

**Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Curso de Engenharia Automotiva**

**Análise de uma Suspensão para um Veículo de  
fórmula SAE**

**Autor: Vinícius Resende Rocha  
Orientadora: Suzana Moreira Ávila**

**Brasília, DF  
2015**



Vinícius Resende Rocha

# **Análise de uma Suspensão para um Veículo de fórmula SAE**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Orientadora: (Dra. Suzana Moreira Ávila)

**Brasília, DF  
2015**

## **CIP – Catalogação Internacional da Publicação\***

Rocha, Vinícius Resende.

Análise de uma suspensão de um veículo de fórmula  
SAE: Subtítulo / Vinícius Resende Rocha. Brasília: UnB,  
2015. 46 p.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília  
Faculdade do Gama, Brasília, 2015. Orientação: Suzana  
Moreira Ávila.

1. Suspensão. 2. Duplo A. 3. Fórmula SAE. 4. Análise  
Dinâmica. 5. Análise Estrutural. I. Ávilas, Suzana Moreira. II.  
Dra.

CDU Classificação



**Vinícius Resende Rocha**

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 02/12/2015 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

---

**Professora Suzana Moreira Ávila, UnB/ FGA**  
Orientadora

---

**Professor Saleh Barbosa Khalil, UnB/ FGA**  
Membro Convidado 1

---

**Professor Henrique Gomes de Moura, UnB/ FGA**  
Membro Convidado 2

Brasília, DF  
2015

Dedico este trabalho a minha família que sempre me apoiou, e a todos os meus professores que fizeram parte do meu crescimento acadêmico.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por ter me proporcionado diversas oportunidades, a toda minha família que sempre me deu suporte e carinho, a minha orientadora, a todos os professores que fizeram parte da minha jornada e a todos os meus amigos e colegas que fizeram da minha graduação algo melhor.

O mais competente não discute, domina a sua ciência e cala-se. Voltaire.

## RESUMO

Este trabalho mostra ao leitor uma análise e projeto de um sistema de suspensão para um veículo elétrico da Fórmula SAE, com base em efeitos respectivos à dinâmica de veículos. O trabalho traz definições e conceitos importantes para a elaboração de uma boa análise da suspensão com base em fatores dinâmicos. O trabalho permite o entendimento de diversos elementos geométricos da suspensão, como: câmber, cáster, convergência, centro de rolagem, angulação e tamanho dos braços, com seus conceitos definidos e analisados durante este estudo. Logo, cálculos como a taxa de variação de câmber, efeitos *anti dive*, *anti squat* e transferências de cargas laterais e longitudinais foram realizados. E, a partir da definição da angulação do sistema *push rod*, foi possível verificar qual a porcentagem da carga proveniente das transferências de carga que será transmitida ao conjunto *rocker arm*, amortecedor-mola e barra anti-rolagem do veículo. Portanto, a partir dos valores das transferências de cargas no veículo, foi possível definir condições de contorno para posterior simulação estrutural do conjunto de suspensão pelo método dos elementos finitos, por meio do software *Ansys*.

**Palavras-chave:** Suspensão. Duplo A. Fórmula SAE. Análise Dinâmica. Análise Estrutural.

## **ABSTRACT**

This work shows to the reader an analysis and a design of a suspension system made for an electrical vehicle of formula SAE, based on effects associated to vehicle dynamics. The work brings definitions and important concepts for the development of a good analysis based on dynamics factors. The work allows the understanding of many geometric elements of the suspension, such as: camber, caster, toe, roll center, angulation and size of the suspension arms, with all the concepts defined and analysed during this study. Thus, calculus like the camber change rate, anti dive effect, anti squat effect and longitudinal and lateral weight transfer were made. And from the definition of the angle of the push rod system, it was possible to check which percentage of weight transfer that will be transferred to the rocker arm system, spring-damper system and anti roll bar of the car. Therefore, from the weight transfer values of the vehicle, it was possible to define boundary conditions for a posterior structural simulation of the suspension system on the finite element method, made by Ansys software.

**Keywords:** Suspension. Double Wishbone. Formula SAE. Dynamic Analysis. Structural Analysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de suspensão duplo A.....	19
Figura 2. Molas Helicoidais. ....	20
Figura 3. Amortecedor Hidráulico.....	21
Figura 4. Sistema com Rocker Arm em detalhe. ....	22
Figura 5. Barra de direção com terminal rotular.....	22
Figura 6. Sistema com Pull/Push rod. ....	23
Figura 7. Manga de Eixo de um Fórmula SAE. ....	23
Figura 8. O CR e CI. ....	25
Figura 9. Câmbor, cáster e convergência. ....	28
Figura 10. Fatores para cálculo dos efeitos anti. ....	29
Figura 11. Modelo 1/2 Veículo sob Aceleração Lateral.. ....	30
Figura 12. Exemplo de refinamento de malha.....	32
Figura 13. Sequência de análises no Ansys.....	33
Figura 14. Prova Skid Pad.....	35
Figura 15. Localização do CG.....	36
Figura 16. Pneu Slick aro 13.. ....	36
Figura 17. Vista lateral com definição dos pontos de ancoragem da suspensão .....	38
Figura 18. Pontos de Fixação da Suspensão no Chassi.....	38
Figura 19. Vista dianteira do veículo com CR e CI.....	40
Figura 20. Vista traseira do veículo com CR e CI.....	40
Figura 21. Angulação do <i>Push Rod</i> e Transmissão de esforços.....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Efeitos da Altura do CR.....	26
Tabela 2. Dados Iniciais de Projeto. ....	35
Tabela 3. Cálculo dos Efeitos Anti. ....	39
Tabela 4. Dados da Geometria da Suspensão.....	41
Tabela 5. Transferência de Carga Longitudinal e Lateral. ....	42
Tabela 6. Cronograma de Atividades Previstas para o TCC 2. ....	44

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1. MOTIVAÇÃO .....	11
1.2. OBJETIVO GERAL .....	11
1.2.1. Objetivos Específicos .....	12
1.3. METODOLOGIA .....	12
1.4. ESTRUTURA DO TEXTO .....	12
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>14</b>
2.1. ESTADO DA ARTE .....	14
2.2. HISTÓRICO .....	15
2.2.1. A Competição .....	15
2.2.2. O Histórico da Suspensão .....	15
2.2.3. Origem do Método dos Elementos Finitos (MEF) .....	15
2.3. SUSPENSÃO .....	16
2.3.1. Suspensões Independentes .....	17
2.4. CENTRO DE GRAVIDADE .....	24
2.5. GEOMETRIA DA SUSPENSÃO .....	24
2.5.1. Graus de Liberdade e Movimento da suspensão .....	25
2.5.2. Centro Instantâneo .....	25
2.5.3. Centro de Rolagem .....	25
2.5.4. Front View Side Arm e Side View Side Arm .....	26
2.5.5. Câamber .....	26
2.5.6. Cáster .....	27
2.5.7. Convergência .....	27
2.5.8. Entre eixo e Bitola .....	28
2.5.9. Efeitos Anti .....	28
2.6. TRANSFERÊNCIA DE CARGA .....	29
2.6.1. Transferência Longitudinal .....	29
2.6.2. Transferência Lateral .....	30
2.7. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS .....	30
2.7.1. Ansys .....	31
<b>3. RESULTADOS PRELIMINARES</b> .....	<b>34</b>
3.1. RESTRIÇÕES DE REGULAMENTO .....	34
3.2. A COMPETIÇÃO .....	34
3.3. DADOS INICIAIS .....	35
3.4. ANCORAGEM DA SUSPENSÃO .....	37
3.5. PROJETO DO SVSA .....	38
3.5.1. Cálculo dos efeitos “anti” .....	38
3.6. ANGULAÇÃO DOS BRAÇOS .....	39
3.7. PROJETO DO FVSA .....	40
3.7.1. Taxa de Variação de Câamber .....	41
3.8. CÁLCULO DA TRANSFERÊNCIA DE CARGA LONGITUDINAL .....	41
3.9. CÁLCULO DA TRANSFERÊNCIA DE CARGA LATERAL .....	42
3.10. ANGULAÇÃO DO PUSH ROD .....	43
<b>4. CRONOGRAMA DE ATIVIDADES</b> .....	<b>44</b>
<b>5. CONCLUSÕES PARCIAIS</b> .....	<b>45</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>46</b>

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. MOTIVAÇÃO

As competições realizadas pela SAE (*Society of Automotive Engineers*) possuem como objetivo aproximar o estudante de engenharia a projetos na área automobilística. Assim, elas permitem o desenvolvimento novas tecnologias e métodos que aprimoram os sistemas de um veículo.

As áreas relacionadas à dinâmica veicular são fundamentais para o comportamento do veículo. Nesse âmbito, a suspensão automotiva exerce papel fundamental para o desenvolvimento do carro, existindo assim, grandes oportunidades de avanços no projeto e validação de um sistema de suspensão.

O sistema de suspensão em um veículo de competição possui a finalidade de proporcionar melhor desempenho num comportamento dinâmico. Este tipo de suspensão difere-se em relação à sua função comercial mais comum: o conforto, aplicabilidade amplamente presente em projeto de carros de passeio.

Ao longo do desenvolvimento do sistema de suspensão, diversos tipos utilizados em carros de alto desempenho, sendo cada um com características próprias que lhes dão vantagens e desvantagens em relação a objetivos específicos.

O projeto e a validação de um sistema de suspensão, antes tratado no método da tentativa e erro, evoluíram muito com estudos de comportamentos dinâmicos e estruturais no veículo, sendo esse tema ainda muito discutido e com grandes perspectivas de melhora.

O presente trabalho procura determinar quais são os parâmetros e os aspectos necessários para o projeto e análise de um conjunto de suspensão com base em fatores da dinâmica veicular, com posterior avaliação estrutural.

## 1.2. OBJETIVO GERAL

Definir parâmetros para o projeto de um sistema de suspensão para um veículo de Fórmula SAE levando em consideração efeitos dinâmicos presentes no mesmo.

### 1.2.1. Objetivos Específicos

Através dos parâmetros obtidos na parte de análise dinâmica, definir um método de posterior análise estrutural do conjunto de suspensão.

Por ser um protótipo inicial construído pela equipe de Fórmula SAE elétrico Fgracing UnB – Gama, os objetivos principais do projeto são proporcionar uma boa dirigibilidade do veículo, assim como permitir o estudo de materiais de custo reduzido para a otimização do projeto.

### 1.3. METODOLOGIA

Para iniciar este projeto de um sistema de suspensão, tornou-se necessário fazer profundas pesquisas bibliográficas sobre o tema e, a partir disso, definir as etapas a serem realizadas para a efetivação do projeto.

Após a pesquisa e a definição de temas presentes no trabalho, fez-se relevante selecionar elementos do projeto essenciais para a eficiência da suspensão. Assim como definir metas e objetivos para o sistema como um todo.

Para iniciar o projeto dinâmico levou-se em conta fatores relacionados à geometria da suspensão, como os pontos de ancoragem dos braços no chassi e a sua angulação. Tão quanto o projeto dos braços de suspensão, e da manga de eixo. Através de dados como o desenho em CAD do chassi foi possível definir o sistema completo de suspensão projetando-o nos espaços disponíveis na estrutura. Logo, o projeto das *push rods* e *rocker arms* foram realizados nesta etapa.

Amortecedores, molas, cubos de roda e rolamentos foram elementos escolhidos a partir de modelos disponíveis no mercado e selecionados de acordo com as necessidades do projeto.

A partir de planilhas de cálculos criadas no Excel, tornou-se possível determinar efeitos como: *anti dive*, *anti squat* e taxa de variação de câmbio. Os quais, os seus parâmetros são facilmente alterados para análise do projeto.

Com o auxílio do *software* Matlab foi possível criar um código para cálculo de transferência de cargas longitudinais e laterais. Assim, esses resultados permitiram a elaboração de tabelas para a melhor visualização e análise dos dados.

### 1.4. ESTRUTURA DO TEXTO

O presente trabalho é dividido em cinco capítulos de acordo com os temas abordados.

O capítulo um trata-se da introdução, pois aborda assuntos como a motivação e justifica a elaboração do projeto. Esse é o local onde se define a área do estudo por meio de discussões iniciais sobre os temas de dinâmica veicular e a suspensão de um veículo de fórmula SAE.

O capítulo dois, a revisão bibliográfica, trata de situar o trabalho de acordo com os estudos dos principais autores do tema. Ele possui a definição de tópicos importantes para a compreensão e apresentação dos resultados parciais referentes à análise do conjunto de suspensão.

O capítulo três, dos resultados preliminares, expõe e discute a escolha de cada fator para o estudo. Nele, é possível verificar os resultados de conceitos definidos no capítulo anterior. É importante ressaltar que todos os resultados preliminares foram obtidos a partir de análises dinâmicas da suspensão e da sua geometria.

O capítulo quatro se trata do cronograma de atividades planejadas para a posterior conclusão do estudo.

O capítulo cinco apresenta as conclusões parciais. Ele demonstra o que foi possível inferir de toda a análise preliminar realizada, e apresenta as futuras etapas do trabalho.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. ESTADO DA ARTE

O tema de dinâmica veicular com enfoque na suspensão já é bem difundido na literatura. Logo, a elaboração desse estudo possui uma ampla base teórica.

Estudos como os de Gillespie (1992), Jazar (2008) e Nicolazzi (2008) demonstram os efeitos da dinâmica num veículo. Assim, eles são fontes teóricas para a realização desse trabalho.

Pesquisas na área de veículos de alto desempenho são feitas por diversos autores, destacando-se Milliken (1995), que possui ampla bibliografia na área, além de fornecer materiais específicos que auxiliam as equipes competidoras da Fórmula SAE.

O trabalho de Smith (1978) provê fonte bibliográfica na área de preparação de veículos de competição. Ele enfoca veículos do tipo fórmula em abordagens gerais e específicas das áreas envolvendo a dinâmica veicular.

De acordo com Gillespie (1992), a dinâmica veicular parte da relação de contato da roda ao solo e as forças e momentos desenvolvidos neste contato. Ele afirma que a dinâmica veicular em seu sentido mais amplo engloba todas as formas de transporte, assim como navios, aviões e locomotivas.

Ainda segundo Gillespie (1992), a performance de um carro pode ser analisada no estudo de como e porquê as forças e movimentos envolvidos na aceleração, frenagem e esterçamento são originados. Neste quesito a suspensão é sistema primordial, pois sua função também é reagir as forças produzidas no contato do pneu ao solo, assim como os fatores de performance do veículo.

Jazar (2008), conclui que dentre as suspensões do tipo independentes, as que mais se destacam e são estudadas com mais rigor são as McPherson e a duplo A, sendo a última presente na análise deste trabalho.

Conforme Milliken (1995), o objetivo principal numa competição automobilística é conseguir a melhor configuração do veículo, com a melhor interpretação possível dos regulamentos para que o carro percorra o trajeto no mínimo tempo possível. Quando se analisa um veículo em uma competição é possível observar que a velocidade nunca é constante. Assim, é possível aplicar análises dinâmicas no veículo e no sistema em estudo. Ainda segundo o mesmo

autor, é possível alterar toda a dinâmica do carro para que o mesmo ganhe em desempenho na pista com alterações de posição de CG, distribuição de cargas, além de outros efeitos presentes no presente trabalho, assim como cambêr, cáster, mergulho e arfagem.

## 2.2. HISTÓRICO

### 2.2.1. A Competição

A competição da Fórmula SAE foi criada em 1981 no estado do Texas nos Estados Unidos com o propósito de suprir a carência de engenheiros no mercado de carros de alto desempenho. No Brasil, a competição existe desde o ano de 2004 e posteriormente à criação da categoria a combustão, foi criada a categoria de carros totalmente elétricos, sendo este último, criado para fim de análise no estudo [1].

Por meio de restrições de regulamento, o estudante se vê obrigado a estudar a fundo conceitos da indústria automobilística, assim como desenvolve suas capacidades de projeto, análise e liderança [1].

### 2.2.2. O Histórico da Suspensão

No princípio dos automóveis a parte de suspensão praticamente não existia, algumas molas do tipo “feixe de molas” ligavam os eixos à carroceria do veículo. Com o objetivo de gerar mais conforto aos ocupantes ante as vibrações das estradas, a suspensão ainda não tinha a função de gerar estabilidade por que os automóveis não passavam dos 30 Km/h. Com a evolução do automóvel no decorrer das décadas, estudos na parte de engenharia e materiais, o automóvel passou a desenvolver grandes velocidades e as antigas molas não serviam como forma de absorver as saliências da pista de rolagem [2].

Surgiu assim uma área de projeto em cada automóvel, o sistema de suspensão, que tinha função de propiciar conforto e estabilidade aos ocupantes do veículo. Da mesma forma surgiram estudos para priorizar o desempenho do veículo, tema abordado neste trabalho.

### 2.2.3. Origem do Método dos Elementos Finitos (MEF)

Com a evolução matricial de modelos reticulados, em 1955, surgiu o método dos elementos finitos (MEF). Isso foi possível graças à disponibilidade de

computadores digitais e também devido à necessidade de projeto de estruturas em modelos contínuos. A engenharia aeronáutica foi responsável por iniciar os estudos no ramo por meio da formulação tratada pioneiramente por Argyris e Kelsey em 1955 [Soriano 2003].

Segundo Beer e Johnston (1982), qualquer falha em algum componente estrutural é iniciada em locais da peça onde a tensão aplicada excede o limite de resistência do material naquele local. O MEF tem como funções analisar estas tensões e a viabilidade estrutural da peça, atividade feita com maior precisão e agilidade com o avanço dos recursos computacionais disponíveis.

Estruturas são sistemas físicos que são capazes de receber e transmitir esforços, sendo a análise de estruturas responsável por relacionar as ações externas com o comportamento do material e/ou estrutura [Soriano e Lima, 2006]. Com a necessidade cada vez maior de simulação em estruturas cada vez mais complexas, surgiram então softwares de análise estrutural que utilizavam modelos numéricos do MEF. Alguns deles são: Algor, Ideas, Abaqus, Visual Nastran e Ansys, sendo o último citado, utilizado nesse estudo.

### 2.3. SUSPENSÃO

A definição de uma suspensão automotiva é representada em diversos conceitos, dentre eles, é possível destacar:

- A suspensão é o que conecta as rodas e pneus ao corpo do veículo, permitindo movimento relativo [Jazar 2008].
- A Suspensão no automóvel é construída com vários componentes que integram um sistema muito eficiente para a geração de conforto, estabilidade e segurança na condução do automóvel [2].
- A suspensão de um carro é o sistema que absorve os impactos e irregularidades do solo, além de atuar na aderência do veículo ao chão [3].
- O sistema de suspensão absorve as tensões, forças e impactos gerados por buracos e demais avarias das pistas de rodagem, minimizando a transmissão dos seus efeitos para os passageiros do carro. Sendo esta definição uma das que mais se destacam no contexto do presente trabalho [4].

Em veículos de alto desempenho, assim como os propostos pela competição anual da Fórmula SAE, a definição de suspensão se altera no quesito desempenho,

pois essa característica é almejada de forma acintosa em relação aos demais fatores presentes no sistema.

O projeto de uma suspensão para um veículo Fórmula SAE começa pela escolha de qual a ser utilizada. É necessário verificar diversos fatores assim como o tipo de chassi, o espaço necessário para a instalação da suspensão, tipo de processo de fabricação, facilidade na obtenção dos materiais, e principalmente, selecionar um tipo adequado para a finalidade correta, que no caso, é uma competição.

Existem diversos tipos de suspensões, assim como a de eixo rígido, McPherson, braço arrastado, *multi link*, duplo A. Dentre essas, a que mais se destaca para o propósito do projeto desse estudo é a do tipo duplo A. A conexão e fixação dos outros terminais da suspensão duplo A fica a cargo da manga de eixo, assim gerando uma restrição de 5 graus de liberdade dos 6 possíveis. Neste tipo de suspensão, os pontos de fixação no chassi interferem em muitos efeitos dinâmicos no veículo, assim como taxa de câmbio, efeitos *anti dive*, *anti squat* e centros de rolagem lateral. O ângulo de ataque de cada braço de suspensão também influi em efeitos dinâmicos como o centro de rolagem longitudinal.

A partir do tipo de solução escolhida, é necessário realizar outras escolhas primordiais no projeto, como o local de acomodação das molas e dos amortecedores, se ela será ligada diretamente a algum dos braços da suspensão ou ficará fixa apenas no chassi com algum link transmissor de esforço. A opção escolhida foi a do tipo *push rod*, onde um link é conectado no braço inferior da suspensão e sua outra extremidade leva os esforços sofridos no pneu até um *rocker arm*, peça necessária para transmitir os esforços para os amortecedores, molas e barra anti rolagem. Uma desvantagem desse tipo é a elevação do centro de massa do veículo, mas ele também apresenta vantagens como facilidade na instalação, disponibilidade de espaço útil e facilidade nos ajustes necessários.

### **2.3.1. Suspensões Independentes**

Nesse trabalho, o foco de estudo será as suspensões do tipo independente, onde o movimento vertical de cada roda é permitido sem que o mesmo interfira no movimento da outra. Praticamente todo carro de passeio e de competição utilizam esse tipo de suspensão, sendo presente em veículos leves de carga e

recentemente, também em carretas e ônibus. Sua escolha é devida ao espaço provido ao motor, sua resistência às vibrações provocadas pelo esterçamento e também por uma rigidez a rolagem maior que a rigidez vertical da mola [Gillespie 1992].

#### 2.3.1.2. Suspensão Duplo A

O uso deste tipo de suspensão apresenta vantagens para veículos de tração dianteira por disponibilizar mais espaço para o motor. Possui também uma melhor absorção de cargas em veículos de armações separadas [Gillespie 1992].

Esse tipo de suspensão recebe este nome por seus braços se assemelharem a dois A ou V ligados aos pontos de ancoragem no chassi e também a manga de eixo. A fixação dos braços na manga de eixo e no chassi limitam os movimentos deste tipo de suspensão apenas ao eixo vertical.

Comparando-se com outros tipos de suspensões comuns em carros de passeio assim como a McPherson, a Duplo A é melhor no controle da geometria da suspensão de acordo com o curso vertical da roda e rolagem do chassi em curvas, aceleração e frenagem [5].

Por ter características boas de controle e ser de fácil fabricação, a suspensão duplo A é utilizada na maioria dos carros de competição e será estudada nesse projeto. A figura 1 mostra os componentes desse tipo de suspensão e logo abaixo dela há a descrição de cada item presente.



**Figura 1. Sistema de suspensão duplo A.** Fonte: Adaptado de <http://www.ozgemini.com/forums/tech/viewtopic.php?p=245911> Acesso em: Agosto de 2015.

**Mola:** Tem função estrutural no veículo, sendo responsável por receber cargas provenientes do movimento vertical da roda. Existem diversos tipos de molas, sendo o do tipo helicoidal escolhido para o projeto e estudado neste presente trabalho.

O motivo para escolha deste tipo é a sua facilidade de obtenção com diferentes propriedades mecânicas. Na equação 1, a mola é descrita com fatores como deslocamento ( $x$ ), carga aplicada ( $F$ ) e constante da mola ( $k$ ), seguindo assim a lei de Hooke.

$$F = k * x \quad (1)$$

A fabricação de uma mola é feita enrolando-se um arame na forma helicoidal, sendo que a mola helicoidal possui histerese desprezível, sendo o amortecimento realizado pelo amortecedor [Freitas Jr. 2006].

A mola do tipo helicoidal é amplamente utilizada por sua facilidade de fabricação, acomodação junto ao amortecedor e suas funções de conforto. A figura 2 mostra molas helicoidais.

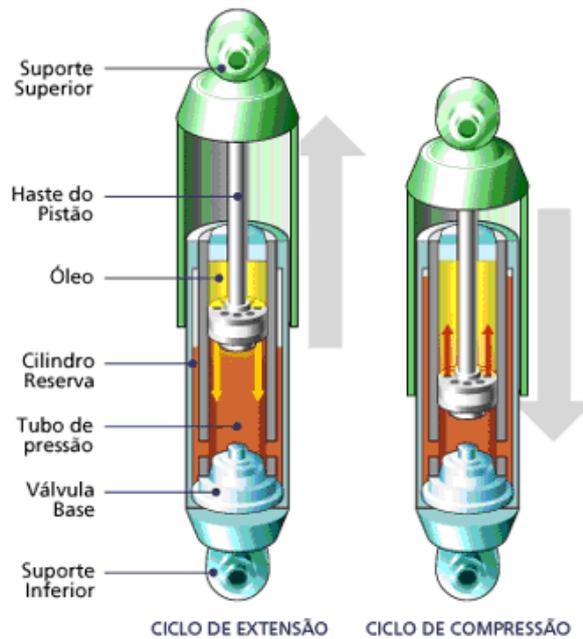


**Figura 2. Molas Helicoidais.** Fonte: <http://www.blackz.com.br/produto/kit-mola-esportiva-blackz-palio-palio-weekend/25753> Acesso em: Agosto de 2015.

**Amortecedor:** Existem dois tipos de amortecedor, os de atrito seco com elementos sólidos e os hidráulicos com elementos fluidos [Dixon 1999]. Este último é objeto de estudo neste trabalho, sendo mais especificamente o do tipo hidráulico telescópico não progressivo (amortecimento linear).

O amortecedor em estudo é geralmente o mais utilizado e tem como característica funcional específica, a presença de significativas forças radiais (normais ao seu eixo axial). As forças radiais são bem maiores do que as incidentes em amortecedores utilizados em outros tipos de suspensão [Freitas Jr. 2006].

No caso do tipo de suspensão e tipo de mola escolhido, o amortecedor é ligado junto ao chassi e ao *rocker arm* tendo como função dissipar a energia absorvida pelas molas. A figura 3 mostra alguns dos principais componentes presentes num amortecedor telescópico.



**Figura 3. Amortecedor Hidráulico.** Fonte: <http://www.amortecnew.com.br/PRemanufatura.aspx> Acesso em: Agosto de 2015.

Seu fator de maior importância num projeto é a sua constante de amortecimento ( $c$ ). Com esta constante é possível determinar o quanto sua estrutura irá vibrar até sua estabilização. O período de tempo que isto ocorre varia de acordo com a função da suspensão (estabilidade, conforto, etc.). A equação 2 mostra a descrição do comportamento deste sistema.

$$F = c * x' \quad (2)$$

Onde:  $F$  é a força aplicada ao sistema e  $x'$  é a velocidade do mesmo.

**Rocker Arm:** É uma peça mecânica com função intermediária entre o *push rod*, amortecedor e barras anti rolagem. Este link transmite os esforços provenientes da roda aos demais sistemas citados acima. Seu uso é frequente em veículos de alto desempenho para que a transmissão de esforços seja menor. A figura 4 mostra esta peça.



Figura 4. Sistema com Rocker Arm em detalhe. Fonte: <http://www.atomictoyshop.com/A-Arms3.htm>  
Acesso em: Agosto de 2015.

**Terminal de Direção:** Sistema responsável por transmitir os movimentos solicitados no volante do veículo. Logo, permite a movimentação desejada à manga de eixo e conseqüentemente ao conjunto pneu-roda. Terminais rotulares são geralmente utilizados para conectar a barra de direção a manga de eixo. A figura 5 mostra este tipo de conector, que é amplamente utilizado no sistema de suspensão.



Figura 5. Barra de direção com terminal rotular. Fonte: <http://the10castnetwallpaper.blogspot.com.br/2012/10/rod-ends.html> Acesso em: Agosto de 2015.

**Push Rod:** O sistema *push rod* é composto por uma barra conectada ao braço de suspensão inferior numa extremidade e na outra é ligada ao *rocker arm*. Esta barra trabalha sobre compressão levando todo o deslocamento e esforços vindos da roda aos amortecedores, molas e barras anti-rolagem.

Suas vantagens em relação ao sistema *pull rod* que trabalha sobre tração são a sua facilidade de construção no chassi e o fácil acesso para ajustes em todo o

sistema. Por ser uma barra sujeita a compressão, deve ser mais robusta do que a sujeita a tração.

Os sistemas *pull rod* e *push rod* estão representados na figura 6.

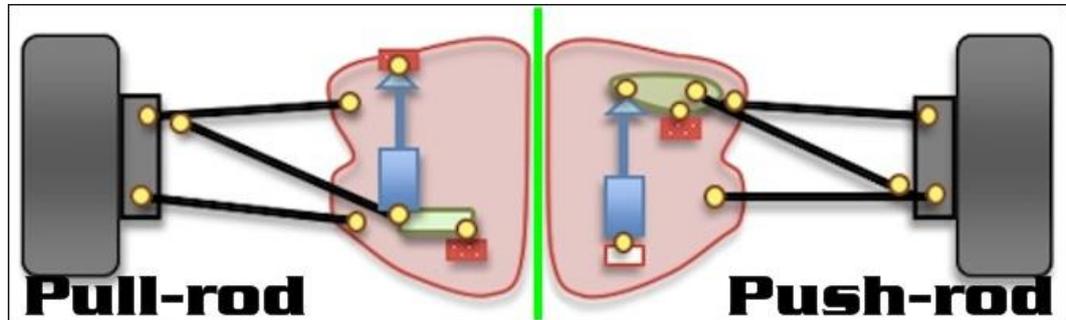


Figura 6. Sistema com Pull/Push rod. Fonte:

<https://www.formulastudent.de/fsg/pr/news/details/article/pats-seven-deadly-sins-of-fs-design/> Acesso em: Agosto de 2015.

**Manga de Eixo:** A manga de eixo é uma peça responsável por ligar os braços de suspensão, cubos de roda, rolamentos, *push* ou *pull rod*, semieixo, pinças de freio e terminais de direção proporcionando assim ancoragem para todos os itens citados e responsável também por grandes partes dos esforços sofridos com os movimentos da roda e também responsável por determinar a direção seguida da roda no eixo dianteiro do carro. A figura 7 mostra um exemplo de manga de eixo fabricada para a Fórmula SAE.



Figura 7. Manga de Eixo de um Fórmula SAE. Fonte:

<https://www.formulastudent.de/fsg/pr/news/details/article/pats-seven-deadly-sins-of-fs-design/> Acesso em: Agosto de 2015.

## 2.4. CENTRO DE GRAVIDADE

O centro de gravidade de um veículo é o ponto onde toda a força de gravidade que atua no corpo pode ser representada. Sendo este fator um dos mais importantes para toda a análise e ganho de desempenho em pista de um veículo.

O CG é de extrema importância na dinâmica veicular, sendo ele relacionado com as forças que agem em todo o veículo, além de influir em efeitos como a transferência de peso.

Com o CG é possível determinar as cargas em cada roda de um veículo e é de fundamental importância, pois nele agem as forças peso e de inércia. Para sua determinação experimental é utilizada a medição de pesos em cada roda por meio de balanças e assim é feita uma distribuição da carga para a determinação do ponto [Nicolazzi 2008].

O CG influi no fenômeno de transferência de carga longitudinal, sendo sua altura diretamente proporcional à quantidade de carga transferida longitudinalmente, ou seja, quanto maior a altura do CG, maior será a carga e posterior força de frenagem na dianteira. Para que a frenagem dianteira e os esforços resultantes da transferência de carga não sejam excessivos é necessário que o CG seja deslocado um pouco para a parte traseira do veículo, além da diminuição de sua altura ao mínimo possível [Milliken 1995].

Segundo Milliken (1995), a diminuição da altura do CG é benéfica em qualquer tipo de frenagem, por exemplo, quando há frenagem em uma curva, onde ocorre transferência lateral e longitudinal de carga, sobrecarregando assim um dos conjuntos de suspensão dianteiros, além dos freios do mesmo. Ainda segundo o mesmo autor a posição do CG altera fatores como o desempenho em aceleração e a aderência dos pneus em cada eixo do veículo.

## 2.5. GEOMETRIA DA SUSPENSÃO

Quando se fala sobre cinemática ou geometria da suspensão, se fala de como a massa não suspensa se conecta com a massa suspensa do veículo, assim como dita o caminho dos movimentos relativos e também as forças transmitidas entre estas conexões [Milliken 1995].

### 2.5.1. Graus de Liberdade e Movimento da suspensão

A função de todo o sistema de suspensão está ligada a manter o contato do pneu ao solo, para que isto ocorra é necessário que exista apenas um grau de liberdade no conjunto, sendo o movimento descrito para cima e para baixo. Na suspensão dianteira ainda há o movimento transmitido pela direção as rodas.

### 2.5.2. Centro Instantâneo

O centro instantâneo se define como algo que muda com a posição dos braços da suspensão, sendo ele adquirido prolongando-se linhas dos braços até que elas se interceptem na vista frontal do veículo. O centro instantâneo frontal influi em certos fatores como na taxa de variação do câmbor e centro de rolagem. Já na vista lateral é obtido por meio do prolongamento de linhas vindas dos pontos de ancoragem dos braços no chassi. Nesta vista influi em efeitos como na taxa de variação do cáster e também as geometrias “Anti”.

### 2.5.3. Centro de Rolagem

O centro de rolagem é obtido por meio da prolongação de uma linha do centro instantâneo ao centro do contato pneu-solo, sendo esta relação válida para ambos os planos trabalhados. O CR define o ponto das forças de acoplamento entre as massas suspensas e não suspensas do veículo e sua representação é observada na figura 8.

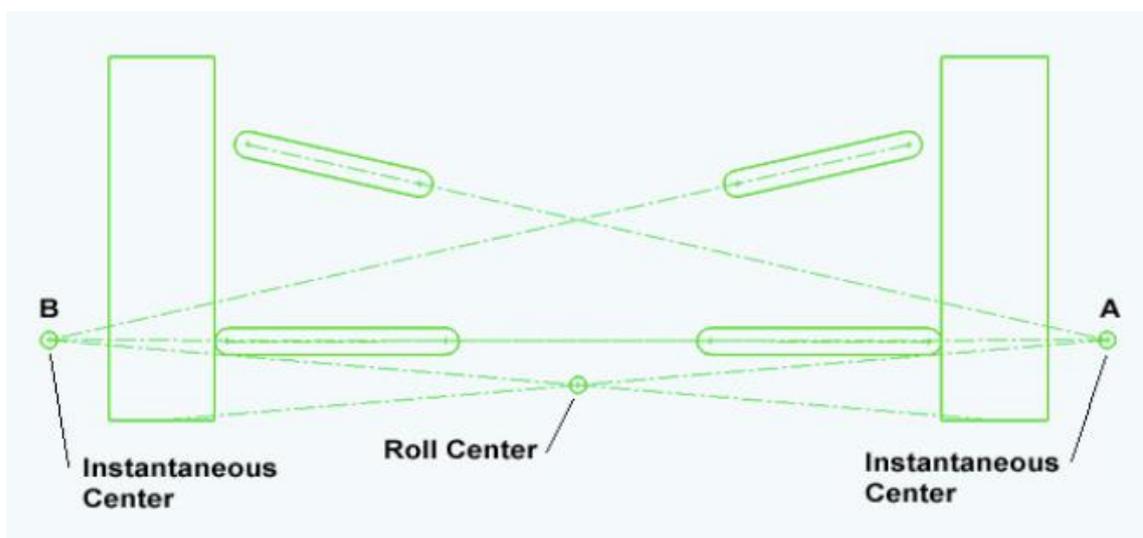


Figura 8. O CR e CI. Fonte: <http://www.onedirt.com/tech-stories/suspension/finding-your-center-finding-your-front-and-rear-roll-center/> Acesso em: Agosto de 2015.

A altura do CR nos eixos dianteiros e traseiros influi no momento de rolagem de cada um deles. Reduzir a altura de algum CR vai levar a perda de capacidade de resistência ao momento de rolagem no eixo trabalhado. Caso o veículo possua CR muito baixos, a quantidade de rolagem no veículo é aumentada [Milliken 1995].

A tabela 1 mostra os efeitos provenientes da altura do CR em cada eixo do veículo.

**Tabela 1. Efeitos da Altura do CR.**

Altura do CR	Eixo	
	Dianteiro	Traseiro
Baixo	Melhor em pistas lisas.	Usado em situações de tração baixa.
	Melhor em pistas com maior aderência.	Aumenta a tração.
	Melhor em curvas de alta.	Diminui o desgaste de pneu.
Alto	Melhor em pistas com mudanças rápidas de direção.	Melhor em pistas com mudanças rápidas de direção.
	O carro fica mais responsivo.	Usado em pistas de alta aderência.

Fonte: Adaptado de [http://www.thecartech.com/subjects/auto\\_eng2/Roll\\_Center.htm](http://www.thecartech.com/subjects/auto_eng2/Roll_Center.htm) Acesso em: Agosto de 2015.

#### 2.5.4. Front View Side Arm e Side View Side Arm

O Front View Swing Arm (FVSA) é medido em unidade de comprimento e é um parâmetro utilizado para cálculos posteriores. Sua obtenção é feita medindo-se a distância do CI frontal do veículo ao centro de contato do pneu do mesmo [Milliken 1995].

O Side View Swing Arm (SVSA) é igualmente um parâmetro medido em unidade de comprimento e é definido pela distância do CI lateral ao centro de contato do pneu do veículo [Milliken 1995].

#### 2.5.5. Câmber

O câmber ou também cambagem é definido como a inclinação da roda em relação ao eixo vertical nas vistas frontais ou traseiras. Esta inclinação define o contato do pneu com o solo, sendo de maior importância, em curvas.

Uma inclinação positiva mostra o contato do pneu entrando no veículo, enquanto uma cambagem negativa mostra o contato pneu-solo saindo do veículo. A figura 9 a mostra a definição de cambagem positiva e negativa.

A força de esterçamento desenvolvida nos pneus é altamente dependente do seu ângulo em relação a superfície de contato, portanto, o câmber tem grande influência no comportamento no veículo [Jazar 2008].

Na curva o câmber tende a ficar positivo, para corrigir isto é comum configurar um câmber para ser um pouco negativo, sendo feito isto, a força de esterçamento tende a aumentar e melhorar o desempenho do veículo em curvas [Smith 1978].

Substituindo os braços da suspensão com um link único que começa em seus terminais e prolongando-o até o CI, a quantidade variação de câmber conseguido de *ride travel* por polegadas é determinado como a taxa de variação de câmber. A equação 3 mostra que esta taxa é função apenas do comprimento FVSA [Milliken 1995].

$$\text{Taxa de Variação de Camber} = \text{Tan}^{-1}\left(\frac{1}{fsva}\right) \quad (3)$$

#### 2.5.6. Cáster

É o ângulo formado pelo pino mestre ou pelos terminais de cada braço de suspensão, sendo considerado positivo quando inclinado para a parte traseira do carro e negativo quando inclinado para a frente do mesmo.

Quanto maior o ângulo de ataque de cáster, maior será o esforço necessário para virar a direção. A representação do cáster é mostrada na figura 9.

#### 2.5.7. Convergência

Também chamado de ângulo de *Toe*, é o ângulo formado pelos pneus em relação a linha central do veículo. Na convergência positiva, o ângulo se encontra na frente do eixo dianteiro do veículo. Já na convergência negativa ou divergência, o ângulo se encontra na traseira do eixo dianteiro do veículo. A figura 9 mostra os efeitos citados acima.

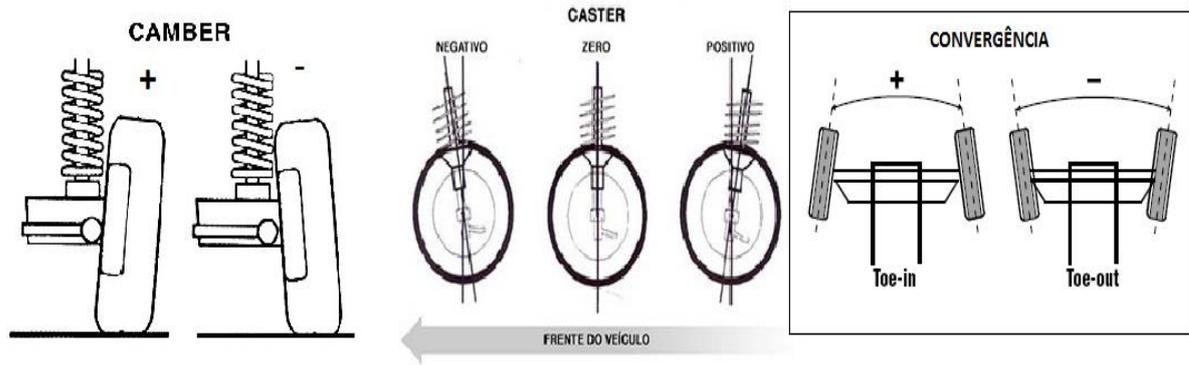


Figura 9. Câmbor, cáster e convergência. Fonte: <https://www.itaro.com.br/dicas/2014/11/saiba-tudo-sobre-alinhamento-de-rodas/> Acesso em: Agosto de 2015.

### 2.5.8. Entre eixo e Bitola

O entre eixos é a distância entre os eixos traseiros e dianteiros do veículo no plano longitudinal, já a bitola é a distância em cada eixo de um centro de roda ao outro presente no mesmo eixo. Estes fatores influem em diversos efeitos dinâmicos no carro.

No geral, um entre eixo maior acarreta em uma maior estabilidade em retas e uma transferência de carga menor, já um entre eixo maior leva a uma transferência de peso maior e faz com que a dirigibilidade do veículo em curvas seja melhorada. As vantagens de uma bitola larga são uma transferência de carga lateral menor e um espaço maior para os braços de suspensão, mas sua principal desvantagem é o arrasto aerodinâmico criado por uma área maior [Smith 1978].

### 2.5.9. Efeitos Anti

O efeito “anti” na suspensão é um termo que descreve a força de acoplamento entre as massas suspensas e não suspensas. É função apenas do ângulo ou declive da SVSA. Com os efeitos anti numa suspensão, é possível variar a quantidade de carga que se aplica as molas e o comportamento de mergulho e arfagem do veículo.

Se uma suspensão é 100% anti, toda a transferência de carga longitudinal é suportada pelos braços de suspensão e nada chega à mola. Quando o efeito é 0%, toda a transferência de carga longitudinal é suportada pelas molas e nada chega aos braços. Esta última situação ocorre caso os ângulos formados entre o centro de contato do pneu e o CI forem 0. Este ângulo pode ser visto na figura 10.

A geometria *Anti-Dive* em suspensões dianteiras diminui o *bump* (quando o amortecedor conectado a suspensão trabalha sob compressão gerada pelo

percurso) causado por frenagens frontais. Já a geometria *Anti-Squat* reduz o *bump* durante uma aceleração frontal, diminuindo assim a arfagem do veículo, só se aplicando em veículos de tração traseira. A figura 10 mostra os ângulos necessários para o cálculo dos efeitos *Anti-Dive* e *Anti-Squat* presentes nas equações 4 e 5 respectivamente.

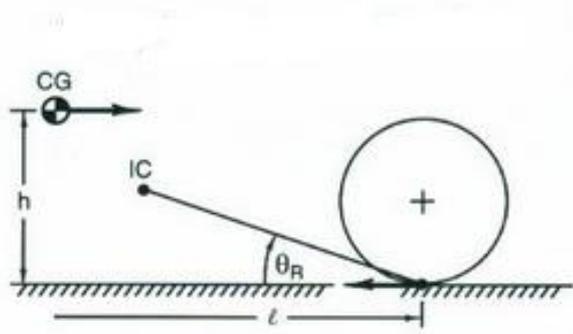


Figura 10. Fatores para cálculo dos efeitos anti. Fonte: Milliken, 1995.

$$\text{Anti - Dive Dianteiro} = \frac{\tan\theta_F}{h/l * (\% \text{front braking})} * 100 \quad (4)$$

$$\text{Anti - Squat} = \frac{\tan\theta_F}{h/l} * 100 \quad (5)$$

Onde,  $\theta_F$  é o mesmo ângulo mostrado na figura 10 para o eixo dianteiro,  $\theta_R$  para o eixo traseiro,  $h$  é a altura do CG,  $l$  é a distância entre eixos e *%front braking* é a porcentagem da distribuição de frenagem na frente do veículo.

## 2.6. TRANSFERÊNCIA DE CARGA

### 2.6.1. Transferência Longitudinal

Quando um veículo sofre aceleração positiva (aceleração) ou aceleração negativa (frenagem), uma certa quantidade de carga presente em cada eixo é transferida para o outro, gerando assim mais esforços no eixo dianteiro devido a uma frenagem. A equação 6 mostra como se calcula este efeito.

$$\Delta W_x = \frac{h}{l} * W * A_x \quad (6)$$

Onde,  $\Delta W_x$  é o acréscimo ou decréscimo de carga em cada eixo, dependendo se a aceleração é positiva ou negativa,  $h$  é a altura do CG,  $l$  é a distância entre eixos,  $W$  é a massa do veículo em lb e  $A_x$  é a aceleração positiva ou negativa expressa em unidade "g"; isto é,  $A_x = a_x/32.2$ .

Em algumas suspensões há uma mudança significativa na altura do chassi do veículo com as transferências longitudinais, por isso, é necessário certificar que o CG esteja posicionado corretamente do ponto de vista dinâmico. Efeitos geométricos que evitam esta diferença na altura do veículo são tratados no item 2.5.9..

### 2.6.2. Transferência Lateral

Quando os veículos estão fazendo uma curva, surge uma força centrífuga se opõe ao sentido da aceleração lateral produzida pelo contato dos pneus com o solo [Milliken 1995]. Fazendo momentos em um modelo de  $\frac{1}{2}$  veículo na vista frontal, é possível calcular a transferência de carga em um eixo sabendo o peso do mesmo,  $W$ , a aceleração lateral em “g”, a altura do CG,  $h$  e a bitola do veículo,  $t$ . A representação de  $\frac{1}{2}$  veículo é mostrada na figura 11. A equação 7 mostra o acréscimo de carga em um lado do veículo e conseqüentemente o decréscimo no outro lado ( $\Delta W$ ).

$$\Delta W = \frac{W A_y h}{t} \quad (7)$$

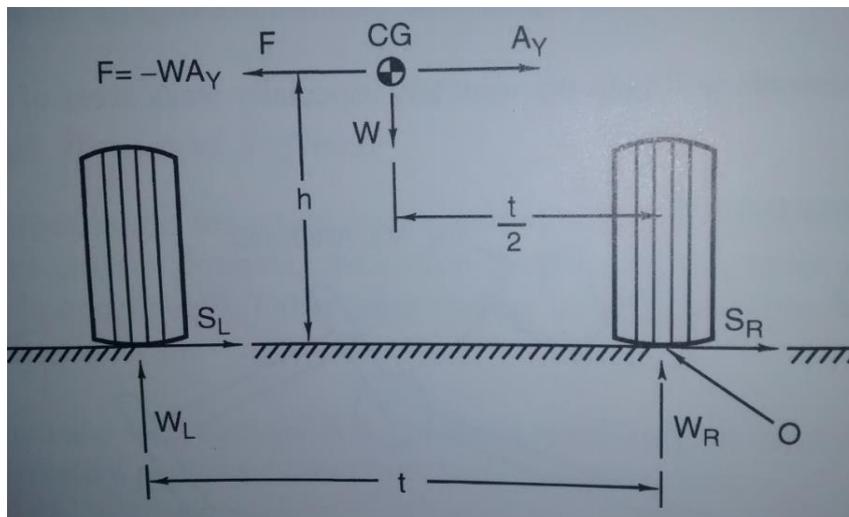


Figura 11. Modelo 1/2 Veículo sob Aceleração Lateral. Fonte: Milliken, 1995.

### 2.7. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A análise por elementos finitos (MEF) é caracterizada pela discretização da estrutura em elementos menores de forma contínua, mantendo assim as mesmas propriedades do material [Lotti 2006].

Por meio de sua aplicação é possível analisar tensões, deslocamentos, vida em fadiga, entre outros comportamentos estruturais. Com esta ferramenta

computacional é possível analisar diversos tipos de estruturas de forma mais eficiente e rápida.

Inicialmente o MEF foi criado para tratar de sólidos, mas atualmente é utilizado em áreas como mecânica dos fluidos, magnetismo, transferência de calor, etc. [Azevêdo 2015].

### 2.7.1. Ansys

O *software Ansys* possui diversas ferramentas para a aplicação do MEF, sendo este utilizado no presente trabalho. A modelagem do conjunto de suspensão levando em conta fatores dinâmicos e sua análise estrutural no *Ansys* são temas do estudo em questão.

A escolha da utilização do MEF através do *software Ansys* se deve a natureza complexa das peças constituídas por diferentes materiais, o que inviabiliza uma solução analítica. Tomando como base estes fatores, o *software Ansys* possui boa interação, pois o método utilizado no computador é o numérico [Azevêdo 2015].

O *software* se divide em 3 partes principais, sendo elas: Pré-processamento, Solução e Pós-processamento. Cada uma delas são etapas necessárias para o estudo da estrutura e são descritas nos itens 2.7.1.1., 2.7.1.2. e 2.7.1.3.. A figura 13 mostra a sequência de ações a serem tomadas para a análise da estrutura.

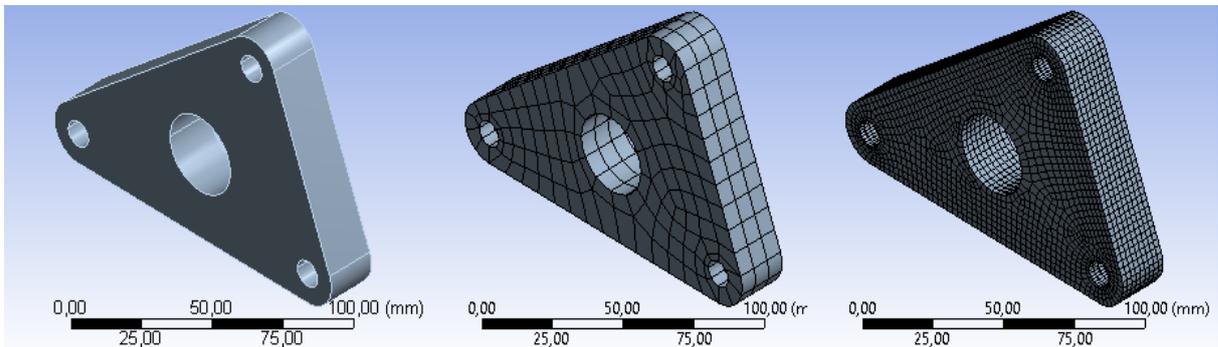
#### 2.7.1.1. Pré-processamento

Inicialmente é realizado o desenho em 3D da estrutura em programa computacional de desenho (CAD), no presente trabalho utiliza-se o *Catia V5*. Existem certos softwares que possuem uma melhor portabilidade com o *Ansys*, exportando para ele informações como o tipo de material utilizado. O *Catia V5* não possui este tipo de recurso, mas mesmo assim não compromete o estudo em questão.

Após a exportação da geometria do *software CAD* para o *Ansys* é necessário gerar uma malha na mesma, onde a peça, originalmente contínua, é subdivida em pequenos elementos ligados por nós, sendo este processo chamado de discretização [Azevêdo 2015]. O processo de discretização e refinamento de uma malha são mostrados na figura 12.

Nesta fase também são definidas as condições de contorno, assim como apoios, carregamentos, condições de contato, deslocamentos prévios, materiais e

também são incluídas as análises que serão analisadas posteriormente no pós-processamento.



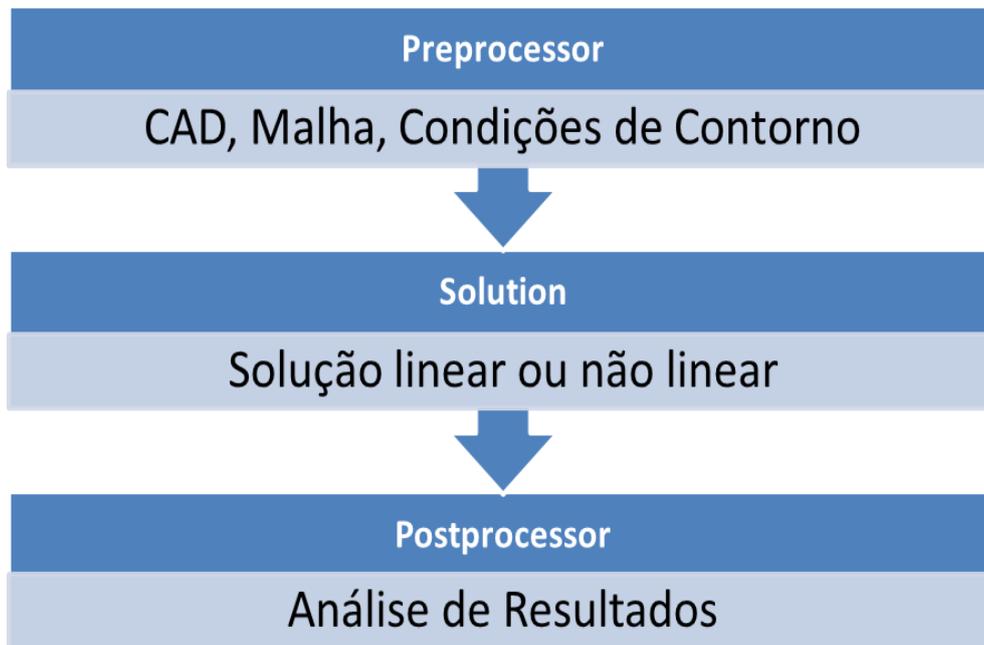
**Figura 12. Exemplo de refinamento de malha. Fonte: Autor.**

#### 2.7.1.2. Solução

Nesta fase, é escolhido o tipo de solução dentre linear e não linear a fim de obter os deslocamentos nodais. Nesta fase os recursos computacionais são mais requeridos, pois todos os cálculos numéricos são realizados para que os resultados possam ser gerados. Qualquer inconsistência ou engano cometido no pré-processamento pode gerar erros nesta fase, sendo assim, a fase posterior será comprometida.

#### 2.7.1.3. Pós-processamento

Nesta etapa da análise são extraídos diversos tipos de resultados, tais como: Tensões, coeficientes de segurança, convergência, vida em fadiga, frequências modais, etc. Nesta fase entra o trabalho de verificação da eficiência da estrutura em estudo, por meio dela é possível ter ideia se a estrutura está bem dimensionada ou se precisa de ajustes.



**Figura 13. Sequência de análises no Ansys. Fonte: Autor.**

### 3. RESULTADOS PRELIMINARES

#### 3.1. RESTRIÇÕES DE REGULAMENTO

Por questões de regulamento da categoria de Fórmula SAE elétrico, os seguintes requisitos devem ser cumpridos.

- *Ride Height* do veículo de no mínimo 65 mm;
- Os pneus são os únicos elementos que devem estar em contato com o solo;
- A distância entre eixos do veículo deve ser de no mínimo 1525 mm;
- A diferença entre os tamanhos dos eixos não deve ultrapassar 25%;
- As rodas devem ter 8 polegadas de diâmetro no mínimo;
- O curso da suspensão deve ser de no mínimo duas polegadas, sendo uma polegada em *bump* e uma polegada em *rebound*;
- O ponto de fixação da suspensão no chassi deve estar visível;
- O sistema de direção deve estar conectado ao menos em 2 rodas;
- O tipo de pneu e seu tamanho são de livre escolha.

#### 3.2. A COMPETIÇÃO

A competição da Fórmula SAE no Brasil é realizada durante três dias, onde provas estáticas, dinâmicas e avaliação do desempenho de cada projeto na pista são realizados. São avaliadas também apresentações técnicas da equipe onde são incluídos relatórios de projeto, custos e marketing. Todos os relatórios são avaliados por engenheiros especialistas e cada um deles atribui uma nota de desempenho. Também são feitas apresentações de viabilidade econômica para diretores da indústria automobilística [1].

As provas dinâmicas da competição são compostas pelas seguintes provas:

- *Aceleração*: prova onde o veículo percorre 75 m em aceleração plena onde velocidade média deve estar acima de 4,6 km/h.
- *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 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. A figura 14 mostra o traçado desta prova.

- *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, slalom e circuito misto. A pontuação é obtida em função do tempo decorrido no percurso [6].
- *Enduro*: Competição de duração maior realizado em um percurso travado por muitas curvas. Seu objetivo é avaliar o desempenho geral do veículo e sua durabilidade. O tempo de volta deve ficar em no máximo 145% do melhor tempo [7].

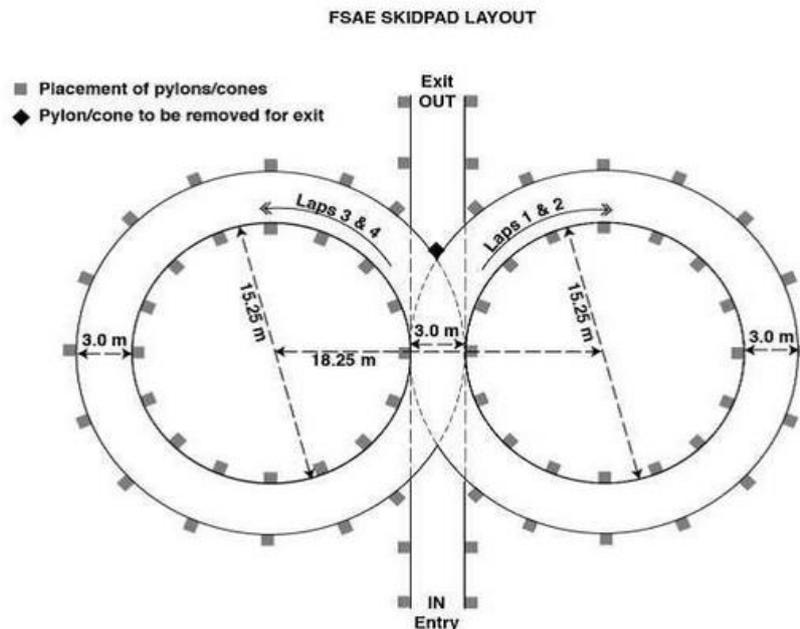


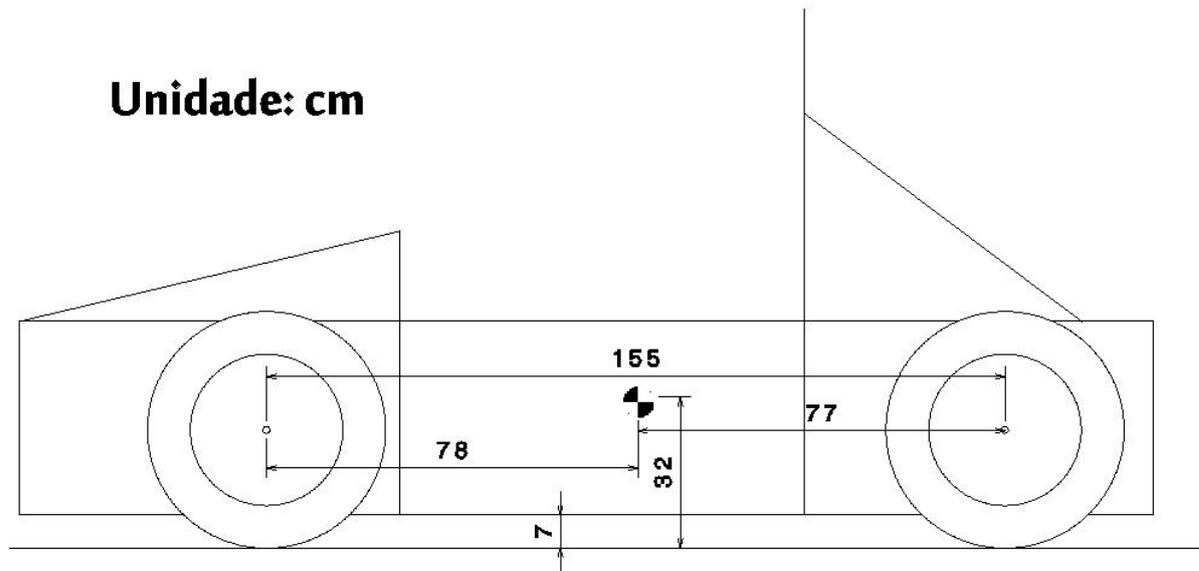
Figura 14. Prova Skid Pad. Fonte: SAE.

### 3.3. DADOS INICIAIS

A seguir serão apresentados dados já adquiridos previamente para a elaboração do presente estudo. A tabela 2 mostra alguns dados referentes ao projeto da suspensão. A localização do CG do veículo é mostrada na figura 15.

Tabela 2. Dados Iniciais de Projeto.

Entre eixo	1550 mm
Altura CG	320 mm
Altura ao solo	70 mm



**Figura 15. Localização do CG. Fonte: Autor.**

Os pneus utilizados no projeto são do tipo slick fabricados pela Pirelli e sua descrição é 175/510-13 P Zero, ou seja, possui aproximadamente 50 cm de diâmetro e largura da banda de rodagem de aproximadamente 17,5 cm. A figura 16 mostra os pneus utilizados.



**Figura 16. Pneu Slick aro 13. Fonte: Autor.**

### 3.4. ANCORAGEM DA SUSPENSÃO

Para a definição dos pontos de ancoragem da suspensão foram analisados alguns fatores, tais como a altura do centro de rolagem lateral e frontal, efeitos *anti dive* e *anti squat*, a distância entre eixos assim como o momento gerado pela distância entre as alturas dos centros de rolagens e do centro de massa do veículo.

A distância entre eixos do veículo foi definida para ser curta, priorizando a finalidade de agilidade em curvas, mas dessa forma incrementando a transferência de carga longitudinal. A informação do valor do entre eixo se encontra na tabela 2.

O centro de gravidade do protótipo foi obtido através do software Catia V5, onde todos os subsistemas do veículo foram modelados e posteriormente acoplados em seus devidos lugares para que o software obtivesse as coordenadas do centro de massa do produto completo.

O ponto de partida para a definição dos pontos de ancoragem dos braços da suspensão foram os ângulos desejados para que as geometrias *anti dive* e *anti squat* ficassem em níveis aceitáveis para que nem o chassi nem o conjunto de amortecedores e molas sofressem grandes esforços. Após a devida escolha dos ângulos formados entre o solo e as linhas que se iniciam no centro de contato pneu-solo, o centro de rolagem já estava definido como sendo a interseção das duas linhas. Na figura 17 os ângulos são mostrados assim como as linhas que formam ele, sendo as iniciadas e terminadas no centro de contato do pneu e centro instantâneo, respectivamente representadas na cor verde.

Com isso era necessário apenas definir os centros instantâneos, e a partir deles, iniciar duas linhas que se estendem do CI até o próximo conjunto pneu-roda e marcar nestas mesmas linhas seus pontos de ancoragem para os braços. Na figura 17 é possível ver que as linhas tracejadas em laranja são as vindas de cada centro instantâneo e os pontos de formato quadrado são os pontos de ancoragem definidos.

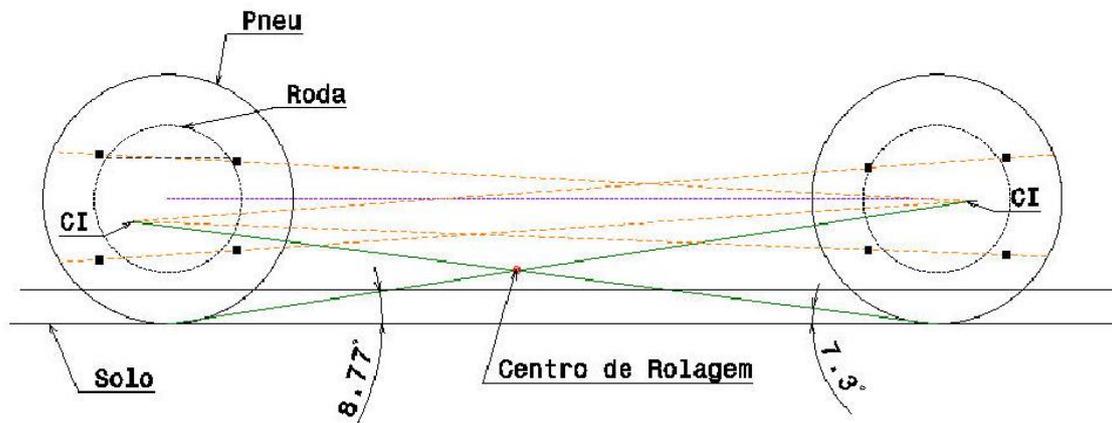


Figura 17. Vista lateral com definição dos pontos de ancoragem da suspensão. Fonte: Autor.

Na figura 18 os pontos de ancoragem estão explicitados com suas respectivas distâncias assim como altura do chassi ao solo e tamanhos de rodas e pneus.

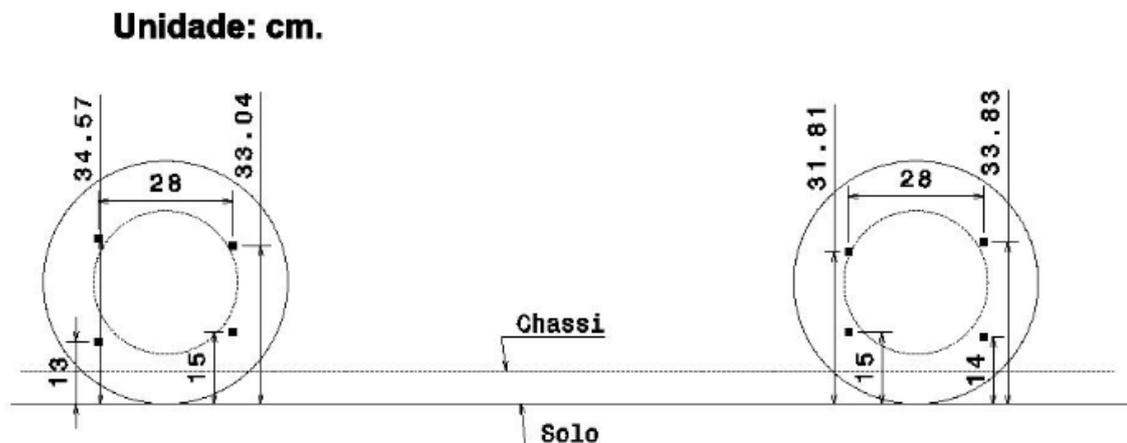


Figura 18. Pontos de Fixação da Suspensão no Chassi. Fonte: Autor.

### 3.5. PROJETO DO SVSA

Como visto no item 2.5.4., o comprimento do SVSA depende do centro instantâneo lateral do veículo. Tendo posse deste comprimento é possível calcular o efeito *Anti Dive*, onde seus resultados são mostrados na tabela 3.

#### 3.5.1. Cálculo dos Efeitos “Anti”

Os resultados obtidos pelos efeitos *Anti Dive* e *Anti Squat* devem ficar numa faixa onde chassi e conjunto de suspensão não sofram esforços excessivos. Para isso, foi definido como uma faixa de 40 a 60% em cada um. Seus resultados são explicitados na tabela 3.

**Tabela 3. Cálculo dos Efeitos Anti.**

$\theta F$ [deg]	8,77
$\theta R$ [deg]	7,3
$\theta F$ [rad]	0,153065
$\theta R$ [rad]	0,127409
L [mm]	1550
H [mm]	320
%Ff	60,00%
%Ft	40,00%
Anti-Dive	44,83532
Anti-Squad	62,04987

Onde:  $\theta F$  e  $\theta R$  são ângulos provindos da figura Z, L é a distância entre eixos, H é a altura do CG, %Ff e %Ft são as porcentagens de frenagem na frente e na traseira respectivamente.

### 3.6. ANGULAÇÃO DOS BRAÇOS

Foi definido como sendo a altura dos centros de rolagem dianteiro e traseiro o fator de projeto para os ângulos obtidos pelo prolongamento dos braços com o nível do solo. Um centro de rolagem baixo foi definido como sendo o ponto onde ocorre o acoplamento de forças entre as massas suspensas e não suspensas do veículo. Assim também elevando o momento gerado pelas forças exercidas no centro de massa. [Torres, 2006 *apud* Alexander, 1991]. Os ângulos formados pelos braços também precisavam atender à limitação de espaço da manga de eixo e da roda, não podendo ultrapassar o limite da última.

Na figura 19 encontram-se os centros de rolagem e instantâneos, os tamanhos de cada braço e ângulos dos mesmos na dianteira do veículo. A figura 20 mostra a parte traseira do veículo. Onde as linhas em azul são os prolongamentos dos braços ao centro instantâneo e as em vermelho são as linhas que definem o centro de rolagem.

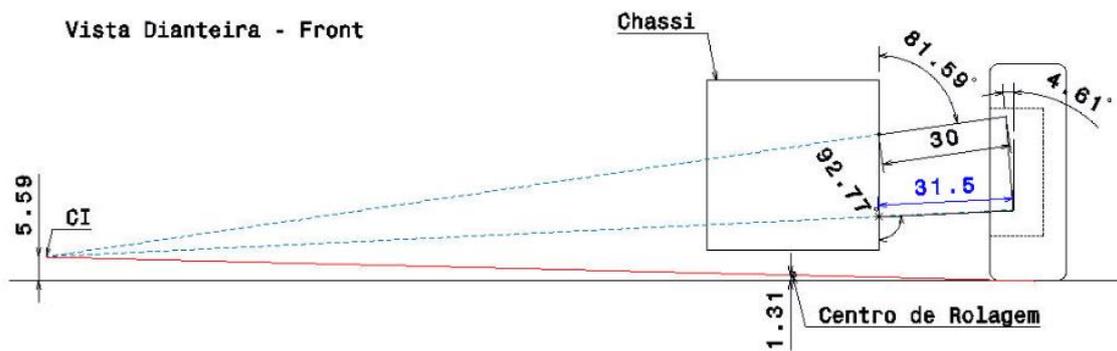


Figura 19. Vista dianteira do veículo com CR e CI. Fonte: Autor.

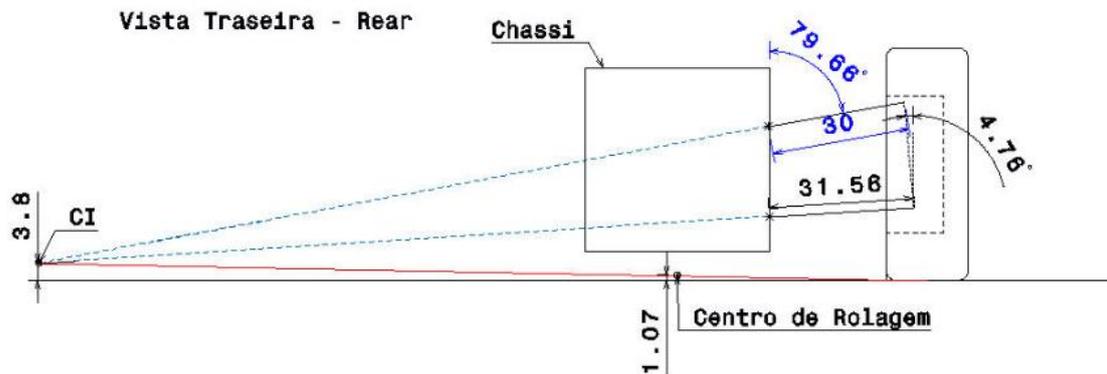


Figura 20. Vista traseira do veículo com CR e CI. Fonte: Autor.

Como se pode ver nas figuras 19 e 20, os centros de rolagem estão acima do solo, mas com alturas em relação ao mesmo bem curtas, isso implica num maior esforço de rolagem ao veículo, sendo necessário a escolha de molas e amortecedores mais resistentes, assim como uma barra anti rolagem. Um centro de rolagem mais baixo também proporciona uma maior aderência em aceleração, assim como mostrado na tabela 1.

### 3.7. PROJETO DO FVSA

O comprimento do *Front view swing arm* tem relação direta com o cálculo da taxa de variação de câmbio. Como o ideal seria uma variação mínima, quanto maior o comprimento FSVA, menor será a variação. Considerando estes fatores de projeto o FSVA foi definido e é mostrado na tabela 4, assim como o cálculo da taxa de variação de câmbio.

### 3.7.1. Taxa de Variação de Câamber

Como explicitado na equação 3 , a taxa de variação de câamber varia com o comprimento da FVSA sendo mostrado o resultado do cálculo na tabela 4.

**Tabela 4. Dados da Geometria da Suspensão.**

Vista	Frontal		Traseira	
CI	5,59	2,200787	3,8	1,496063
CR	1,31	0,515748	1,07	0,42126
FVSA	223,54	88,00787	188,06	74,03937
Unidade	cm	in	cm	in
Taxa de Variação de Câamber		0,011362	deg/in	0,013506

No caso do câamber estático, para otimizar o desempenho do veículo em uma curva, é necessário prover um ângulo na direção da rotação [Jazar 2008]. Mas como as pistas da competição da Fórmula SAE visam obter informações amplas sobre o projeto, as pistas possuem curvas em ambas as direções com quantidades e raios de curva próximo da igualdade entre elas.

Baseando nos fatores explicitados no parágrafo acima e no item 2.5.5., o câamber estático foi definido por ser  $-1^\circ$  em todas as rodas. Este ângulo é feito tanto pelo tamanho dos braços da suspensão tanto como nos furos de conexão da manga de eixo.

### 3.8. CÁLCULO DA TRANSFERÊNCIA DE CARGA LONGITUDINAL

Para o cálculo da transferência longitudinal de carga foi feito um programa no software Matlab para que o mesmo o calculasse com base em parâmetros iniciais tais como a altura do CG do veículo, bitola, desaceleração na frenagem e peso total do carro. A desaceleração selecionada foi de 1,4 g, valor correspondente ao necessário para frear totalmente o carro de uma velocidade de 60km/h no espaço determinado na competição da SAE. O resultado deste cálculo é mostrado na tabela 5.

### 3.9. CÁLCULO DA TRANSFERÊNCIA DE CARGA LATERAL

Com a mesma metodologia adotada no cálculo da transferência longitudinal, parâmetros iniciais como bitola, aceleração lateral, altura do CG e massa do veículo foram inseridos no programa e seu resultado é mostrado na tabela 5. O valor de aceleração lateral selecionado foi de 1.1 g devido a natureza das curvas do circuito assim como a velocidade e aceleração desenvolvidas pelo protótipo.

Para se conseguir valores razoáveis em ambas as transferências de carga, é necessário revisar o projeto do veículo, mudando, por exemplo, a altura de seu CG por meio de realocação de componentes no espaço disponível no veículo.

**Tabela 5. Transferência de Carga Longitudinal e Lateral.**

Eixo/Lado	Carga inicial em lb(kg)	Carga final em lb(kg)	Transferência em lb(kg)
Dianteiro	325(147,5)	512(232,3)	187(84,9)
Traseiro	325(147,5)	138(62,7)	-187(-84,9)
Esquerdo	325(147,5)	521(236,4)	196(88,9)
Direito	325(147,5)	129(58,6)	-196(-88,9)

Analisando os resultados mostrados na tabela E, pode-se inferir que o eixo dianteiro será mais exigido, principalmente numa frenagem em curva, pois, as transferências longitudinais e laterais se combinam em um pneu.

Com a combinação descrita no parágrafo acima, é possível em posse destes valores, simular a estrutura do conjunto de suspensão com seus valores máximos exigidos em condições normais de pista.

### 3.10. ANGULAÇÃO DO PUSH ROD

A partir dos dados analisados na tabela 5 de transferência de cargas, é possível definir o ângulo do *push rod* e, conseqüentemente, a posição dos *rocker arms*, conjunto mola-amortecedor e barra anti rolagem.

O ângulo do *push rod* é importante pois define a parcela da esforços que serão transmitidos do conjunto pneu-roda ao conjunto amortecedor-mola e os outros componente envolvidos. A figura 21 mostra a definição da angulação e indica a porcentagem de carga que o *push rod* transmitirá.

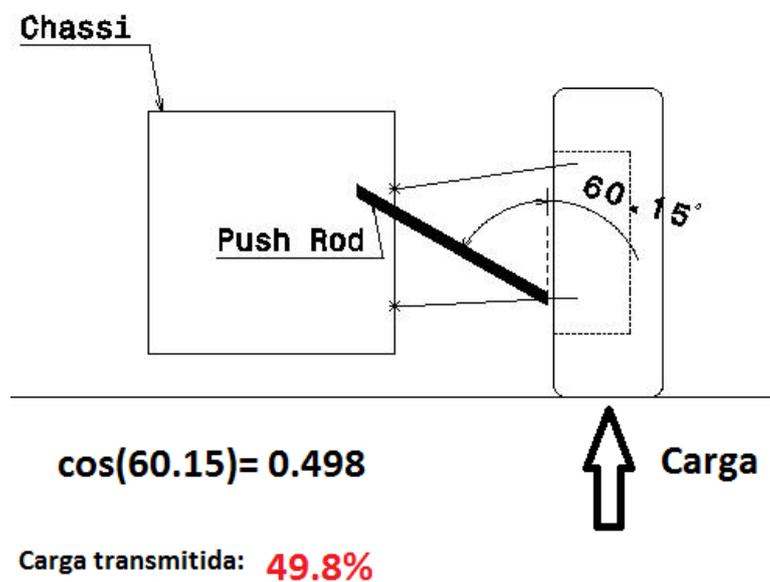


Figura 21. Angulação do *Push Rod* e Transmissão de esforços. Fonte: Autor.

#### 4. CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

A tabela 6 mostra o cronograma de trabalho previsto para a entrega do TCC

2.

**Tabela 6. Cronograma de Atividades Previstas para o TCC 2.**

Etapa	Mês						
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maiio	Junho	Julho
Projeto CAD	■						
Escolha de Materiais	■						
Exportação para o Ansys		■					
Simulação individual		■	■				
Simulação do Conjunto			■	■			
Preparação de Resultados				■	■		
Análise dos Resultados						■	■
Conclusões e Considerações Finais							■

## 5. CONCLUSÕES PARCIAIS

Ao longo desse estudo, o leitor adquiriu conhecimentos sobre os termos comumente relacionados à dinâmica de veículos. Isso porque eles foram apresentados como revisão bibliográfica dos principais autores da área. Logo, esse trabalho contribui no âmbito elucidativo sobre o projeto de um sistema de suspensão, sendo o tipo duplo A escolhido para fins de um veículo de alto desempenho.

Em busca por uma validação de um sistema de suspensão automotivo, é possível concluir que há a necessidade de se considerar diversos fatores dinâmicos para o desenvolvimento de peças como os braços, *push rods*, *rocker arm* e manga de eixo. Esses fatores são: cambêr (ainda com sua variação), cáster, convergência, CR, CI, CG, entre eixos, bitola, pneu, aro, entre outros. Por conseguinte, a partir desses dados é possível iniciar um projeto e análise de um conjunto de suspensão.

Por meio de uma ampla pesquisa bibliográfica, tornou-se possível definir os parâmetros para o desenvolvimento do conjunto de suspensão abordado no estudo. Para isso, priorizou-se a relação intrínseca dos estudos dinâmicos com fatores de análise estrutural. Pela definição da geometria da suspensão, é possível determinar elementos e limitações para o desenvolvimento de subsistemas da suspensão, como o tamanho dos braços, a sua angulação, os pontos de fixação no chassi e os pontos de ancoragem na manga de eixo. Com o auxílio das simulações numéricas produzidas para transferências de cargas, a angulação do *push rod* pode ser definida para que a transmissão de esforços para o *rocker arm* e amortecedores sejam controladas.

Tratando-se de veículos de alto desempenho, a competição promovida pela SAE Brasil desperta o interesse dos estudantes de engenharia para estudos na área automobilística. Dentre as diversas circunstâncias a serem consideradas no desenvolvimento desses tipos de veículos, a resistência estrutural e peso são fatores importantes para a análise do produto. Assim, definir o modo de fazê-lo e quais as condições ideais para que o carro atinja alto desempenho, são os objetos de estudo desse trabalho. Portanto, a partir das simulações de transferências de cargas, valores foram definidos para serem usados nas simulações estruturais, caracterizando assim, condições de contorno reais, em que, na simulação estrutural, será possível fazer uma suspensão que atenda a todos os requisitos do projeto e que consiga obter um excelente desempenho.

Em relação às simulações de transferência de cargas, valores altos foram gerados. Esse resultado deve-se a alguns fatores como a altura maior do CG, a distribuição de peso e a geometria da suspensão. Portanto, conclui-se que um CG bem baixo é o recomendado para que o conjunto de suspensão dianteira não sofra esforços excessivos devido às transferências de cargas longitudinais e laterais. Cada um dos outros fatores mencionados, também possibilitam a diminuição dos valores das transferências, porém o CG possui uma maneabilidade maior num veículo por meio da disposição mais inteligente da cada um dos seus componentes.

Dessa maneira, a partir das análises relacionadas à dinâmica veicular, tornou-se possível criar uma conexão entre os elementos automotivos e a sua validação estrutural. Em vista disso, os resultados obtidos devido a essa interdependência são capazes de contribuir para a construção de um projeto e o respectivo desenvolvimento de uma suspensão de alto desempenho. Assim, essa análise dos fatores dinâmicos contribuiu para uma posterior avaliação estrutural do sistema. Portanto, o objetivo do trabalho foi atingido e com ele já é possível avançar nas análises estruturais que serão tema do TCC 2.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZEVÊDO, D.F.O.**, 2015, “Apostila de Treinamento Ansys Workbench: Análise Estrutural”, Apostila do curso de Engenharia Mecânica, UMC, São Paulo.
- BEER, F.P., JOHNSTON, E.R.**, 1989, “Resistência dos Materiais”, Segunda Edição, McGraw-Hill, São Paulo.
- DIXON, J.C.**, 1999, “The Shock Absorber Handbook”, Society of Automotive Engineers, USA.
- FREITAS JR., L.M.P.**, 2006, “Estudo da Dinâmica Vertical de uma Suspensão do tipo MacPherson”, Tese de Mestrado, USP, São Carlos.
- GILLESPIE, T.D.**, 1992, “Fundamentals of Vehicle Dynamics”, Society of Automotive Engineers, USA.
- JAZAR, R.N.**, 2008, “Vehicle Dynamics: Theory and Application”, Springer, New York, USA.
- LOTTI, R.S., MACHADO, A.W., MAZZIEIRO, E.T., LANDRE JR., J.**, 2006, “Aplicabilidade Científica do Método dos Elementos Finitos”, Artigo Rev. Dent. Press Ortodon. Ortop. Facial, Maringá.
- MILLIKEN, W.F., MILLIKEN, D.L.**, 1995, “Race Car Vehicle Dynamics”, Society of Automotive Engineers, Warrendale, USA.
- NICOLAZZI, L.C., LEAL, L.C.M., ROSA, E.**, 2008, “Uma Introdução a Modelagem quase Estática de Veículos Automotores de Rodas”, Publicação interna do GRANTE, UFSC, Florianópolis.
- SORIANO, H.L.**, 2003, “Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas”, edUSP, São Paulo.
- SORIANO, H.L., LIMA, S.S.**, 2006, “Análise de Estruturas: Método das Forças e Método dos Deslocamentos”, 2ª edição, Ciência Moderna, Rio de Janeiro.
- TORRES, R.N.**, 2011, “Contribuição para o Desenvolvimento de uma Suspensão Aplicada a um Veículo Fórmula SAE”, Projeto de Graduação, UnB, Brasília.
- [1] - Portal SAE Brasil, “O que é o Fórmula?”, disponível em: <[http://www.saebrasil.org.br/eventos/programas\\_estudantis/formula.aspx](http://www.saebrasil.org.br/eventos/programas_estudantis/formula.aspx)> Acesso em Setembro de 2015.
- [2] – Portal Infomotor, “Sistema de Suspensão Automotiva”, disponível em: <<http://www.infomotor.com.br/site/2009/06/sistema-de-suspensao-automotiva/>> Acesso em Setembro de 2015.
- [3] – Portal Autódromo de Curitiba, “Evolução da Suspensão Automotiva”, disponível em: <<http://www.autodromodecuritiba.com.br/blog/curiosidades/evolucao-da-suspensao-automotiva/>> Acesso em Setembro de 2015.
- [4] – Portal Rede Oficinas Brasil, “Suspensão”, disponível em: <<http://redeoficinabrasil.com.br/suspensao>> Acesso em Setembro de 2015.
- [5] – Portal Oficina Brasil, “Os Diferentes Tipos de Suspensão: Sistema Double Wishbone”, disponível em: <<http://www.oficinabrasil.com.br/consultor-ob/1171-parte-2--os-diferentes-tipos-de-suspensao-sistema-double-wishbone>> Acesso em Agosto de 2015.
- [6] - Portal USP, “Projeto Fórmula”, disponível em: <[http://www.usp.br/lds/v/?page\\_id=398](http://www.usp.br/lds/v/?page_id=398)> Acesso em Setembro de 2015.
- [7] - Portal SAE, “2015 Formula SAE Rules”, disponível em: <[http://students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2015-16\\_fsae\\_rules.pdf](http://students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2015-16_fsae_rules.pdf)> Acesso em Agosto de 2015.