegadas) ou mais de diâmetro, não estipulando o tamanho máximo de utilização. Assim, realizou-se um estudo do acondicionamento dos componentes que ficam no seu espaço interno e, por meio de modelagem, verificou-se qual seria o diâmetro adequado para que o total esterçamento das rodas e o braço de direção não entre em contato com a parte interna das rodas. Foi definido a utilização de rodas aro de 13 polegadas de diâmetro, fabricado com material de liga leve, por acomodar todos os componentes, ter um custo menor e ser de fácil aquisição no mercado.

Em relação aos pneus, segundo a norma podem haver dois tipos de pneus (*Dry* e *Wet*), os pneus secos (*dry*), os mesmos podem ser de qualquer tamanho ou tipo, liso ou com ranhuras, e são utilizados na apresentação da Inspeção Técnica. Os pneus molhados (*Wet*), podem ser de qualquer tamanho e tipo com banda de rolagem

ou ranhuras onde o padrão da banda de rolagem ou ranhuras que tenham sido cortadas pelo fabricante do pneu, e a profundidade mínima de ranhura em relação ao piso deve ser de 2,4 mm.

Os quatro pneus e rodas secos ou os quatro pneus e rodas molhados não precisam ser idênticos. Uma vez que cada conjunto de pneus tenha sido apresentado para a Inspeção Técnica, nenhum composto ou tamanho de pneu, ou tipo ou tamanho de roda, deve ser alterado. Na figura 16 mostramos os pneus e rodas.

Figura 16 – Rodas e pneus



Fonte: Autores, 2021

A partir de pesquisas de outros projetos, análises de performance e maior contato com o solo foram escolhidos os pneus “molhados” *Yokohama 240/45 VR13*, próprios para competição, acoplados em rodas de liga leve aro 13 e conjunto de rodas e pneus comuns de carro secos aro 13, utilizados para apresentação do veículo quanto para inspeção técnica.

4.1.3 Definição da bitola e entre-eixos

Distância entre-eixos é o nome da distância entre o centro da roda dianteira e o centro da roda traseira, medida lateralmente, o ângulo de direção das duas rodas é zero. Quanto maior a distância entre os eixos de um veículo, maior será sua estabilidade em linha reta, pois, entre outros motivos, o momento de inércia de guinada torna-se maior à medida que o tamanho aumenta.

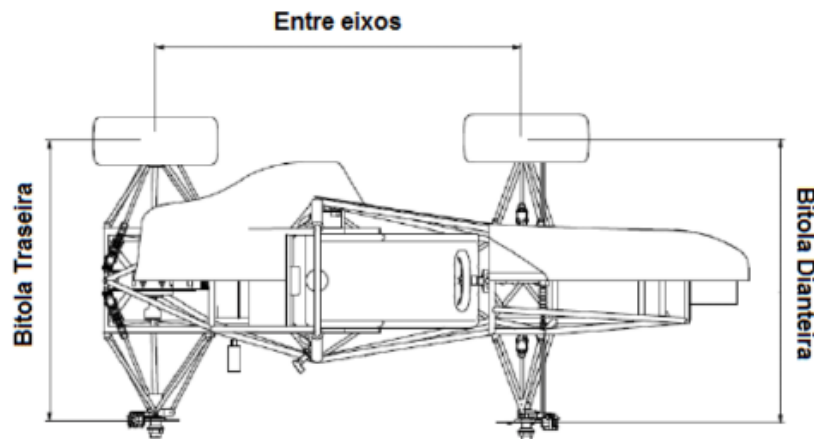
Segundo Reimpell (2001), nos carros de passeio, em geral, deseja-se ter um entre eixos relativamente longo já que com isso torna-se mais fácil a tarefa de acomodar os passageiros entre os eixos dianteiro e traseiro diminuindo a influência na distribuição de peso de acordo com o número de ocupantes.

O projeto da suspensão iniciou-se a partir da definição das bitolas e da distância entre eixos do veículo, definidas logo após a escolha dos pneus, são de extrema importância na determinação dos parâmetros geométricos.

Quando se deseja maximizar a aceleração lateral do veículo, a transferência lateral de carga é um item importante a ser analisado: quanto menor a transferência lateral, mais uniforme é a distribuição da carga nos pneus, de modo que eles suportarão mais forças laterais antes de ocorrerem deslizamentos. Com base nessa informação, pode-se concluir que a bitola deve ser a maior possível desde que não eleve demais o arrasto aerodinâmico nem comprometa o desempenho do carro devido a restrições de espaço da pista (Milliken & Milliken, 1995).

No caso das competições de Fórmula SAE, há uma distância entre eixos mínima permitida de 1525 milímetros e, com relação à largura do carro, a pista é muito estreita e impossibilita a utilização de bitolas muito grandes. A figura 17 ilustra melhor as medidas descritas acima.

Figura 17 – Ilustração das medidas bitolas e entre-eixos



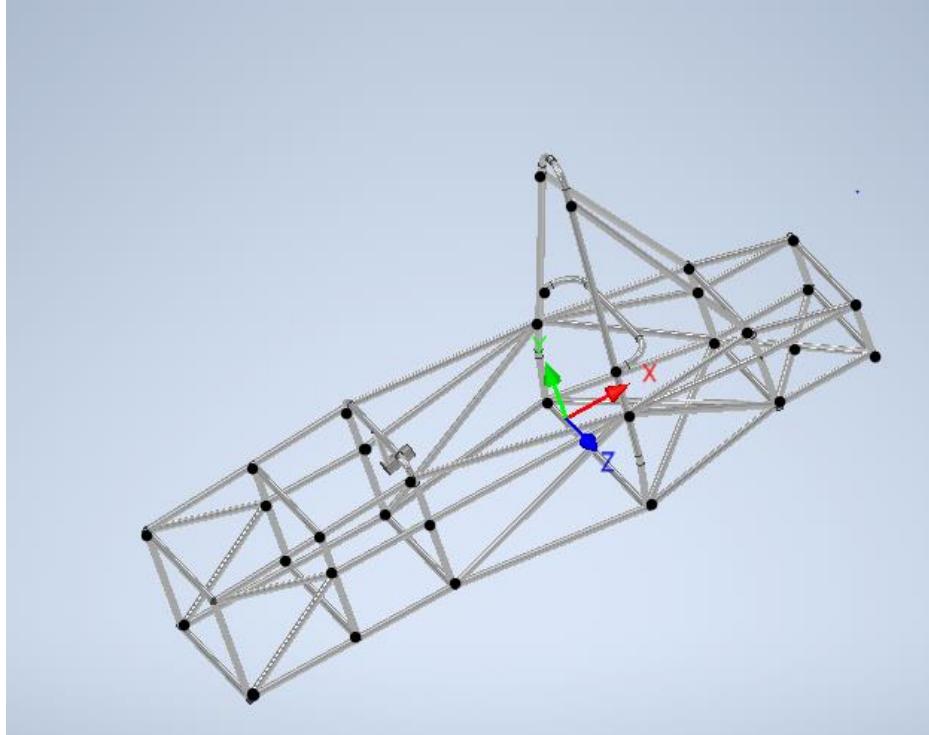
Fonte: ResearchGate, 2021

Para o protótipo em estudo, optou-se pelo modelo desenhado em CAD utilizado bitola dianteira e traseira 1130 mm e entre eixos 1610 mm, pois carros que utilizam valores menores mostram-se mais ágeis nas pistas, obedecendo melhor ao comando do piloto em curvas e, conseqüentemente fazendo voltas mais rápidas. Porém a utilização de eixos mais curtos faz com que os carros sejam menos estáveis em altas velocidades, no entanto a velocidade não irá ultrapassar 50 km/h, fazendo com que este não seja um fator preocupante, neste caso.

4.1.4 Esboço simplificado do chassi

No esboço da geometria do chassi na figura 18, considerou-se a localização dos principais componentes, e as restrições impostas pelas normas da SAE.

Figura 18 – Esboço do chassi



Fonte: Autores, 2021

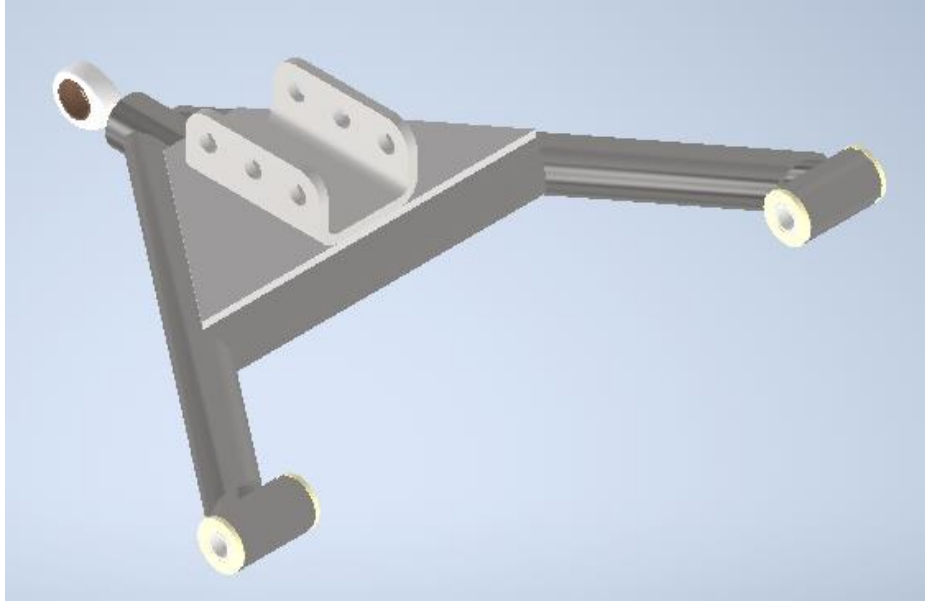
Com base na geometria de outros projetos e no esboço do novo formato do chassi, é possível visualizar os pontos fixos do braço de suspensão no chassi, permitindo maior liberdade de trabalho.

4.1.5 Esboço dos componentes internos da roda

4.1.5.1 Braços ou bandejas

É a principal diferença quando comparada com a suspensão independente. A função dele é servir de guia para o movimento das rodas. Esse tipo de bandeja, conforme figura 19, é comumente encontrado em veículos de competição devido a possibilidade de fazer diversos ajustes.

Figura 19 – Braços ou bandejas



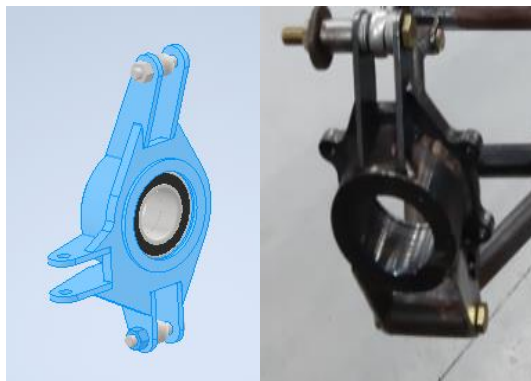
Fonte: Autores, 2021

É responsável pela fixação da roda no sistema de suspensão. Ele pode conectar o sistema de direção na dianteira, fazendo com que o carro possa esterçar através do movimento do volante, e

4.1.5.2 Manga de eixo ou montante

É responsável pela fixação da roda no sistema de suspensão. Ele pode conectar o sistema de direção na dianteira, fazendo com que o carro possa esterçar através do movimento do volante, e na traseira é ligado ao *tie rod* possibilitando fazer ajustes direcionais. Além disso, a manga de eixo dá suporte aos rolamentos da roda, e a pinça de freio, sendo assim um componente muito importante para o sistema. O componente pode ser visto na figura 20.

Figura 20 – Manga de eixo



Fonte: Autores, 2021

Após pesquisa de funcionamento da suspensão duplo A, optou-se em basear a manga de eixo em outros veículos do tipo fórmula, mas desenhada e dimensionada

com particularidades escolhidas pela equipe, com a manga de eixo reproduzida digitalmente em CAD. O projeto do sistema mecânico da suspensão entre a manga de eixo e o ponto de fixação no chassi seguiu de predefinições como:

- Distância entre rodas;
- Tamanho do amortecedor;
- Buchas de conexão;
- Terminais articulados.

4.1.6 Definição dos ângulos de *caster*, pino mestre, *scrub radius* e *caster trail*

Inicialmente, realizou-se um modelo e montagem inicial da manga de eixo, cubo de roda, disco e pinça de freio, que ficam alocados dentro da roda, como base rebuscada em pesquisas e outros projetos semelhantes, conforme figura 21.

Figura 21 – Componentes internos da roda em CAD

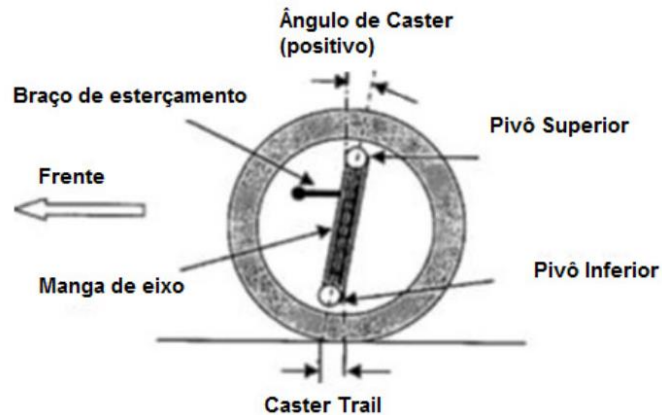


Fonte: Autores, 2021

Nesse processo, além de respeitar o tamanho próximo ao interior da roda para evitar interferências, também buscou-se construir componentes fáceis de montar. A partir de valores base, assim foram testados os pontos de fixação da suspensão, obtendo os seguintes parâmetros:

- Ângulo do pino mestre: 4,8 graus (positivo);
- Ângulo de *caster*: 7,2 graus (positivo);
- *Scrub radius*: 79,6 milímetros (positivo);
- *Caster trail*: 45,6 milímetros (positivo).

Figura 22 – Esboço do ângulo de *caster* e *caster trail*



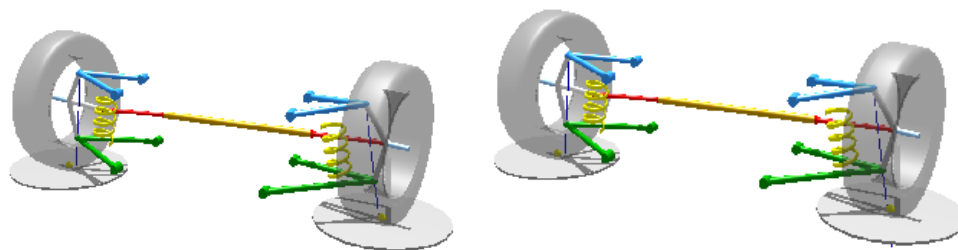
Fonte: Researchgate, 2021

A figura 22 nos mostra como foram feitas as medições do ângulo do pino mestre, ângulo de *caster*.

4.1.7 Simulações nos Softwares

Após a inserção dos dados de entrada no *software SuspensionSim*, o sistema carregou as informações fornecidas e gerou uma imagem virtual do sistema criado, como mostra a figura 23.

Figura 23 – Sistema de suspensão criado no ambiente virtual



FSAEB SLA, Ball-Joint Dianteira
{ 17aFSAEB - Suspensao Dianteira }

FSAEB SLA, Ball-Joint Traseira
{ 17aFSAEB - Suspensao Traseira }

Fonte: Autores, 2021

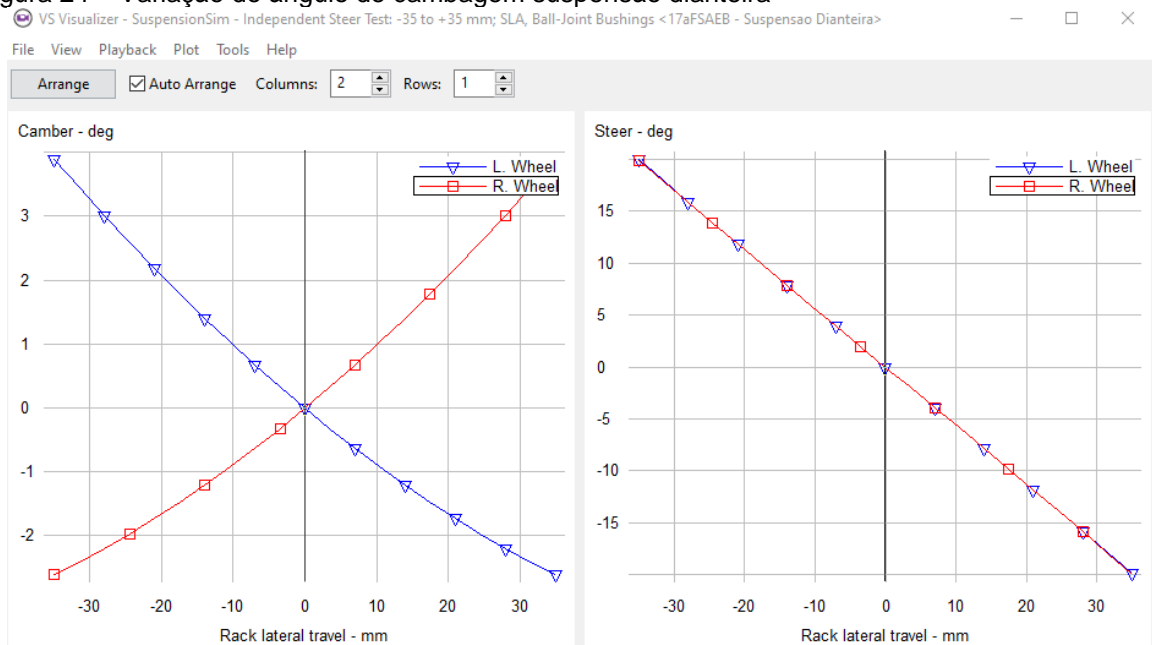
Com os parâmetros pré-definidos pela equipe, realizou-se as simulações computacionais, resultando em uma série de gráficos que descrevem diversos movimentos que ocorrem ao mesmo tempo, onde na suspensão dianteira possui três testes e a traseira apenas dois, pois não há sistema de esterçamento no eixo traseiro. Dentre os gráficos gerados, destaca-se as seguintes respostas do *software*:

- Variação de bitola;

- Variação de cambagem;
- Variação do ângulo de convergência;
- Migração lateral e vertical dos centros de rolagem;
- Porcentagem de Ackermann.

A partir de simulações computacionais com o auxílio do *software SuspensionSim* e *CarSim*, buscou-se garantir que a cambagem da roda dianteira externa à curva não ficasse positiva em nenhum momento. O ângulo de *camber* do gráfico é a rotação para fora de uma roda em relação ao chassi. Este conjunto de dados define a curvatura devido à geometria da suspensão, sem forças de cisalhamento do pneu e direção zero.

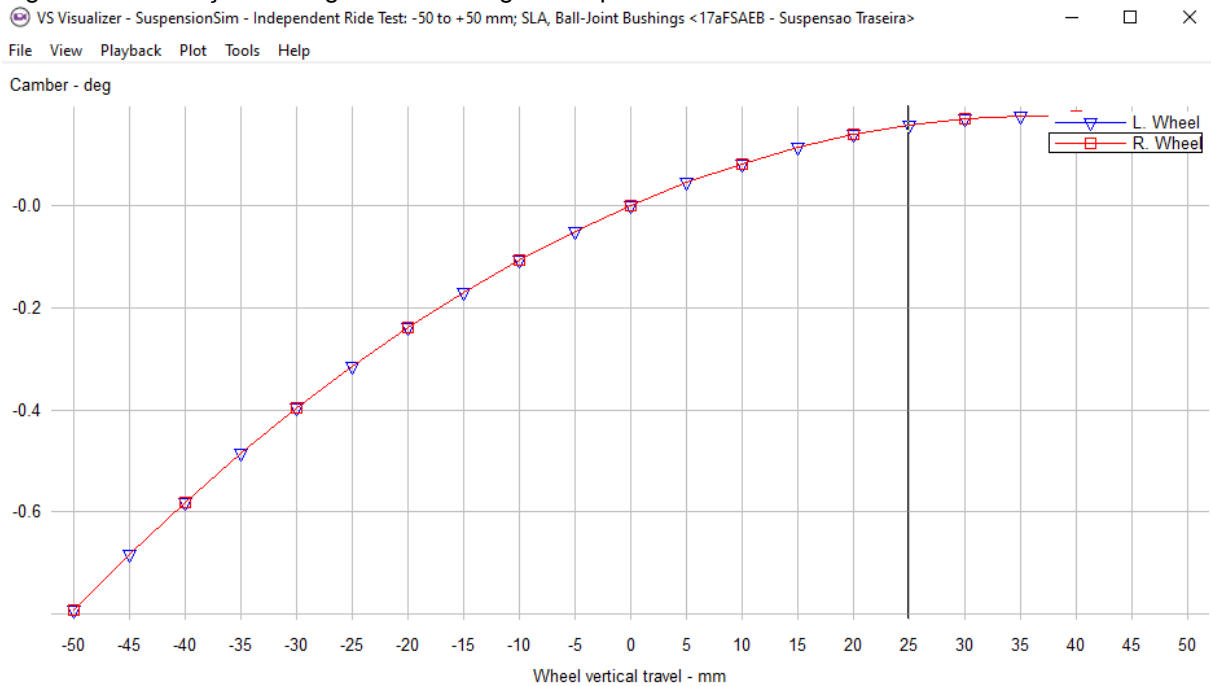
Figura 24 – Variação do ângulo de cambagem suspensão dianteira



Fonte: Autores, 2021

Constatou-se que, em curvas o ângulo de cambagem das rodas dianteiras esquerda e direita não se tornou diferente conforme figura 25, por tanto, na simulação o sistema de suspensão está apto para o protótipo.

Figura 25 – Variação do ângulo de cambagem suspensão traseira



Fonte: Autores, 2021

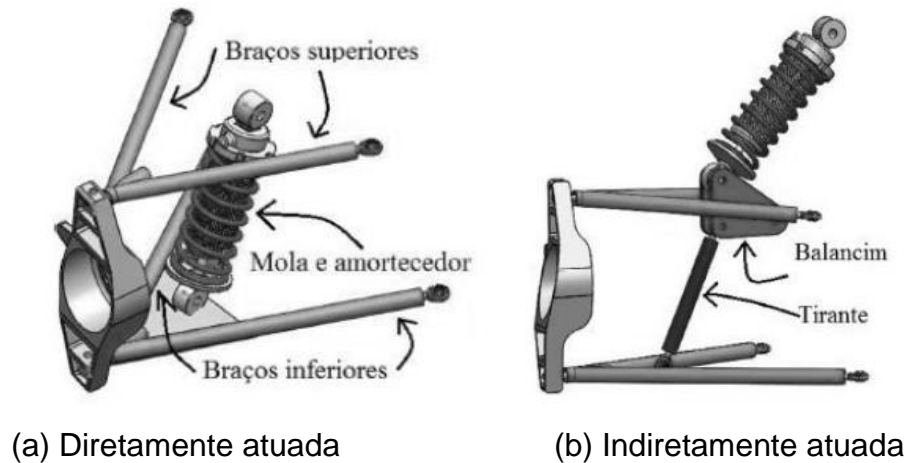
Nas rodas traseiras, verifica-se que o ângulo se torna positivo, o que faz com que os pneus traseiros deslizem mais do que os dianteiros, reduzindo assim o raio de viragem do veículo e tornando-o mais estável nas curvas, conforme figura 25.

4.2 PARÂMETROS DINÂMICOS

Os elementos responsáveis por este controle são as molas, amortecedores e suas características de rigidez e amortecimento. Tais elementos podem ser acondicionados de diversas formas.

Uma delas é diretamente no braço de suspensão, em um sistema duplo A (Figura 26 a), ou diretamente na manga de eixo, como em um sistema de suspensão *McPherson*. Também há outras formas de transmitir o movimento das rodas para as molas e amortecedores em um sistema do tipo duplo A, como a utilização de *pullrods* (atuação por meio de tirante e balancim) ou *pushrods* (atuação indireta empurrada através de barra e balancim), a última é apresentada na figura 26(b).

Figura 26 – Suspensão Duplo A

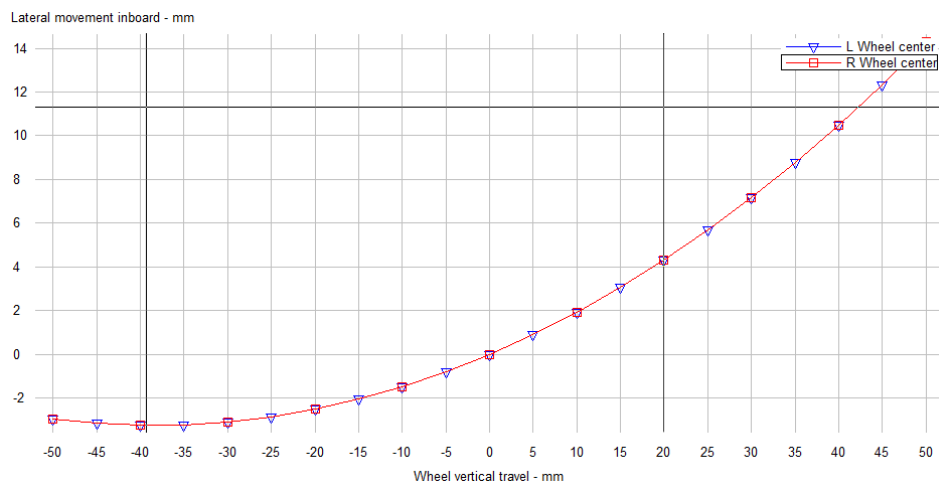


Fonte: Menezes, 2016

O sistema de amortecimento que foi escolhido para o protótipo é o diretamente atuada, por ser mais simples e atender conforme o projeto. O sistema composto ligando o amortecedor na bandeja e a outra extremidade no chassi do carro, com o sistema independente para cada roda, fazendo assim com que o movimento lateral devido a compressão da suspensão é positivo ao se mover para dentro.

Como mostra a figura 27 do movimento lateral, quando o $y +$ a mudança de coordenada é para o lado direito, e quando o $y -$ a mudança é positiva para o lado esquerdo.

Figura 27 – Movimento da suspensão lateralmente



Fonte: Autores, 2021

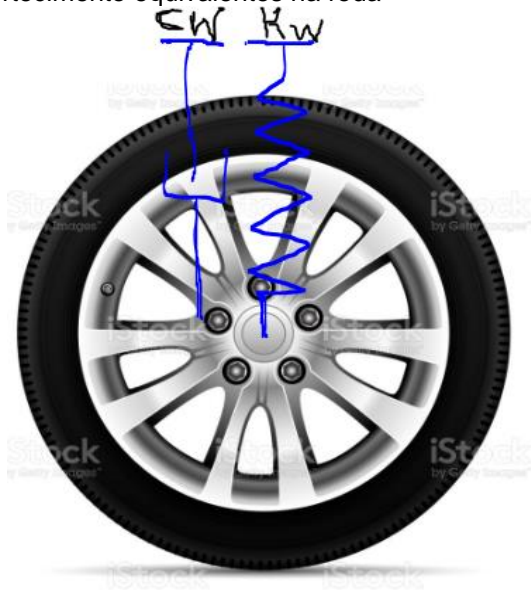
4.2.1 Rigidez e amortecimento

A rigidez do sistema de suspensão é definida pela constante de rigidez das molas K_s , mas a rigidez equivalente da roda K_w , devido à presença dos mecanismos da suspensão, não é necessariamente igual à rigidez das molas.

O amortecimento do sistema de suspensão é definido pela constante de amortecimento dos amortecedores C_s e, analogamente à rigidez, surge na roda um valor equivalente C_w .

A rigidez e o amortecimento equivalentes na roda são os parâmetros utilizados como premissas em um projeto dinâmico de suspensão, apresentados na figura 28.

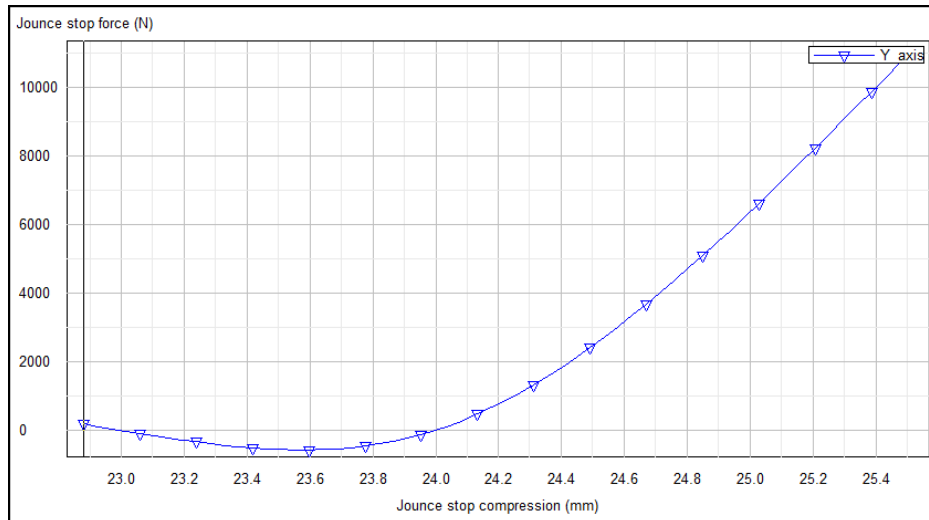
Figura 28 – Rigidez e o amortecimento equivalentes na roda



Fonte: Autores, 2021

Analisando-se a figura do gráfico gerado pelas simulações do *software CarSim* após apresentado os parâmetros, o comportamento de compressão da suspensão com a parada brusca mostrado na figura 29.

Figura 29 – Comportamento da suspensão em paradas bruscas



Fonte: Autores, 2021

O gráfico apresenta que a compressão da suspensão mostra a força de parada a 1000 N o amortecedor comprime 25,4 mm, em testes virtuais consegue manter-se sem danificar o sistema de suspensão.

4.2.2 Escolha dos amortecedores

A função principal do amortecedor é dissipar a energia do movimento do veículo que está armazenada nas molas. Um veículo que possui somente molas oscilaria durante muito tempo e perderia a sua estabilidade, uma vez que a força de excitação iria somar com forças de excitação futuras. Os amortecedores evoluíram ao longo do tempo, e desta evolução destaca-se algumas dessas etapas:

- Blow-off hydraulics ou sopro hidráulico;
- Atrito seco ou retentores;
- Hidráulico progressivo;
- Ajustáveis manual;
- Adaptáveis lento com alteração automática;
- Adaptáveis rápido;
- Magnetoreológico.

O veículo deve estar equipado com sistema de suspensão totalmente operacional com amortecedores dianteiro e traseiro, com curso mínimo utilizável das rodas de 50 mm, com motorista sentado. Os amortecedores foram escolhidos através

de pesquisas e testes em CAD, para que o sistema de amortecimento seja eficaz, isso faz com que o carro transfira o mínimo possível de vibração ao piloto.

Definiu-se que para este estudo seriam utilizados na traseira do veículo 2 amortecedores Fox Dhxrc4 *Kashima* 8.5 x 2.5, com compressão de baixa e alta velocidade, volume de assistência de ar, e regulagem de pressão da mola helicoidal, foram dimensionados para que suporte todo o peso e transmissão do veículo, conforme figura 30.

Figura 30 – Amortecedores traseiros



Fonte: Autores, 2021

Para o sistema de suspensão dianteira optou-se pela utilização de amortecedores hidráulicos compostos por duas câmaras, uma com reservatório de fluido e a outra com o tubo de pressão com regulagem da pressão da mola, são geralmente utilizados em motocicletas, como mostra a figura 31.

Figura 31 – Amortecedores dianteiros



Fonte: Autores, 2021

A escolha por esse modelo deve-se ao fato de que esse modelo ser mais simples e de custo menor, já que na dianteira do veículo o peso é menor que na traseira.

4.2.3 Definição da geometria de direção

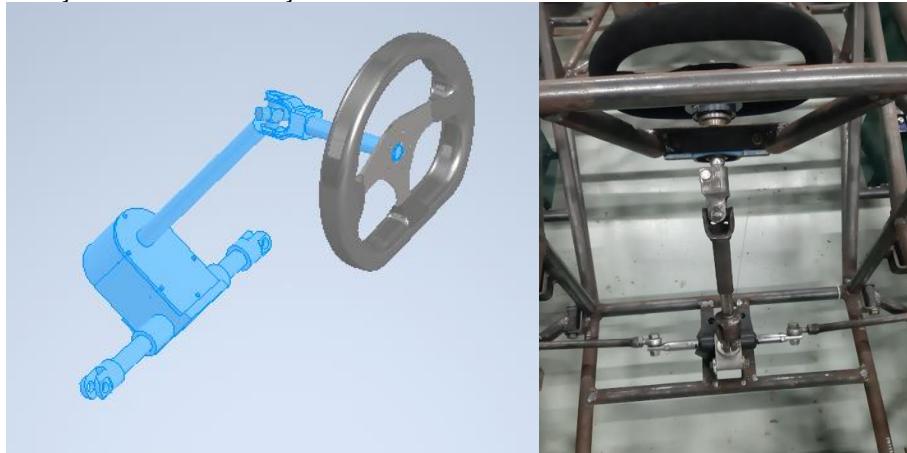
Segundo a norma do sistema de direção estipulada pela SAE Brasil:

- O volante deve ser conectado mecanicamente às rodas dianteiras;
- É proibida a direção eletricamente acionada das rodas dianteiras;
- Os sistemas de direção devem usar uma articulação mecânica rígida capaz de cargas de tensão e compressão para a operação
- O sistema de direção deve ter batentes de direção positivos que evitem o travamento das articulações de direção (a inversão de uma articulação de quatro barras em um dos pivôs). Os batentes podem ser colocados nos montantes ou no rack e devem evitar que as rodas e pneus entrem em contato com a suspensão, carroceria ou chassi durante as provas de pista;
- A folga permitida do sistema de direção é limitada a sete graus (7°) no total medido no volante;
- A cremalheira da direção deve ser mecanicamente fixada ao Chassi;

- As juntas entre todos os componentes que prendem o Volante à cremalheira da direção devem ser mecânicas e visíveis na Inspeção Técnica. Não são permitidas juntas coladas sem backup mecânico;
- Extremidades de haste esféricas e rolamentos esféricos na direção devem atender.

No protótipo, através de pesquisas e modelagem em CAD, optou-se pela aquisição de um modelo de caixa de direção disponível comercialmente no mercado, sendo necessárias algumas adaptações na barra de direção por parte da equipe, atendendo satisfatoriamente conforme projeto estipulado. O modelo utilizado da caixa de direção do mini *buggy* fapinha *Cros Dakar*, conforme figura 32.

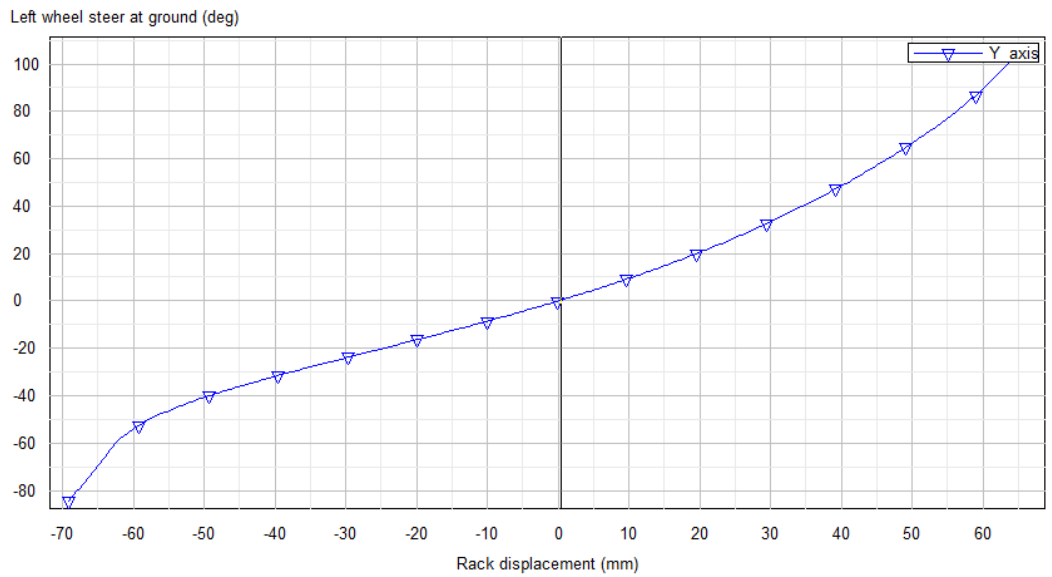
Figura 32 – Esboço da caixa de direção



Fonte: Autores, 2021

Utilizando a caixa de direção, cremalheira e pinhão prontos, a geometria de direção Ackerman, busca-se uma configuração com pouca alteração no ângulo de convergência das rodas dianteiras. A figura 33, nos mostra a cinemática da roda esquerda realizada através do *software CarSim*.

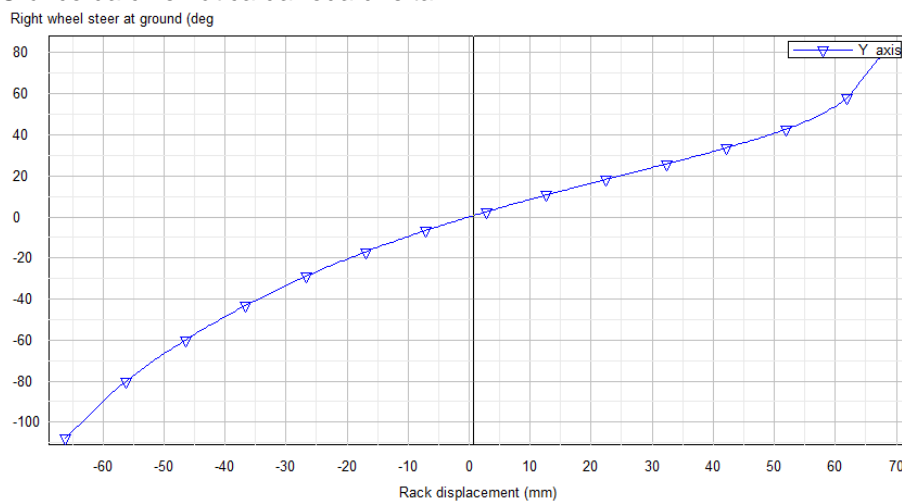
Figura 33 – Gráfico da cinemática da roda esquerda



Fonte: Autores, 2021

A figura 34, nos mostra a cinemática da roda direita realizada no *software CarSim*.

Figura 34 – Gráfico da cinemática da roda direita



Fonte: Autores, 2021

Após realizar algumas interações, obteve-se uma variação da cinemática da direção nas rodas esquerda e direita, onde as rodas no chão X o deslocamento da cremalheira a amplitude das rodas apresentaram comportamentos praticamente iguais, não apresentando risco de instabilidade direcional ao veículo, atendendo os requisitos do projeto.

4.2.4 Simulações no software CarSim

Foram realizadas diversas simulações computacionais com o auxílio do *software*, adicionando todos os parâmetros exigidos para que as simulações sejam fiéis com a realidade. As simulações apresentaram resultados do comportamento do carro em situação de competição virtual, mostrando vários gráficos que permitem a análise do desempenho visando melhorar o desenvolvimento do protótipo, conforme figura 35.

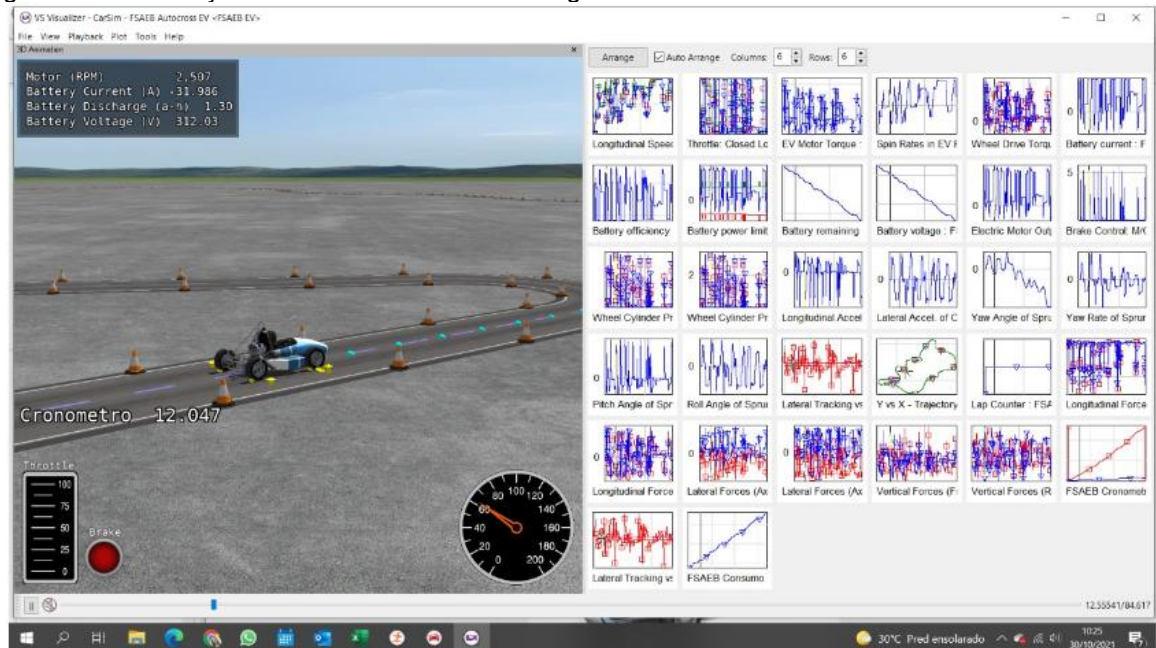
Figura 35 – Simulações *software CarSim*



Fonte: Autores, 2021

A figura 36 nos mostra a simulação do carro em pista virtual os gráficos que foram gerados pelo software, onde somente foram utilizados os principais que nos mostraram o comportamento do sistema de suspensão.

Figura 36 – Simulações *software CarSim* com os gráficos



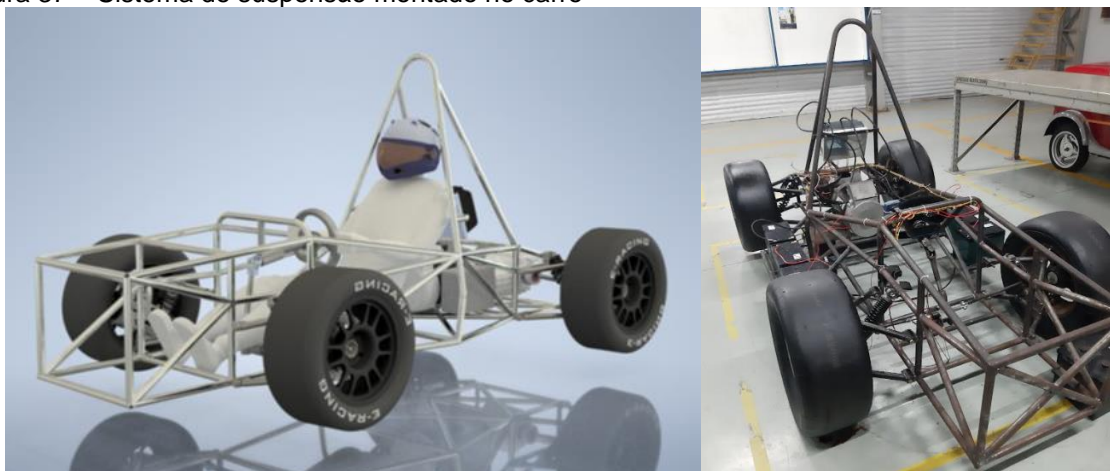
Fonte: Autores, 2021

Com as simulações realizadas foi possível concluir os testes virtuais do sistema de suspensão.

4.2.5 Modelagem da suspensão em CAD

Após realização das inúmeras interações e análise de dados, foi possível a conclusão do projeto da suspensão do veículo em CAD e no protótipo, conforme figura 37.

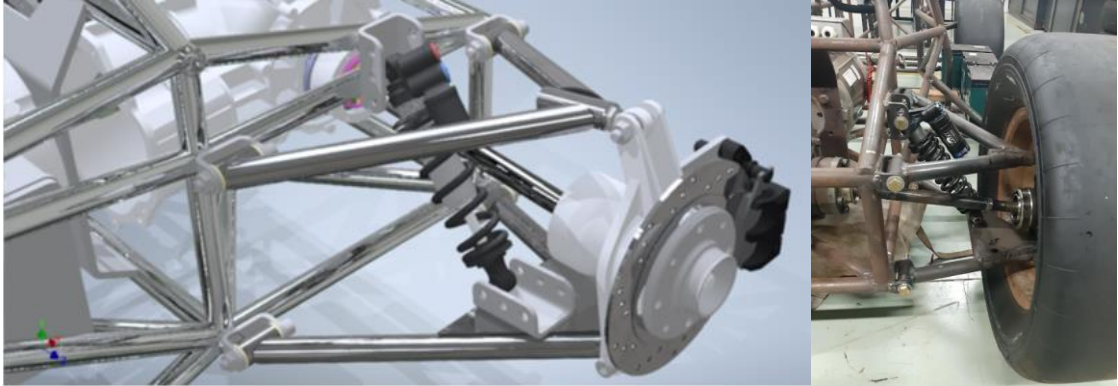
Figura 37 – Sistema de suspensão montado no carro



Fonte: Autores, 2021

A figura 38 aparenta em detalhe a suspensão traseira duplo A que foi desenvolvida em CAD e aplicada no protótipo.

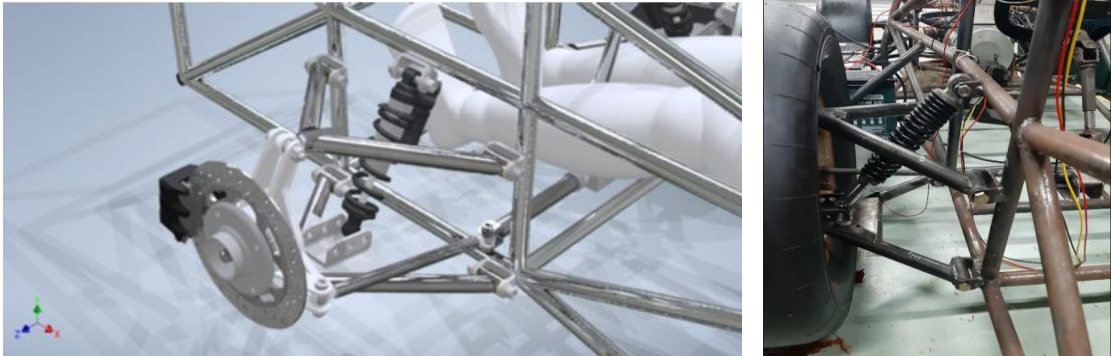
Figura 38 – Sistema de suspensão da traseira montado no carro



Fonte: Autores, 2021

A suspensão dianteira do carro também é duplo A, mas apresenta amortecedores mais simples que na traseira, conforme já foi mencionado anteriormente. A figura 39, mostra em detalhes o sistema de suspensão da dianteira em CAD e aplicada no protótipo.

Figura 39 – Sistema de suspensão da dianteira montado no carro



Fonte: Autores, 2021

Não serão abordados cálculos dos sistemas de suspensão, métodos de fabricação, gabaritos, escolha de materiais, utilizados na montagem e soldagem dos componentes do protótipo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve por objetivo introduzir os conceitos básicos para desenvolver o sistema de suspensão duplo A para um protótipo de um Fórmula SAE elétrico. A partir das simulações e análises apresentadas, percebe-se que todos os parâmetros tem uma grande correlação, não sendo possível praticamente fazer a alteração de um deles sem que se altere os demais.

No projeto houve um grande número de variáveis que fazem necessárias a utilização de ferramentas para facilitar o processo de interação, além de um método para dar seguimento correto nas etapas a serem seguidas. Para ajudar nas interações, utilizou-se um *software* computacional *SuspensionSim* e *CarSim*, para simular diversos mecanismos da suspensão, agilizando assim o processo como um todo. Contudo, conclui-se que o projeto e definição da geometria da suspensão é um processo interativo, onde obteve-se resultados satisfatórios em simulações virtuais do sistema de suspensão.

Com a análise dos resultados apresentados, buscou-se soluções para guiar o projetista durante a execução do sistema de suspensão do protótipo. Também se apresentou o projeto completo da suspensão, que está sendo empregado no primeiro protótipo de Fórmula SAE elétrico construído pela Equipe FAHOR E-Racing no ano de 2021.

A meta principal é a conclusão do protótipo, isto é, desenvolvê-lo com plenas condições de competir nas provas da Fórmula SAE Brasil, onde o mesmo deverá atender todas as normas da competição. O projeto desafia aos estudantes a terem uma ideia de como é aplicar na prática os conhecimentos aprendidos em sala de aula.

Como esse é o primeiro protótipo, podem haver diversas melhorias a serem executadas no veículo, como sugestão propõe-se a elaboração de estudos mais específicos sobre o comportamento da direção, pois o presente estudo da suspensão é apenas uma das áreas que englobam a dinâmica do veículo.

REFERÊNCIAS

- CICLE TAIWAN. **DNM burner RCP-2S AM/RF/DH bike rear shock**. Disponível em: <<https://cycltaiwan.com/dnm-burner-rcp-2s-am-fr-dh-bike-rear-shock.html>>. Acesso em: 15 abr. 2021.
- FARRINGTON, Jock Allen. **Redesign of an FSAE Race Car's Steering and Suspension System**. 2011. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/11049378.pdf>>. Acesso em: 15 abr. 2021.
- GENERAL SPRING. **What is a Leaf Spring?** 2021. Disponível em: <<https://www.generalspringkc.com/blog/what-is-a-leaf-spring/>>. Acesso em: 15 abr. 2021.
- GENTA, G.; MORELLO, L. **The Automotive Chassis. Vol. 1: Components design**. 1. ed. Berlin: Springer, 2009. (Mechanical Engineering Series).
- GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. SAE International, 1992.
- JAZAR, Reza N. **Vehicle Dynamics: Theory and Application**. 2ª ed. New York: Springer, 2014.
- JAZAR, R. N. **Vehicle dynamics: theory and applications**. 3. ed. New York, NY: Springer, 2009.
- MILLIKEN, W. F. MILLIKEN, D. L. **Race Car Vehicle Dynamics**. 1. Ed. Warrendale: SAE International, 1995.
- MENEZES, L. B. **Estudo no desenvolvimento de suspensão duplo “a” e aplicação em veículo de classe fórmula sae**. 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/165267>>. Acesso em: 23 jul. 2021.
- NUNES, R. **Contribuição para o desenvolvimento de uma suspensão aplicada a um veículo de fórmula SAE**. 2011. 158f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade de Brasília – UnB, Brasil, 2011.
- PINTO, T. H. A. **Projeto e Desenvolvimento do Sistema de Suspensão e Direção de um Veículo Fórmula SAE**. 2007. 78 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.
- REIMPELL, J.; STOLL, H.; BETZLER, J. W. **The automotive chassis: engineering principles**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.
- RESEARCHGATE, Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/Figura-29-Angulo-de-caster-e-caster-trail_fig2_301689421> Acesso em: 21 out. 2021.
- RIBEIRO, Pedro. **Fórmula SAE Brasil**. Disponível em: <<http://portal.saebrasil.org.br/programas-estudantis/fórmula-sae-brasil>>. Acesso em: 12 mar. 2021.
- SAE Campinas Disponível em : <https://www.researchgate.net/publication/301689421_Projeto_Cinematico_da_Suspe>

[nsao e Direcao de um Veiculo de Formula SAE Eletrico](#) Acesso em 29 out. 2021.

SAE BRASIL. **Fórmula SAE**. Disponível em: <<https://saebrasil.org.br/programas-estudantis/formula-sae-brasil/>>. Acesso em: 06 abr. 2021.

SAEBRASIL. **Preliminary**. 2016. Disponível em: <<https://fsaebrasil.online/index.php?sid=5f653a14df42bbe82ca28eb60b436797>>. Acesso em: 01 nov. 2021.

APÊNDICE – SUSPENSÃO TRASEIRA E DIANTEIRA

Suspensão traseira

Inputs SuspensionSim				
Suspensão Traseira				
Name	Symbol	X	Y	Z
Wheel center	p_wc	0	574	260
Tie rod to Rack	p_tr	-120	250	152
Tie rod to Knuckle	p_tk	-108	540	218
Lower Ball Joint	p_ball_low	0	543	158
Front-lower Bushing	p_bf_low	160	285	110
Rear-lower Bushing	p_br_low	-160	285	110
Upper Ball Joint	p_ball_up	0	509	338
Front-upper Bushing	p_bf_up	160	285	300
Rear-upper Bushing	p_br_up	-160	285	300
Spring top	p_st	0	275	370
Spring bottom	p_sb	0	390	180

Suspensão dianteira

Inputs SuspensionSim				
Suspensão Dianteira				
Name	Symbol	X	Y	Z
Wheel center	p_wc	0	565	260
Tie rod to Rack	p_tr	-120	250	152
Tie rod to Knuckle	p_tk	-108	540	218
Lower Ball Joint	p_ball_low	0	543	158
Front-lower Bushing	p_bf_low	160	285	110
Rear-lower Bushing	p_br_low	-160	285	110
Upper Ball Joint	p_ball_up	-30	509	338
Front-upper Bushing	p_bf_up	160	285	300
Rear-upper Bushing	p_br_up	-160	285	300
Spring top	p_st	0	275	370
Spring bottom	p_sb	0	390	180

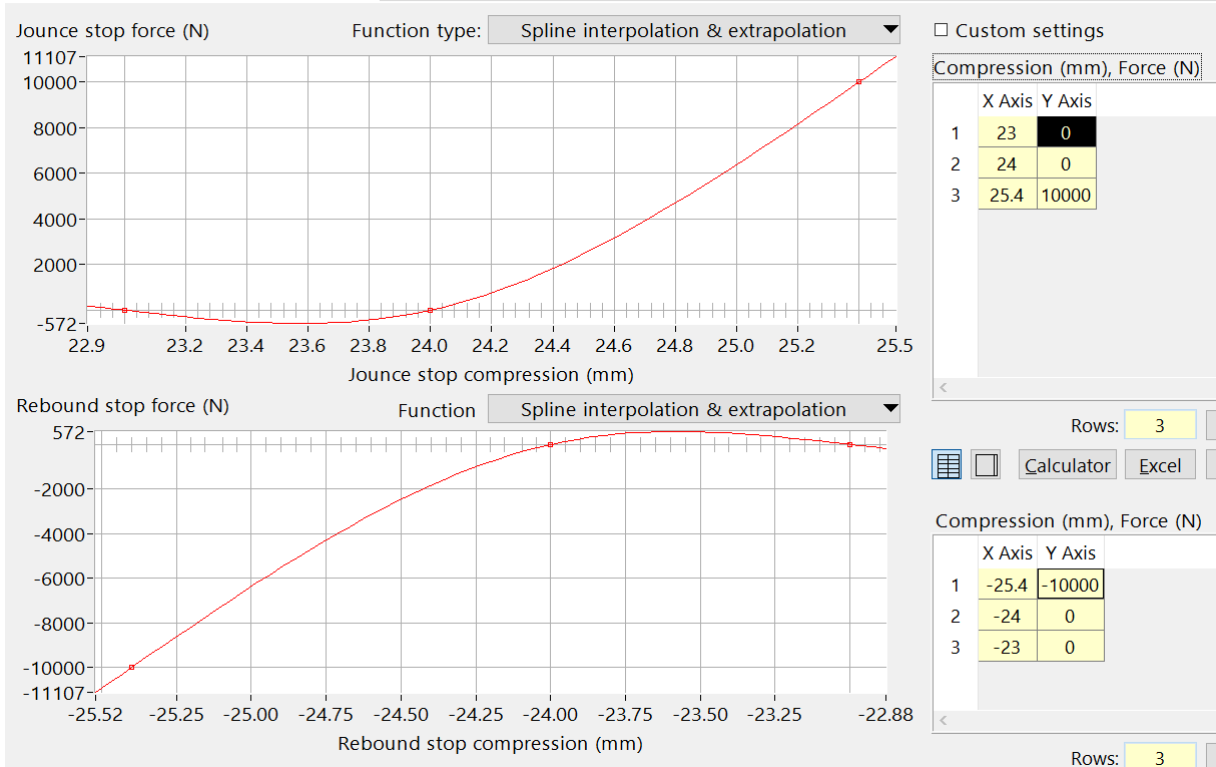
X Axis: Suspension cmp. (jounce) (mm)
 Y Axis: Lateral movement (mm)

	X Axis	Y Axis			
1	-50.8	-4.7498			
2	-48.26	-4.4196		19	-5.08 -0.2794
3	-45.72	-4.0894		20	-2.54 -0.127
4	-43.18	-3.7592		21	0 0
5	-40.64	-3.4544		22	2.54 0.127
6	-38.1	-3.1496		23	5.08 0.2286
7	-35.56	-2.8702		24	7.62 0.3302
8	-33.02	-2.5908		25	10.16 0.4318
9	-30.48	-2.3368		26	12.7 0.508
10	-27.94	-2.0828		27	15.24 0.5842
11	-25.4	-1.8288		28	17.78 0.6604
12	-22.86	-1.6002		29	20.32 0.7112
13	-20.32	-1.3716		30	22.86 0.7366
14	-17.78	-1.1684		31	25.4 0.762
15	-15.24	-0.9652			
16	-12.7	-0.7874			
17	-10.16	-0.6096			
18	-7.62	-0.4318			

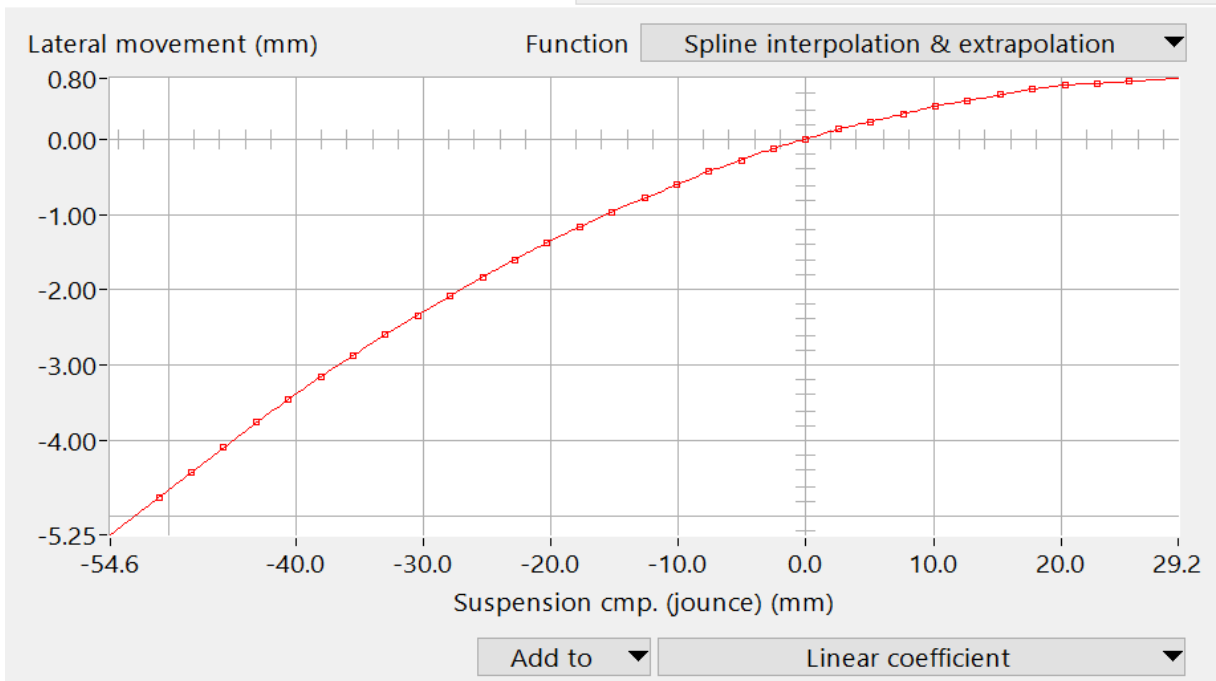
<

Rows: 31

Suspension: Jounce and Rebound Stops



Suspension: Lateral Movement Due to Jounce



ANEXO – REGULAMENTO TÉCNICO



GR - GENERAL REGULATIONS

GR.1 FORMULA SAE COMPETITION OBJECTIVE

GR.1.1 Collegiate Design Series

SAE International's Collegiate Design Series (CDS) programs prepare undergraduate and graduate engineering students in a variety of disciplines for future employment in mobility-related industries by challenging them with a real world, engineering application.

Through the Engineering Design Process, experiences may include but are not limited to:

- Project management, budgeting, communication, and resource management skills
- Team collaboration
- Applying industry rules and regulations
- Design, build, and test the performance of a real vehicle
- Interact and compete with other students from around the globe
- Develop and prepare technical documentation

Students also gain valuable exposure to and engagement with industry professionals to enhance 21st century learning skills, to build their own network and help prepare them for the workforce after graduation.

GR.1.2 Formula SAE Concept

The Formula SAE® competitions challenge teams of university undergraduate and graduate students to conceive, design, fabricate, develop and compete with small, formula style vehicles.

GR.1.3 Engineering Competition

Formula SAE® is an engineering education competition that requires performance demonstration of vehicles in a series of events, both off track and on track against the clock.

Each competition gives teams the chance to demonstrate their creativity and engineering skills in comparison to teams from other universities around the world.

GR.1.4 Vehicle Design Objectives

GR.1.4.1 Teams are to assume that they work for an engineering firm that is designing, fabricating, testing and demonstrating a prototype vehicle.

GR.1.4.2 The vehicle should have high performance and be sufficiently durable to successfully complete all the events at the Formula SAE competitions.

GR.1.4.3 Additional design factors include: aesthetics, cost, ergonomics, maintainability, and manufacturability.

GR.1.4.4 Each design will be judged and evaluated against other competing designs in a series of Static and Dynamic events to determine the vehicle that best meets the design goals and may be profitably built and marketed.

GR.1.5 Good Engineering Practices

Vehicles entered into Formula SAE competitions should be designed and fabricated in accordance with good engineering practices.

**GR.1.6 Restriction on Vehicle Use**

SAE International, competition organizer(s) and officials are not responsible for use of vehicles designed in compliance with these Formula SAE Rules outside of the official Formula SAE competitions.

V - VEHICLE REQUIREMENTS

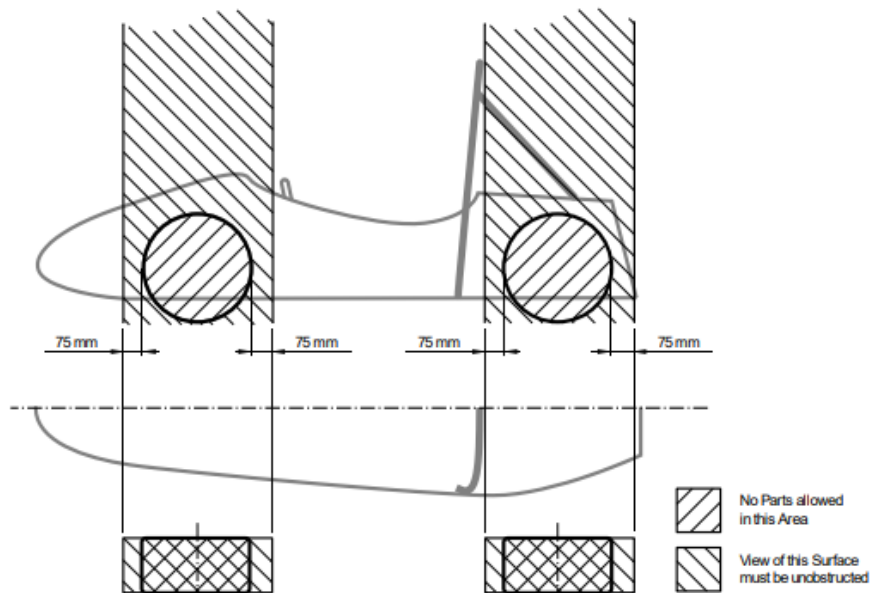
V.1 CONFIGURATION

The vehicle must be open wheeled and open cockpit (a formula style body) with four wheels that are not in a straight line.

V.1.1 Open Wheel

Open Wheel vehicles must satisfy all of the following criteria:

- The top 180° of the wheels/tires must be unobstructed when viewed from vertically above the wheel.
- The wheels/tires must be unobstructed when viewed from the side.
- No part of the vehicle may enter a keep out zone defined by two lines extending vertically from positions 75 mm in front of and 75 mm behind, the outer diameter of the front and rear tires in the side view elevation of the vehicle, with tires steered straight ahead. This keep out zone will extend laterally from the outside plane of the wheel/tire to the inboard plane of the wheel/tire.



V.1.2 Wheelbase

The vehicle must have a minimum wheelbase of 1525 mm

V.1.3 Vehicle Track

V.1.3.1 The track and center of gravity must combine to provide sufficient rollover stability. See **IN.9.2**

V.1.3.2 The smaller track of the vehicle (front or rear) must be no less than 75% of the larger track.

**V.1.4 Ground Clearance**

V.1.4.1 Ground clearance must be sufficient to prevent any portion of the vehicle except the tires from touching the ground during dynamic events.

V.1.4.2 Intentional or excessive ground contact of any portion of the vehicle other than the tires will forfeit a run or an entire dynamic event.

The intent is that sliding skirts or other devices that by design, fabrication or as a consequence of moving, contact the track surface are prohibited and any unintended contact with the ground which causes damage, or in the opinion of the Dynamic Event Officials could result in damage to the track, will result in forfeit of a run or an entire dynamic event

V.2 DRIVER

V.2.1 Accommodation

V.2.1.1 The vehicle must be able to accommodate drivers of sizes ranging from 5th percentile female up to 95th percentile male.

- Accommodation includes driver position, driver controls, and driver equipment.
- Anthropometric data may be found on the FSAE Online Website.

V.2.1.2 The driver's head and hands must not contact the ground in any rollover attitude.

V.2.2 Visibility

- a. The driver must have sufficient visibility to the front and sides of the vehicle
- b. When seated in a normal driving position, the driver must have a minimum field of vision of 100° to both sides
- c. If mirrors are required to meet this rule, they must remain in place and adjusted to enable the required visibility throughout all dynamic events.

V.3 SUSPENSION AND STEERING

V.3.1 Suspension

V.3.1.1 The vehicle must be equipped with a fully operational suspension system with shock absorbers, front and rear, with usable minimum wheel travel of 50 mm, with a driver seated.

V.3.1.2 Officials may disqualify vehicles which do not represent a serious attempt at an operational suspension system, or which demonstrate handling inappropriate for an autocross circuit.

V.3.1.3 All suspension mounting points must be visible at Technical Inspection by direct view or by removing any covers.

V.3.1.4 Fasteners in the Suspension system are **Critical Fasteners**, see **T.8.2**

V.3.1.5 All spherical rod ends and spherical bearings on the suspension and steering must be one of:

- Mounted in double shear
- Captured by having a screw/bolt head or washer with an outside diameter that is larger than spherical bearing housing inside diameter.

V.3.2 Steering

V.3.2.1 The Steering Wheel must be mechanically connected to the front wheels.

V.3.2.2 Electrically actuated steering of the front wheels is prohibited.



- V.3.2.3 Steering systems must use a rigid mechanical linkage capable of tension and compression loads for operation
 - V.3.2.4 The steering system must have positive steering stops that prevent the steering linkages from locking up (the inversion of a four bar linkage at one of the pivots). The stops may be placed on the uprights or on the rack and must prevent the wheels and tires from contacting suspension, bodywork, or Chassis during the track events.
 - V.3.2.5 Allowable steering system free play is limited to seven degrees (7°) total measured at the steering wheel.
 - V.3.2.6 The steering rack must be mechanically attached to the Chassis
 - V.3.2.7 Joints between all components attaching the Steering Wheel to the steering rack must be mechanical and be visible at Technical Inspection. Bonded joints without a mechanical backup are not permitted.
 - V.3.2.8 Fasteners in the steering system are **Critical Fasteners**, see **T.8.2**
 - V.3.2.9 Spherical rod ends and spherical bearings in the steering must meet **V.3.1.5 above**
 - V.3.2.10 Rear wheel steering may be used.
 - a. Rear wheel steering must incorporate mechanical stops to limit the range of angular movement of the rear wheels to a maximum of six degrees (6°).
 - b. The team must provide the ability for the steering angle range to be verified at Technical Inspection with a driver in the vehicle.
 - c. Rear wheel steering may be electrically actuated.
- V.3.3 Steering Wheel**
- V.3.3.1 In any angular position, the top of the Steering Wheel must be no higher than the top-most surface of the Front Hoop. See figure following **F.5.8.6**
 - V.3.3.2 The Steering Wheel must be attached to the column with a quick disconnect.
 - V.3.3.3 The driver must be able to operate the quick disconnect while in the normal driving position with gloves on.
 - V.3.3.4 The Steering Wheel must have a continuous perimeter that is near circular or near oval. The outer perimeter profile may have some straight sections, but no concave sections. "H", "Figure 8", or cutout wheels are not allowed.

the tire manufacturer or appointed agent.

Any grooves that have been cut must have documented proof that this rule was met

- There is a minimum tread depth of 2.4 mm

V.4.3.3 Tire Set

- a. All four Dry Tires and Wheels or all four Wet Tires and Wheels do not have to be identical.
- b. Once each tire set has been presented for Technical Inspection, any tire compound or size, or wheel type or size must not be changed.

V.4.3.4 Tire Pressure

- a. Tire Pressure must be in the range allowed by the manufacturer at all times.
- b. Tire Pressure may be inspected at any time

V.4.3.5 Requirements for All Tires

- a. Teams must not perform any hand cutting, grooving or modification of the tires.
- b. Tire warmers are not allowed.
- c. No traction enhancers may be applied to the tires at any time onsite at the competition.

F - CHASSIS AND STRUCTURAL

F.1 DEFINITIONS

F.1.1 Chassis

The fabricated structural assembly that supports all functional vehicle systems.

This assembly may be a single fabricated structure, multiple fabricated structures or a combination of composite and welded structures.

F.1.2 Frame Member

A minimum representative single piece of uncut, continuous tubing.

F.1.3 Monocoque

A type of Chassis where loads are supported by the external panels

F.1.4 Main Hoop

A roll bar located alongside or just behind the driver's torso.

F.1.5 Front Hoop

A roll bar located above the driver's legs, in proximity to the steering wheel.

F.1.6 Roll Hoop(s)

Referring to both the Front Hoop AND the Main Hoop

F.1.7 Roll Hoop Bracing Supports

The structure from the lower end of the Roll Hoop Bracing back to the Roll Hoop(s).

F.1.8 Front Bulkhead

A planar structure that provides protection for the driver's feet.

F.1.9 Impact Attenuator

A deformable, energy absorbing device located forward of the Front Bulkhead.

F.1.10 Primary Structure

The combination of the following components:

- Main Hoop
- Front Hoop
- Roll Hoop Braces and Supports
- Side Impact Structure
- Front Bulkhead
- Front Bulkhead Support
- Any Frame Members, guides, or supports that transfer load from the Driver Restraint System

F.1.11 Primary Structure Envelope

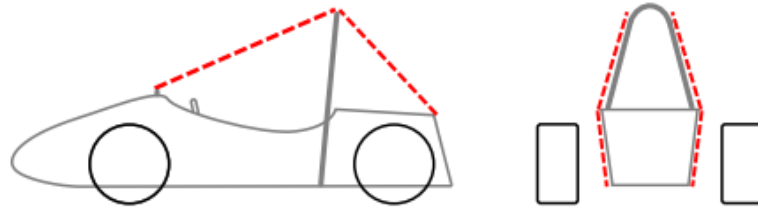
A volume enclosed by multiple planes, each of which are tangent to the outermost surface of all the Primary Structure Frame Members.

**F.1.12 Major Structure**

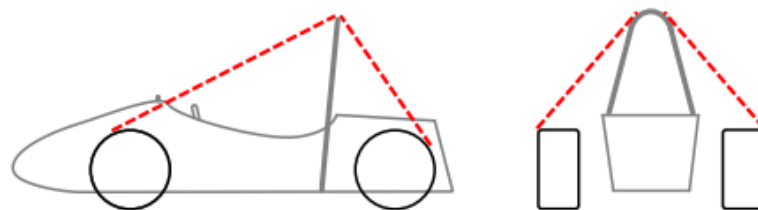
The portion of the Chassis that lies inside the Primary Structure Envelope, excluding the Main Hoop Bracing and the portion of the Main Hoop above a horizontal plane located at the top of the Upper Side Impact Member or top of the Side Impact Zone.

F.1.13 Rollover Protection Envelope

The Primary Structure plus a plane from the top of the Main Hoop to the top of the Front Hoop, plus a plane from the top of the Main Hoop to the rearmost Triangulated structural tube, or monocoque equivalent.

**F.1.14 Tire Surface Envelope**

The volume enclosed by tangent lines between the Main Hoop and the outside edge of each of the four tires.



V.3.3 Steering Wheel

- V.3.3.1 In any angular position, the top of the Steering Wheel must be no higher than the top-most surface of the Front Hoop. See figure following **F.5.8.6**
- V.3.3.2 The Steering Wheel must be attached to the column with a quick disconnect.
- V.3.3.3 The driver must be able to operate the quick disconnect while in the normal driving position with gloves on.
- V.3.3.4 The Steering Wheel must have a continuous perimeter that is near circular or near oval. The outer perimeter profile may have some straight sections, but no concave sections. "H", "Figure 8", or cutout wheels are not allowed.

V.4 WHEELS AND TIRES

V.4.1 Wheel Size

Wheels must be 203.2 mm (8.0 inches) or more in diameter.

V.4.2 Wheel Attachment

- V.4.2.1 Any wheel mounting system that uses a single retaining nut must incorporate a device to retain the nut and the wheel if the nut loosens.
A second nut (jam nut) does not meet this requirement
- V.4.2.2 Teams using modified lug bolts or custom designs must provide proof that Good Engineering Practices have been followed in their design.
- V.4.2.3 If used, aluminum wheel nuts must be hard anodized and in pristine condition.



V.4.3 Tires

Vehicles may have two types of tires, Dry and Wet

V.4.3.1 Dry Tires

- a. The tires on the vehicle when it is presented for Technical Inspection.
- b. May be any size or type, slicks or treaded.

V.4.3.2 Wet Tires

Any size or type of treaded or grooved tire where:

- The tread pattern or grooves were molded in by the tire manufacturer, or were cut by