



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
CURSO DE BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

MAIZE CIBELE DE LIMA MELO

**ESTUDO COMPARATIVO DA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE ATAQUE NA
RESPOSTA DINÂMICA DE UM VEÍCULO BAJA**

CARAÚBAS-RN

2019

MAIZE CIBELE DE LIMA MELO

**ESTUDO COMPARATIVO DA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE ATAQUE NA
RESPOSTA DINÂMICA DE UM VEÍCULO BAJA**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Me. Rafael Bezerra Azevedo Mendes.

Co-orientador: Prof. Esp. Alison Kaio Dantas Pereira

CARAÚBAS-RN

2019

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

M Melo, Maize.
 ESTUDO COMPARATIVO DA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE
 ATAQUE NA RESPOSTA DINÂMICA DE UM VEÍCULO BAJA /
 Maize Melo. - 2019.
 42 f. : il.

 Orientador: Rafael Mendes.
 Coorientador: Alison Pereira.
 Monografia (graduação) - Universidade Federal
 Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
 Tecnologia, 2019.

 1. Baja. 2. Análise dinâmica. 3. Ângulo de
 ataque. I. Mendes, Rafael, orient. II. Pereira,
 Alison, co-orient. III. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

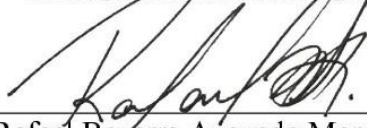
MAIZE CIBELE DE LIMA MELO

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE ATAQUE NA RESPOSTA DINÂMICA
DE UM VEÍCULO BAJA**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Defendida em: 18 / 03 / 2019.

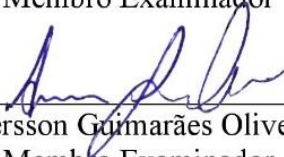
BANCA EXAMINADORA



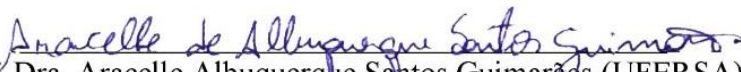
Prof. Me. Rafael Bezerra Azevedo Mendes (UFERSA)
Presidente



Prof. Esp. Alison Kaio Dantas Pereira (UFERSA)
Membro Examinador



Prof. Me. Andersson Guimarães Oliveira (Pitágoras)
Membro Examinador



Prof. Dra. Aracelle Albuquerque Santos Guimarães (UFERSA)
Membro Suplente

*Dedico este trabalho ao meu pai Francisco
Erismar Melo (In Memoriam)*

E a minha mãe Maurícia Martins de Lima Melo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar à Deus, por ter me guiado e concedido discernimento durante todo o tempo da graduação.

Agradeço a minha base, minha família, pelo incentivo e empenho na formação da minha educação. Aos meus pais Maurícia e Erismar (in memoriam), minhas irmãs Marília, Marize e Mariane, por sempre me apoiarem nas minhas decisões e entenderem pelas vezes que abdiquei de estar com elas.

Agradeço em especial ao meu pai Erismar (in memoriam), meu eterno herói e anjo da guarda, que me motivou e motiva a não desistir dos meus sonhos, junto com minha mãe nunca mediram esforços para me ver bem.

Agradeço ao meu orientador Me. Rafael Bezerra Azevedo Mendes por todo apoio e dedicação, aos professores Esp. Alison Kaio Dantas Pereira, Me. Andersson Guimarães Oliveira e Me. Diego David Silva Diniz por contribuírem com discussões, acrescentando valor ao trabalho.

À equipe Caraubaja, pela disponibilidade dos protótipos estudados, bem como o apoio de todos que fazem o projeto para a realização deste trabalho.

Aos amigos Maria Luiza, Mara Monaliza, Wictor Guilherme e Nilson Francisco que me ajudaram de alguma forma para a realização deste trabalho.

Agradeço à todos os amigos que ganhei na UFERSA, Thaís Lobo, Ana Catherine, Lillian Hapuque, Ianna Mirelly, Rafaela Jordania, Raquel Lopes, Fernando Amaral, Ítalo Ferreira, Felipe Bandeira e Diego Aquino, que durante esse tempo de graduação conviveram comigo, sorriram comigo, choraram comigo, aguentaram os meus estresses e se tornaram minha família.

À todos um muito obrigada!

“Faça o teu melhor, na condição que você tem,
enquanto você não tem condições melhores,
para fazer melhor ainda.”

Mário Sergio Cortella

RESUMO

O Baja é um tipo de veículo *off-road*, que devido à sua dinâmica, reúne diversas características capazes de transpor vários tipos de terrenos. A SAE Brasil, propõe estudantes de engenharia projetar e construir esses tipos de veículos, com intuito de promover competições de níveis regionais, nacionais e mundiais, instigando os envolvidos a buscar formas e oportunidades de melhorias dos projetos ano após ano. O trabalho apresenta à temática sobre a realização do estudo da influência do ângulo de ataque na resposta dinâmica no veículo baja. Foram feitas análises entre dois veículos, no qual possuem ângulos de ataque distintos, estes foram desenvolvidos pela equipe Caraubaja. Foi realizada uma análise sobre o ângulo *camber*, *caster*, *roll center* e deslocamento longitudinal das rodas dianteiras acerca dos veículos CT17/18 e SEVERO18/19. Foi feita uma coleta de dados levando em consideração os resultados obtidos nas simulações realizadas em softwares e em competições nacionais e regionais, no qual foram realizados comparativos estáticos e dinâmicos. Com auxílio dos softwares Inventor e ADAMS Car, foram modelados em 3D ambos veículos. Os estudos revelaram diferenças significativas em cada um dos veículos, o veículo CT17/18 o qual tem ângulo de ataque menor, apresentou melhor variação do *roll center*, enquanto o veículo SEVERO18/19 o qual tem maior ângulo de ataque, apresentou melhor variação dos demais parâmetros analisados, o que influenciou diretamente em uma melhor superação de obstáculos quando comparado ao CT17/18, além de reduzir a absorção de forças laterais e aumento de resistência à esforços, assim foi possível analisar melhorias de projeto a partir do aumento do ângulo de ataque.

Palavras-chave: Baja, Análise dinâmica, Ângulo de ataque.

ABSTRACT

The Baja is a type of vehicle off-road, that due to its dynamics, gathers various characteristics capable of transpose various types of lands. The SAE BRAZIL proposes engineering students to design and to build these types of vehicle, with intent of promoting competitions of regional, national, and worldwide levels, instigating the involved to search shapes and opportunities of improvements of the projects year after year. The study presents the thematic about the achievement of the study of the influence of the angle of attack in the dynamic answer in the baja vehicle, it were made analysis between two vehicle, in the which have angles of distinct attacks. It was perfomed a analyse about the angle camber, caster, roll center and longitudinal displacement of the front wheels about of the vehicles CT17/18 and SEVERO18/19, produced by team Caraubaja. It put up data leading in consideration the results obtained in the simulations perfomed in softwares and in national and regional competitions, in the which were perfomed static and dynamic comparatives. With help off the softwares Inventor and ADAMS car, it were patterned in 3D, both vehicles. The studies revealed significant diferences in each one of the vehicles, the vehicle CT17/18 which one has minor angle of attack, presented better variation of the roll center, while the vehicle SEVERO18/19 which one has greater angle of attack, presented better variation of the other parameters analyzed, which influenced of positive form the overcoming of obstacles when compared to CT17/18, beyond of reducing the absorption of lateral forces and increase of resistance to efforts. Lastly, it was possible to analyze improvements of project from of the increase of the angle of attack.

Keywords: Baja, Dynamic analysis, Angle of attack.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Veículos <i>off-roads</i>	4
Figura 2: Veículo baja tradicional	5
Figura 3: Ângulo de ataque	7
Figura 4: Ângulo de saída	7
Figura 5: Inclinação lateral máxima	8
Figura 6: Definição de <i>bounce</i>	9
Figura 7: Sistemas de coordenadas	9
Figura 8: Diagrama da avaliação da dinâmica vertical	10
Figura 9: Sistemas de um veículo baja.....	11
Figura 10: Chassis de veículos baja	12
Figura 11: Comparação suspensão independente e rígida.....	13
Figura 12: Suspensões dependentes	14
Figura 13: Suspensões independentes	15
Figura 14: Suspensão dupla A.....	16
Figura 15: Desempenho de suspensão duplo A.....	16
Figura 16: Ângulo de câmbor.....	17
Figura 17: Ângulo de caster	18
Figura 18: <i>Toe-in</i> e <i>toe-out</i>	19
Figura 19: Comportamento sobre/subesterçante conforme variação da roda traseira.....	20
Figura 20: Entre eixo.....	20
Figura 21: Bitola	21
Figura 22: <i>Rebound</i> e <i>bump</i>	21
Figura 23: <i>Roll center</i>	22
Figura 24: Fluxograma com etapas das atividades.....	23
Figura 25: Objetos de estudo.....	24
Figura 26: Modelagem dos itens de suspensão do veículo SEVERO18/19.....	26

Figura 27: Sistemas de suspensão e direção do ADAMS Car	27
Figura 28: Desenho ilustrativo do evento de Suspensão	29
Figura 29: Modelagem do veículo CT17/18	30
Figura 30: Modelagem do veículo CT17/18	30
Figura 31: Ângulos de ataque.....	31
Figura 32: Modelagem do veículo CT17/18	31
Figura 33: Simulação do sistema de suspensão do veículo SEVERO	33

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Variação de caster com o movimento da suspensão	34
Gráfico 2: Variação de camber com o movimento da suspensão.....	35
Gráfico 3: Variação de <i>roll center</i> com o movimento da suspensão.....	36
Gráfico 4: Deslocamento longitudinal da roda dianteira com o movimento da suspensão.....	37

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Resultados da prova de enduro em competições regionais	28
Quadro 2: Resultados da prova de suspensão das competições nacionais	29

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Objetivos	3
1.1.1.	Objetivo geral	3
1.1.2.	Objetivos específicos	3
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1.	Veículos <i>off roads</i>	4
2.1.1.	Veículos baja.....	5
2.1.2.	Características dos veículos <i>off roads</i>	6
2.1.2.1.	Altura máxima.....	6
2.1.2.2.	Ângulo de ataque.....	6
2.1.2.3.	Ângulo de saída	7
2.1.2.4.	Inclinação lateral máxima	8
2.1.3.	Dinâmica dos veículos <i>off roads</i>	8
2.1.3.1.	Dinâmica vertical.....	8
2.2.	Sistemas de um veículo baja.....	10
2.2.1.	Chassi	11
2.2.2.	Suspensão	12
2.2.2.1.	Tipos de suspensão	13
2.2.2.1.1.	Suspensão duplo A	15
2.2.2.2.	Parâmetros de suspensão veicular	17
2.2.2.3.	Parâmetros para o movimento da suspensão.....	21
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
3.1.	Resultados nas últimas competições	24
3.2.	Simulações computacionais	25
3.2.1.	Inventor	25
3.2.2.	ADAMS Car	26
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
5.	CONCLUSÃO	39
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

1. INTRODUÇÃO

A SAE Brasil (Sociedade da Engenharia Automotiva) trouxe dos EUA em 1994 a competição BAJA SAE BRASIL, que propõe aos estudantes de engenharia projetar e construir veículos do tipo baja, que é um tipo de veículo *off road*, destinado ao uso fora de estrada, que reúne características para suprir adversidades de vários tipos de terreno, oferecendo a chance de aplicar na prática os conhecimentos adquiridos em sala de aula. O objetivo principal da competição é avaliar o protótipo construído, o qual deve seguir normas impostas pela SAE. A avaliação é realizada em todos os quesitos, principalmente no comportamento dinâmico, com intuito de resistir a todas as provas da competição (SAE BRASIL, 2018).

Com o avanço da indústria automobilística, faz-se necessário a aplicação de novos conceitos, métodos e avanços tecnológicos para estudos da dinâmica desses veículos. Segundo Bassetto (2004), os estudos na área da dinâmica veicular vêm apresentando maior intensidade nas últimas décadas, principalmente devido ao aumento da competitividade do mercado, baseando-se nos requisitos de qualidade, custo e tempo.

De acordo com Diniz (2014), a dinâmica veicular tem ligação direta com os comportamentos e componentes do sistema de suspensão, preocupando-se em avaliar os movimentos dos veículos sobre efeitos da pista, a alteração de qualquer parâmetro influenciará na mudança destes movimentos. Assim, um bom projeto de suspensão é primordial deve possuir bom compromisso entre o conforto, isolamento de vibração e choques com a estabilidade e manutenção do contato pneu-solo.

Para um bom desenvolvimento de um produto, há necessidades de conhecimentos específicos e competências por parte dos projetistas. Também se fazem necessárias capacidades para inovação, que se integram com a análise, modelagem, simulação e otimização de soluções e técnicas, visando proporcionar a obtenção de resultados de alta qualidade e desempenho (BASSETTO, 2004).

Para desenvolvimento e validação de um bom projeto veicular não é diferente, é necessário o uso destas inovações, gerando resultados satisfatórios ou não para o projeto, com identificação das oportunidades de melhoria. Além dos resultados apresentados na prática, que comprovam teorias existentes e propõem um vasto pensamento para melhorias de projetos futuros.

O estudo tem relevância no que diz respeito a projeto de um baja, é necessário um olhar crítico em vários parâmetros que afetam a sua dinâmica, sendo eles principalmente os

parâmetros de suspensão. Devido a vasta quantidade de influências, por exemplo na variação dos parâmetros de ângulo de caster e camber, são poucos os estudos teóricos postos em prática para que haja melhor análise dos resultados.

A Universidade Federal Rural do Semi-árido (UFERSA - Campus Caraúbas), conta com um projeto de extensão Baja SAE, onde é projetado e construído protótipos para participar de competições com etapas regionais, nacionais e mundiais. O projeto é desenvolvido pela equipe Caraubaja SAE, criada na UFERSA Caraúbas em 2015, desde então alunos envolvidos dispuseram a pôr em prática alguns desses estudos voltados a dinâmica veicular, de forma a agregar mais conhecimentos específicos.

Esta oportunidade de desenvolver projetos de veículos ano após ano é o que faz com que haja o aprimoramento de conceitos e conhecimentos, pois no desenvolvimento de cada projeto tem-se a oportunidade de melhoria de um projeto anterior a partir da análise do desempenho dinâmico, seja ele em simulações e/ou testes práticos.

A equipe Caraubaja SAE participa de competições à dois anos. Houve o desenvolvimento de projeto e fabricação de dois protótipos, um em cada ano de competição. O protótipo desenvolvido no ano de 2017, intitulado CT17/18, participou da competição regional 2017, onde enfrentou dificuldades em um dos componentes de suspensão. Posteriormente participou da competição nacional 2018, no qual enfrentou algumas dificuldades em provas dinâmicas, não conseguindo concluir o circuito de suspensão por colidir a parte frontal do chassi, ficando preso em um dos obstáculos.

Desta forma, no ano de 2018, foi desenvolvido um novo protótipo, intitulado SEVERO18/19, com intuito de apresentar melhorias em relação ao protótipo anterior, foram feitas algumas alterações no projeto, não só levando em consideração as dificuldades enfrentadas pelo CT17/18, mas sim várias outras oportunidades de melhorias que foram vistas em cada subsistema que compõe o veículo.

Isolando o problema da não conclusão do circuito de suspensão, depois da análise do que poderia ter acarretado, o novo projeto foi desenvolvido com o ângulo de ataque acrescido, como forma de sanar o problema, diante disso foram necessários alguns estudos para desenvolver e validar o projeto.

O ângulo de ataque é uma das características dos veículos *off roads* que apresenta possibilidade de mudança, o qual influencia diretamente na dinâmica, essa mudança atenderá ou não aos requisitos exigidos por qualquer projeto automobilístico, sendo um ponto crucial para uma boa ou má ultrapassagem do veículo nos obstáculos, não só para o baja, mas também para qualquer veículo da indústria automotiva (ALVES, 2006).

O ângulo de ataque de um veículo, de modo geral, pode ser acrescido de várias formas. Para o projeto do SEVERO18/19 foi modificado a partir da inclinação da parte frontal do chassi, na qual foram necessários novos pontos para fixação da suspensão dianteira, diante disso a geometria de suspensão foi modificada levando em consideração vários parâmetros da geometria do CT17/18.

A modificação deste ângulo resultou na influência de alguns dos parâmetros do veículo, principalmente os de suspensão, alterando assim seu comportamento dinâmico. Levando em consideração essas influências, foram traçados os objetivos do desenvolvimento deste presente trabalho.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

Estudar a influência do ângulo de ataque, a partir da sua mudança, na dinâmica do protótipo baja.

1.1.2. Objetivos específicos

- Levantar dados dos resultados de competições regionais e nacionais as quais os veículos CT17/18 e SEVERO18/19 participaram, listando seus respectivos ângulos de ataque;
- Realizar comparativo estático dos protótipos CT17/18 e SEVERO18/19 no software Inventor;
- Realizar simulações dinâmicas no software ADAMS Car, comparar a mudança de comportamento de parâmetros relevantes, dos protótipos CT17/18 e SEVERO18/19.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Veículos *off roads*

Na concepção de Machado (2001) a partir do surgimento dos primeiros automóveis, iniciou-se a universalização, através deles, do sonho da mobilidade e da velocidade. No Brasil, a indústria automotiva se transformou em um dos motores da economia, produzindo uma cultura extremamente arraigada, pois o uso de automóveis vai além das necessidades diárias, visto como forma de lazer. A diversidade desses automóveis se dar pelos diferentes estilos de vida, sendo diferente públicos alvos de venda, há veículos voltados para famílias, para esportes, veículos de luxo, veículos *off-roads*, etc.

Os primeiros veículos existentes foram produzidos com estruturas robustas, impulsionados por tração animal. Com a evolução tecnológica, os fabricantes de automóveis passaram a projetar veículos capazes de proporcionar elevados níveis de segurança e conforto mesmo em altas velocidades e sob condições adversas de pista, de modo cada vez mais sofisticado. Isso foi possível devido a estudos do comportamento dinâmico de veículos nas mais diversas condições de operação (REZENDE, 2007).

Os veículos *off-roads* (Figura 1), por serem projetados para transitar em locais de difícil acesso, possuem algumas características que diferem dos outros automóveis, como por exemplo: sistema de transmissão 4x4 ou 4x2, suspensão reforçada e freios bem mais eficazes (DUARTE, 2017).

Figura 1: Veículos *off-roads*



Fonte – Adaptado de Diniz (2014)

De acordo com Alves (2006) o termo *off-road* é destinado aos veículos projetados para uso fora de estrada, como tratores, escavadeiras e entre outros. Esses veículos participam de competições onde o objetivo principal é percorrer caminhos não convencionais ou terrenos acidentados, com grande nível de dificuldade.

Para o avanço da indústria automobilística Diniz (2014) relata a busca do auxílio da modelagem computacional, para que seja possível atender os pré-requisitos da engenharia e a preferência do consumidor. Além disso, o recurso de simulação pode ser aplicado ao projeto de qualquer veículo inclusive os *off-roads*.

2.1.1. Veículos baja

Conforme as normas impostas pela SAE Brasil (*Society of Automotive Engineers - Sociedade da Engenharia Automotiva*) (2018), um veículo Baja SAE é definido pelo regulamento que rege a competição SAE Brasil, o qual deve ser um protótipo fora de estrada (*off-road*), monoposto, robusto, visando comercialização ao público entusiasta. Sua maior finalidade é ter a capacidade de traspasar terrenos acidentados em quaisquer situações postas, oferecendo segurança, simples manutenção e operação.

Os veículos do tipo Baja estão inseridos na categoria de veículos *off-roads*. Como diz Kaffka (2009), o baja caracteriza-se como um veículo *off-roads* com produção fora de série, possuindo um chassi tubular e suspensão independente nas quatro rodas. O nome “Baja” vem da similaridade com veículos fora-de-estrada que disputam ralis na península de Baja Califórnia. Para Duarte (2017) o baja é um veículo recreativo, resistente e seguro. A SAE Brasil (2018) especifica regras para projeto e fabricação de veículos baja, como demonstrado na Figura 2, um modelo desenvolvido a partir das normas impostas pela SAE.

Figura 2: Veículo baja tradicional



Fonte – Autoria própria

2.1.2. Características dos veículos *off roads*

De acordo com Vieira Neta (2011), os movimentos dos veículos sobre uma superfície de pista, tais como: aceleração e frenagem, vibrações que definem o conforto e a realização de curvas; é preocupação do estudo da dinâmica veicular. O veículo e seus componentes são estudados a fim de determinar quais forças serão produzidas em cada manobra em particular e como o veículo responderá a essa situação.

“Os veículos *off-roads* apresentam características diferentes dos carros tradicionais, tais como: o aumento do vão do carro; suspensão reforçada; sistema de transmissão 4x4 ou 4x2; freios mais eficazes; componentes da massa não suspensa mais robustos; e tendência de sobreesterçamento (“saída de traseira”) considerável. Essas características, assim como o efeito do ambiente imposto a este automotor, ocasiona uma maior preocupação por parte dos engenheiros no desenvolvimento de projeto, principalmente no sistema de suspensão” (DINIZ, 2014).

Para caracterizar os veículos *off-roads* existem algumas especificações técnicas, tais como: altura máxima, ângulo de ataque, ângulo de saída, inclinação lateral máxima e rampa máxima (ALVES, 2006).

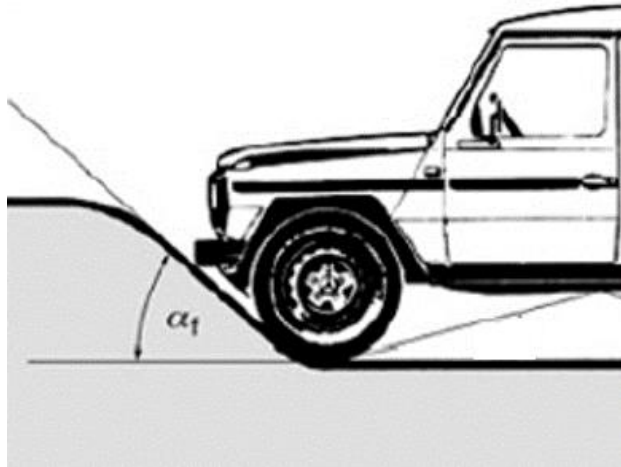
2.1.2.1. Altura máxima

A altura máxima de um veículo, também chamada de vão-livre, é a máxima altura do solo que o veículo possui. A medida pode ser feita a partir da parte mais baixa do veículo como o diferencial. Os veículos *off-roads* possuem uma média de altura máxima entre 22 cm (ALVES, 2006).

2.1.2.2. Ângulo de ataque

O ângulo de ataque, como mostrado na Figura 3, é o ângulo formado entre o solo e a linha que liga o ponto inferior do pneu ao ponto frontal do veículo. Segundo Alves (2006) é uma das especificações técnicas de um veículo *off-road*, sendo responsável por determinar a aptidão do veículo para abordar um degrau mais proeminente, em que o veículo deve percorrer terrenos sem colidir com componentes da suspensão ou para-choque. Um bom veículo *off-road* possui ângulo de ataque de no mínimo 30 graus e o máximo irá variar de acordo com a necessidade no projeto de cada veículo.

Figura 3: Ângulo de ataque

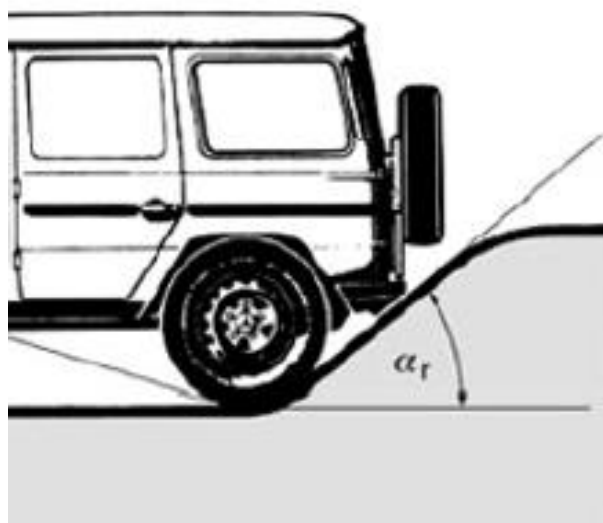


Fonte – Adaptado de Crolla (2009)

2.1.2.3. Ângulo de saída

O ângulo formado pelo o solo e a linha que liga o ponto inferior do pneu ao ponto traseiro máximo do veículo é denominado ângulo de saída. É o ângulo que determina a aptidão do veículo para sair de um obstáculo, sem bater com o para-choque traseiro, pinos de reboque ou estepe no chão. Na Figura 4 está mostrado a indicação do ângulo de saída de um veículo *off-road*, que em média possui uma inclinação mínima 30 graus e máxima de 60 graus (ALVES, 2006).

Figura 4: Ângulo de saída



Fonte – Adaptado de Crolla (2009)

2.1.2.4. Inclinação lateral máxima

A inclinação lateral máxima de um veículo é definida a partir do seu projeto dinâmico, na Figura 5 está ilustrada essa inclinação. Alves (2006), define de modo geral como sendo é inclinação em que o veículo pode se deslocar para frente sem causar capotamento, sendo maior nos casos dos veículos mais largos, e menor nos casos dos veículos mais altos.

Figura 5: Inclinação lateral máxima



Fonte – Adaptado de Alves (2006)

2.1.3. Dinâmica dos veículos *off roads*

A dinâmica veicular estar sempre relacionada a uma área abrangente de estudos de interações, seja em transportes aéreos, terrestres ou náuticos. Para um veículo *off road* não é diferente, sua dinâmica dependerá das interações do condutor com o veículo, sua carga e o terreno à que ele estar sendo submetido (VIEGAS, 2016).

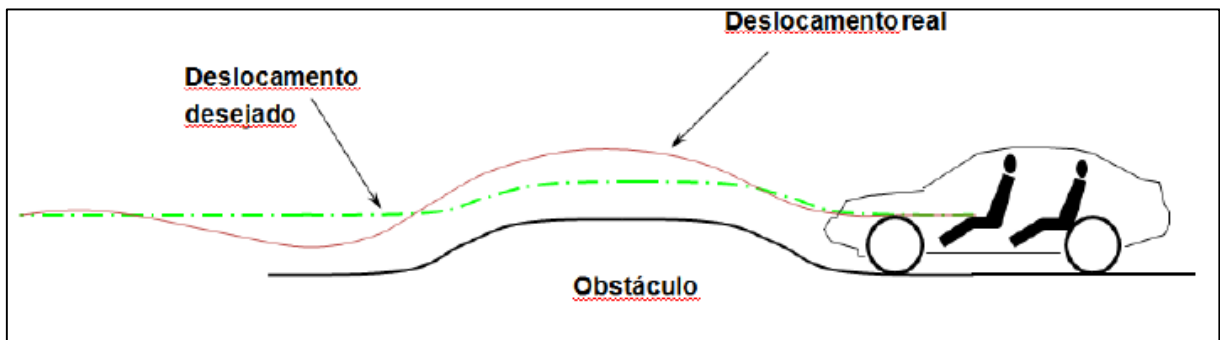
Kaffka (2009) conceitua a dinâmica veicular como sendo o estudo das forças que agem sob um carro em movimento. Levando em consideração todas as influências da dinâmica veicular, Diniz (2014) ressalta que a trajetória de um veículo será resultante da avaliação das cargas na dinâmica lateral, dinâmica vertical e dinâmica longitudinal, tidas como as dinâmicas principais.

2.1.3.1. Dinâmica vertical

Segundo Duarte (2010), a dinâmica vertical está relacionada com o comportamento vibracional do veículo, a excitação do chassi devido ao trabalho da suspensão, essa vibração é

distribuída do chassi para os demais elementos de interface entre o veículo e o condutor. As mudanças de elevação de uma pista que o veículo trafega pode causar a movimentação vertical da carroceria do veículo que é caracterizado como o fenômeno *bounce*, de modo a causar faixas de frequências da movimentação da suspensão. Duarte (2010) faz a comparação do comportamento ideal e o comportamento real de um veículo sobre um obstáculo, mostrado na Figura 6.

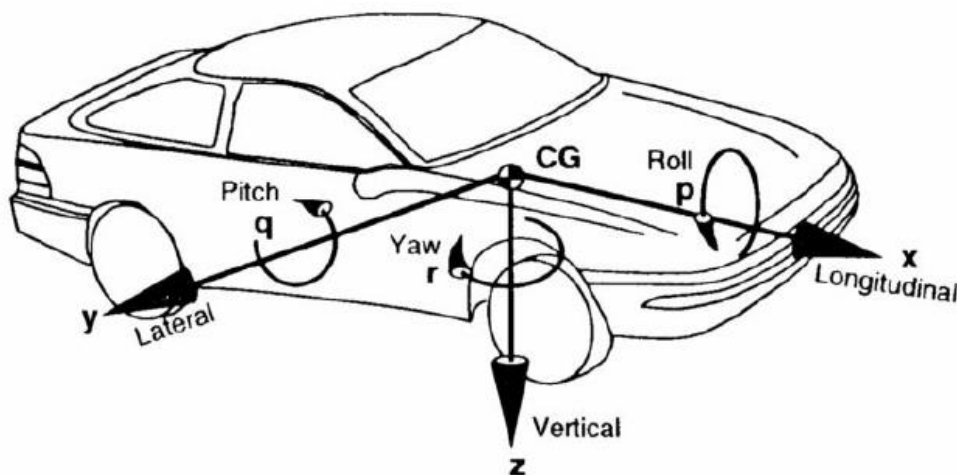
Figura 6: Definição de *bounce*



Fonte – (DUARTE, 2010).

Para Diniz (2012), além do *bounce*, para dinâmica vertical é de grande relevância os movimentos de rotações *pitch* e *roll* de um veículo, que trata-se da rotação do centro de gravidade, em relação ao eixo lateral y (*pitch*) e em relação ao eixo longitudinal x (*roll*), como ilustrado na Figura 7.

Figura 7: Sistemas de coordenadas



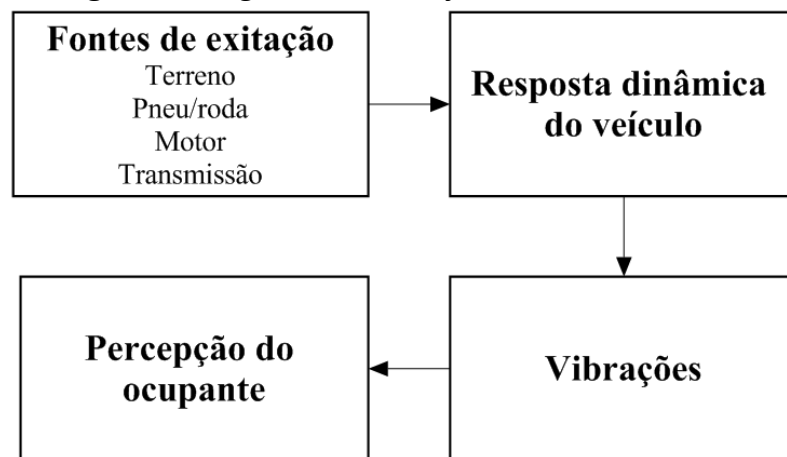
Fonte – (SOARES, 2005)

Freitas (2006) diz que a resposta dinâmica de um veículo está sempre relacionada as amplitudes de saída e de entrada, em função da frequência transmitida. Para Diniz (2014), existem várias fontes de excitação que influenciam resposta da dinâmica vertical de um

veículo, estando entre as principais as pistas que apresentam elevações conhecidas em todo seu comprimento e pistas que apresentam entradas aleatórias, as quais proporcionam amplas faixas de variações das frequências de excitações.

Gillespie (1992) assegura que tanto os componentes que compõem a massa suspensa de um veículo (ex.: chassi, piloto) como os componentes que compõem a massa não suspensa (ex.: conjunto pneu roda) movem-se junto ao trabalho da suspensão acompanhando o espectro da excitação, assim a transferência das cargas nas reações do contato pneu-solo influencia na determinação dos parâmetros de projeto, sendo fundamental a obtenção e estudo da resposta dinâmica de um veículo. A avaliação da dinâmica vertical para Gillespie (1992) é feita desde a fonte de excitação até a percepção do ocupante do veículo, conforme detalhado na Figura 8.

Figura 8: Diagrama da avaliação da dinâmica vertical

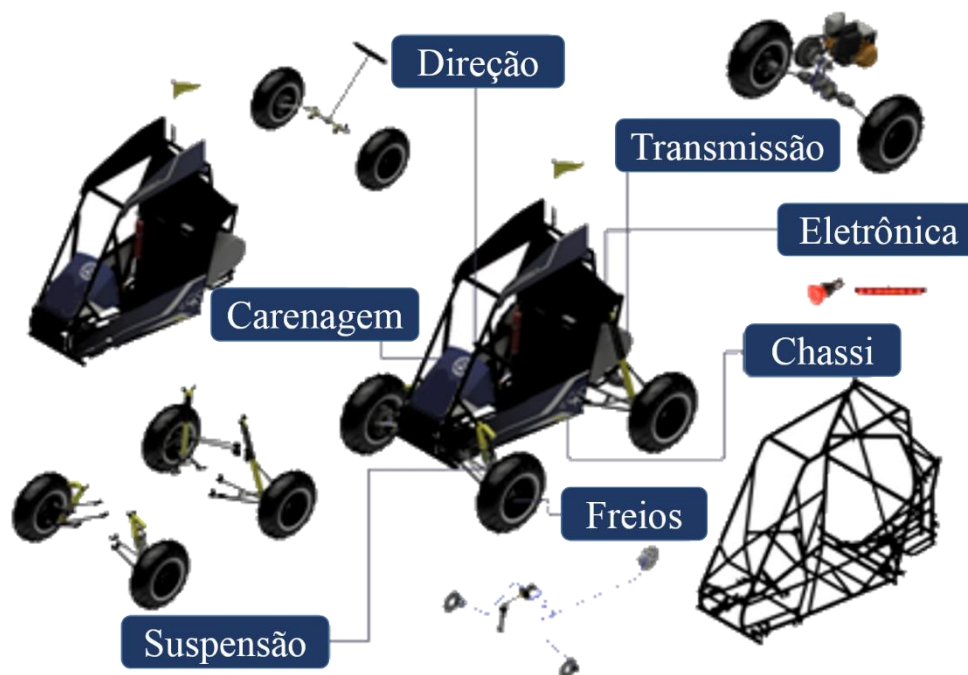


Fonte – Adaptado de Gillespie 1992

2.2. Sistemas de um veículo baja

De acordo com Bornhold (2012), os veículos automotores, dentre eles os veículos *off roads*, tem como intuito transpor vários tipos de terrenos oferecendo segurança ao condutor. Tais veículos são constituídos por sistemas que cumprem funções distintas, com ilustrado na Figura 9, sendo eles: chassi, suspensão, direção, freios, transmissão, carenagem e elétrica. Mas, para tal fim, é necessário o bom funcionamento de todos os sistemas atuando simultaneamente.

Figura 9: Sistemas de um veículo baja



Fonte – Autoria própria

2.2.1. Chassi

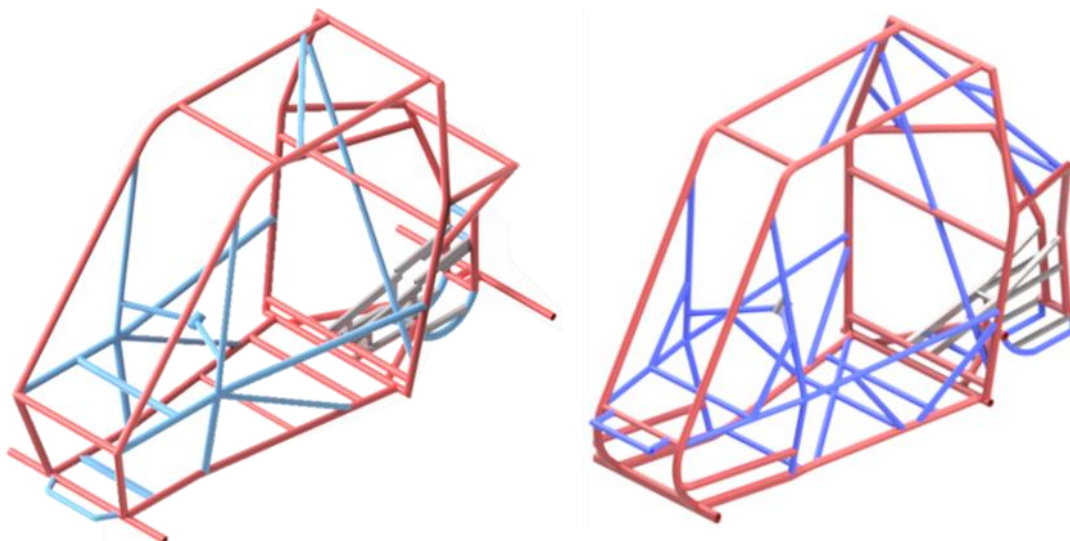
Os veículos baja são conhecidos popularmente como “gaiola”, por possuírem um chassi tubular monoposto. A estrutura de um chassi tem como objetivo principal a utilização mínima de membros estruturais de apoio, os quais devem ser dimensionados de modo a não agregar muito peso ao veículo (KAFFKA, 2009).

Segundo Viegas (2016), o chassi está inserido no grupo dos componentes de massa suspensa de um baja. A importância do bom desenvolvimento tanto do projeto estrutural quanto da fabricação de um chassi é primordial, tendo em vista que todos os outros sistemas do veículo estarão ligados a ele, sendo assim o seu projeto deve ser desenvolvido de modo paralelo ao projeto dos demais sistemas.

Todos os parâmetros de projeto estrutural do baja, devem seguir todas as normas e especificações impostas pela SAE. De acordo com a norma o chassi deve possuir um espaço mínimo ao redor do piloto e deve ser projetado e fabricado de modo a prevenir qualquer falha de sua integridade (SAE BRASIL, 2018).

Segundo Duarte (2010), o chassi tem influência direta no conforto dos ocupantes, além da influência na dinâmica veicular, sendo de grande importância a redução das tensões exercidas sob ele.

Figura 10: Chassis de veículos baja



Fonte – Autoria própria

Na Figura 10 estão mostrados exemplos de chassis, desenvolvidos pela equipe Caraubaja. Os tubos representados em vermelho são os primários, os tubos representados em azul são os secundários. Segundo a norma regulamentadora da SAE Brasil (2018), os tubos primários são os elementos da estrutura (*cockpit*) e os tubos secundários são membros adicionais, ambos divididos em subconjuntos.

2.2.2. Suspensão

Na concepção de Duarte (2017), um bom projeto de suspensão é algo fundamental em um veículo, para um baja não é diferente, por ser um veículo *off-road* exigirá mais de sua suspensão, onde ela estará sempre sujeita a absorver as irregularidades do terreno, com a responsabilidade de propor melhor estabilidade ao automóvel, influenciar a rolagem e tentar deixar ao máximo as quatro rodas em contato com o solo.

O projeto de um sistema de suspensão veicular, de modo relativo, depende da necessidade do veículo, à que ele será submetido. A princípio um bom projeto de suspensão é aquele que possui boa capacidade de isolar vibrações, que garante boa dirigibilidade, estabilidade, segurança e maximiza o tempo do contato pneu-solo. Mas para um bom isolamento de vibração, por exemplo, é necessária uma suspensão mais macia, já um veículo com uma suspensão mais rígida apresenta boa aderência pneu-solo e adequada manobrabilidade (DINIZ, 2014).

Os focos principais dos estudos de dinâmica veicular em relação aos sistemas de suspensão visam a escolha adequada dos parâmetros geométricos e físicos de tais sistemas para que estes possam trabalhar com maior eficiência. Os valores dos parâmetros geométricos exercem influência direta no desempenho de um veículo, sendo, portanto, uma escolha fundamental na fase de desenvolvimento de projeto (REZENDE, 2007).

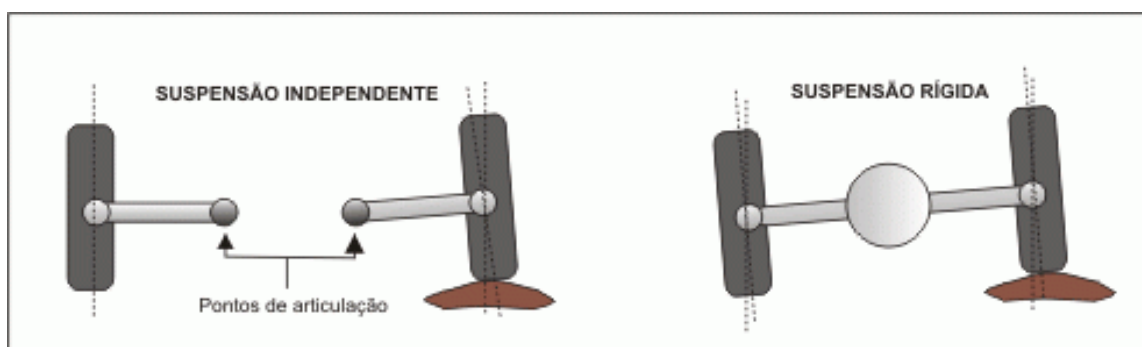
Para Duarte (2017) os principais parâmetros de suspensão veicular necessário para elaboração de um projeto de uma suspensão dianteira do tipo Duplo A, são o ângulo de camber, câster, *toe*, entre eixo e bitola. A mudança do ângulo de ataque influencia na alteração desses parâmetros.

2.2.2.1. Tipos de suspensão

De acordo com Kaffka (2009), usualmente as suspensões usadas nos veículos baixa estão inseridas em um dos seguintes grupos: suspensão com eixo rígido ou suspensão independente.

As suspensões do tipo eixo rígido, as rodas trabalham de forma simultânea, onde o movimento de uma afeta a outra por estarem conectadas entre si. Já as suspensões independentes, permite o movimento de cada roda sem afetar a outra, possui maior controle na geometria sendo muito usual na dianteira dos veículos (BARBIERI, 2009). Na Figura 11 está mostrada a comparação dos dois tipos de suspensão.

Figura 11: Comparação suspensão independente e rígida

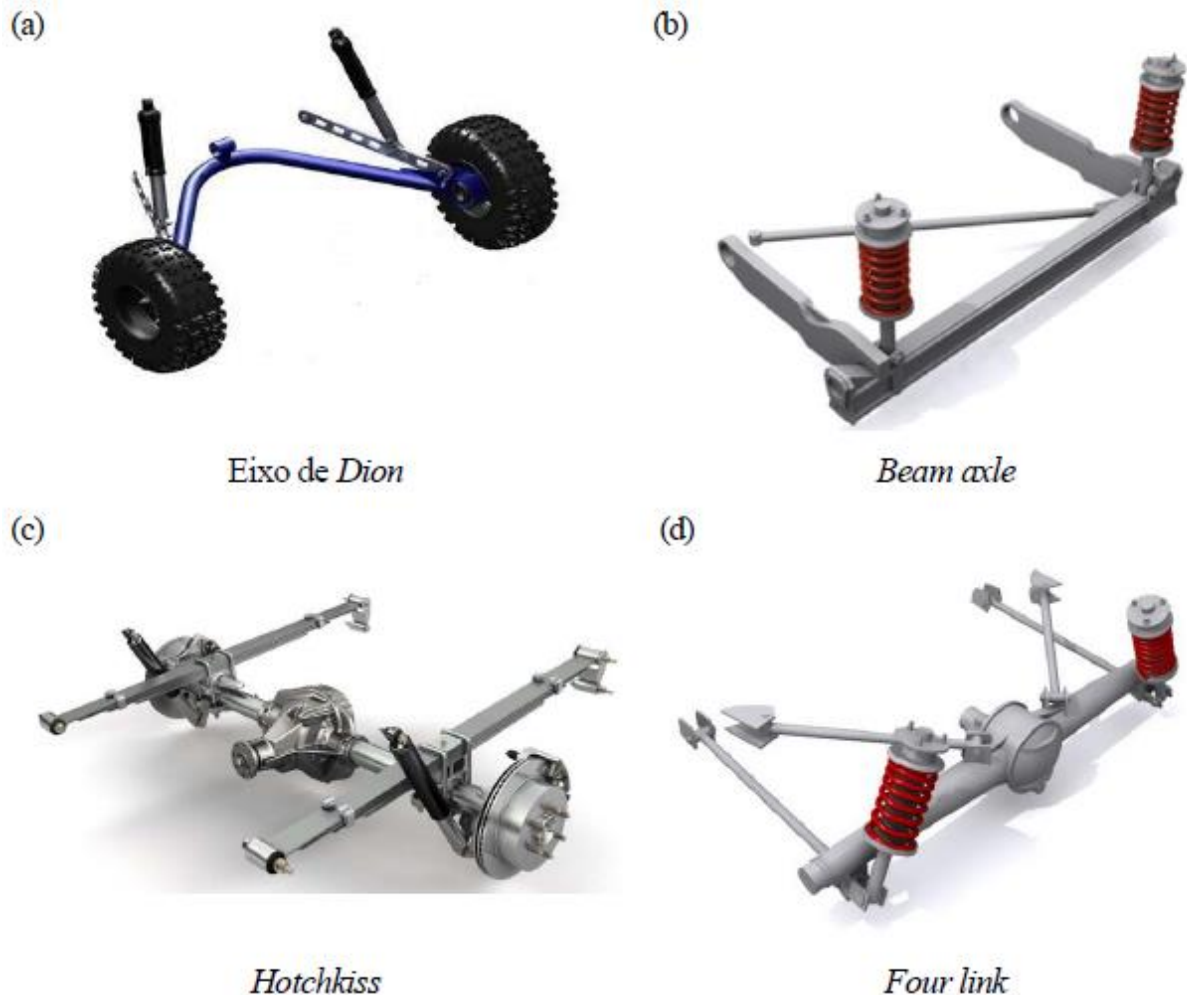


Fonte – (KAFFKA, 2009)

Brito (2013) conceitua as suspensões de eixo rígido, também conhecidas como suspensões dependentes, como sendo qualquer tipo de suspensão que tem suas rodas ligadas diretamente em um único eixo, cada uma delas nas extremidades, quando uma roda passa por um desnível a roda oposta sentirá o mesmo efeito. A vantagem do uso desse tipo de suspensão, segundo Barbieri (2009), é o fato da cambagem das rodas não ser afetada pelo movimento de rolamento do chassi, tem uma das desvantagens a maior ocorrência de

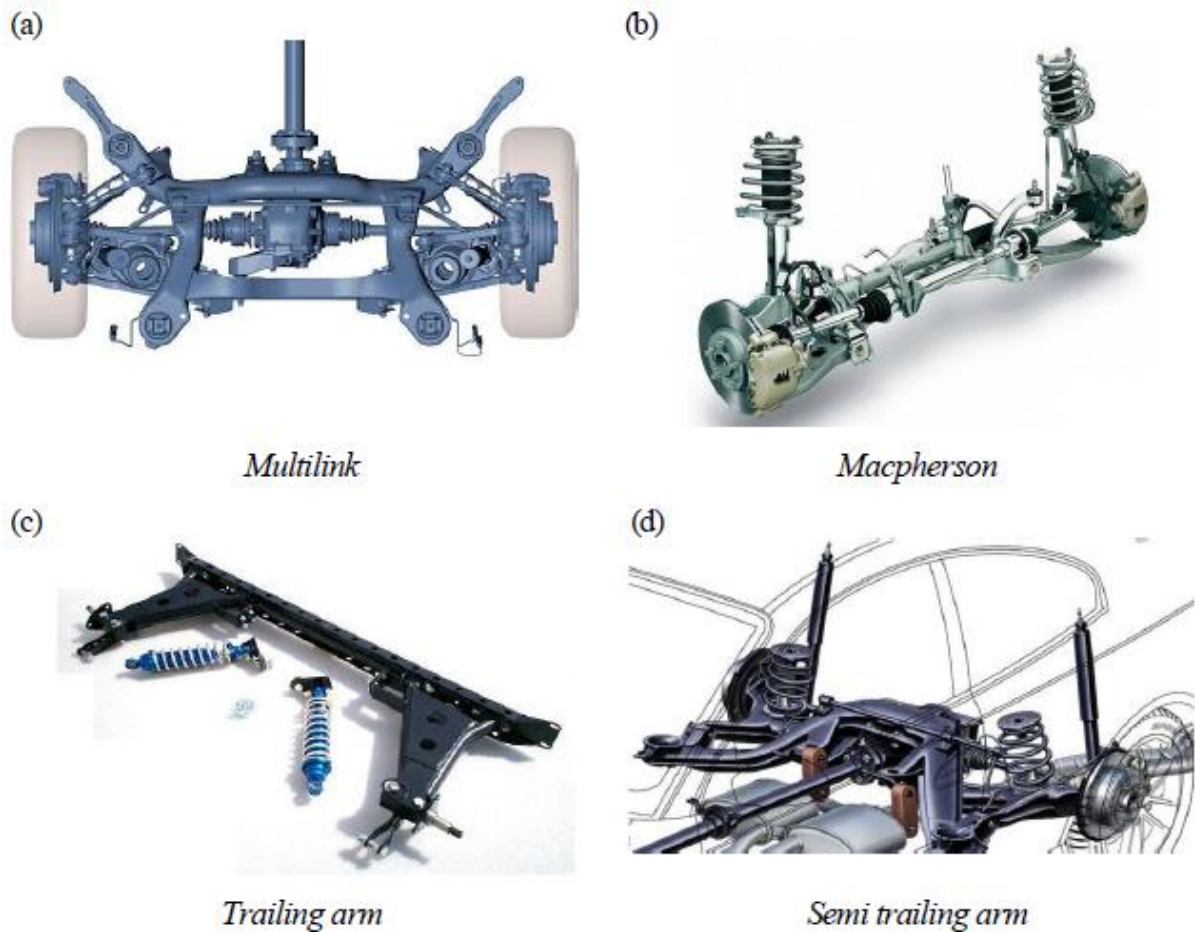
vibrações. Na Figura 12 está mostrado exemplos de suspensões dependentes que são usadas em alguns automotores.

Figura 12: Suspensões dependentes



Fonte – (DINIZ, 2014)

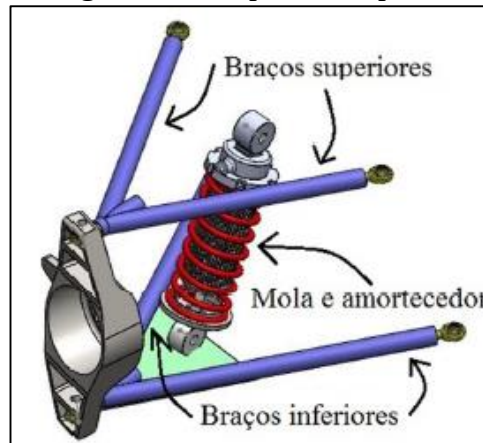
Freitas (2006) conceitua as suspensões independentes através do movimento vertical de uma roda não interferir no movimento da roda oposta no mesmo eixo, o que promove bom comportamento na rigidez à rolagem e rigidez vertical. Barbieri (2009) cita como vantagens no uso desse tipo de suspensão, a disposição de um maior espaço de trabalho, dando espaço para a colação do motor por exemplo, além de permitir um maior controle dos parâmetros da geometria e ter uma menor ocorrência de vibrações. Na Figura 13 está mostrado exemplos de suspensões independentes que são usadas em alguns automotores.

Figura 13: Suspensões independentes

Fonte – (DINIZ, 2014)

2.2.2.1.1. Suspensão duplo A

A suspensão do tipo duplo A, é também conhecida como suspensão SLA (*Short Long Arm*) ou *Double Wishbone*, mostrada na Figura 14, é uma suspensão independente. Possui dois braços de controles transversais, um inferior e outro superior, que realiza conexões com o chassi e com manga de eixo, tem a finalidade suportar a fixação dos amortecedores, o qual absorve as vibrações vindas do solo (BARBIERI, 2009).

Figura 14: Suspensão dupla A

Fonte – Adaptado de Menezes (SD)

Almeida (2012) lista as vantagens e desvantagens do uso desse tipo de suspensão. Vantagens: Controle mais preciso de ângulo de camber, pequena variação de bitola ao longo do curso, pouca vibração transmitida à estrutura do veículo, elementos resistentes, curso útil alongado e possibilidade de configuração sobre-esterçante ou sobesterçante. Desvantagens: Necessidade de muito espaço para instalação, custo elevado em comparação com os demais sistemas, redundância de elementos de ligação e a necessidade de um dimensionamento criterioso para o correto funcionamento.

Segundo Rezende (2007), o sistema de suspensão duplo A é o mais usado nos veículos de competições *off roads*, por ter características que possibilitam obter o máximo de desempenho dos pneus e consequentemente do veículo. Como pode ser observado na Figura 15, do protótipo SEVERO18/19 desenvolvido pela equipe Caraubaja, mostra que o movimento de um pneu não afeta o desempenho do outro, por ser um sistema independente, mantendo assim maior estabilidade do chassi.

Figura 15: Desempenho de suspensão duplo A

Fonte – Autoria própria

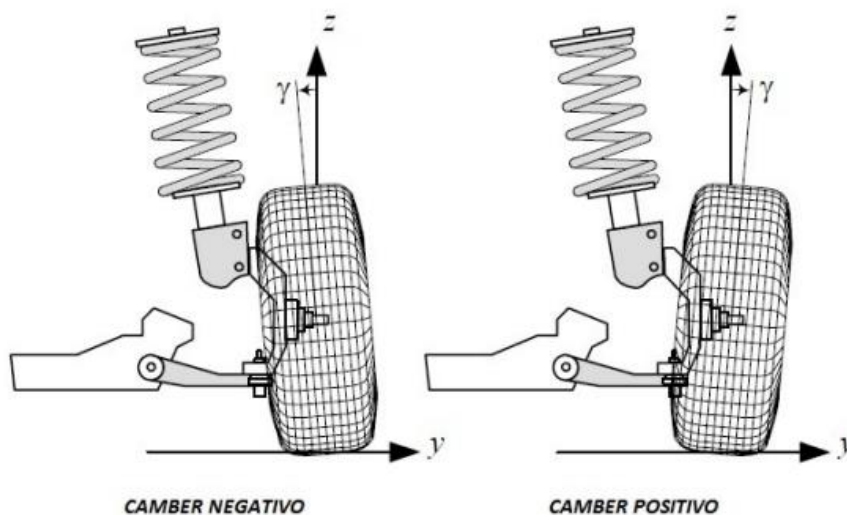
2.2.2.2. Parâmetros de suspensão veicular

Na concepção de Duarte (2017), para um projeto detalhado de uma suspensão dianteira do tipo duplo A, é de fundamental importância o conhecimento dos parâmetros de suspensão, pois interferem diretamente na dinâmica do veículo. Para isso, é considerada a relevância dos seguintes parâmetros: Ângulo de câmbor, caster e *toe*.

- **Ângulo de camber:**

Um dos parâmetros geométricos do sistema de suspensão é o ângulo de câmbor, Rezende (2007), diz que corresponde ao ângulo formado pela linha perpendicular ao solo e plano vertical que passa pelo centro do pneu, isso em relação à vista frontal do veículo. Assim quando o plano vertical das rodas formas exatamente um ângulo de 90° em relação ao solo, tem-se um ângulo de câmbor igual a 0° . A cambagem negativa de um veículo, ou câmbor negativo, é quando as rodas estão inclinadas com suas extremidades superiores apontando para dentro, quando apontam para fora é dito câmbor positivo. Essas situações podem ser observadas na Figura 16, onde o ângulo é representado por " γ ".

Figura 16: Ângulo de câmbor



Fonte – (JAZAR, 2008)

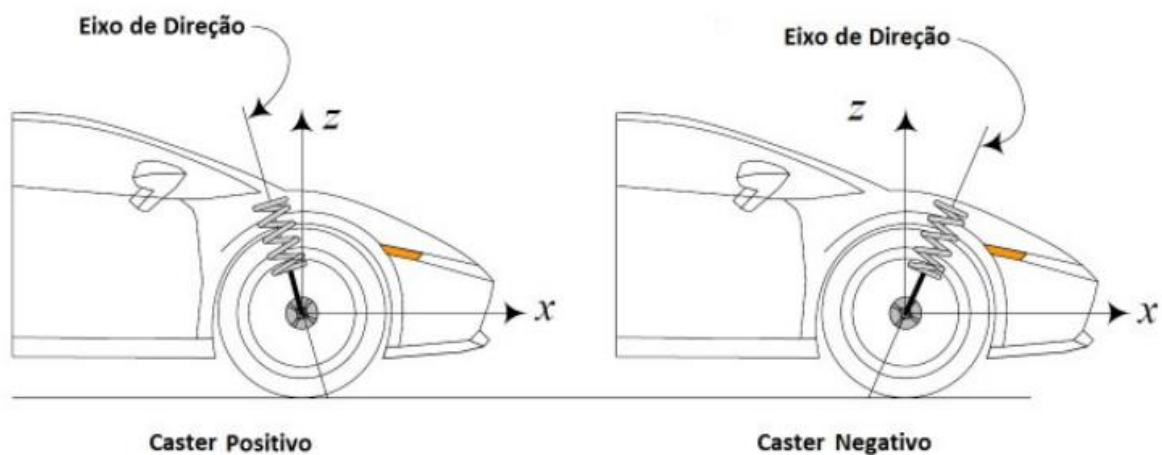
O ângulo de câmbor tem relevante importância, principalmente no desempenho de frenagens e acelerações do veículo, para isto quando o veículo estiver percorrendo trajetórias retas, é importante manter a maior área da banda de rodagem do pneu em contato como solo. Além disto, o desgaste da banda de rolagem do pneu ocorre de forma uniforme para um

veículo que possui câmbor 0° , se o mesmo estiver muito acentuado poderá ocorrer desgaste prematuro do pneu (KAFFKA, 2009).

- **Ângulo de caster:**

Outro parâmetro geométrico de suma importância para o sistema de suspensão, é o ângulo de caster, Diniz (2014) conceitua-o, na vista lateral, como sendo o ângulo formado pelo eixo vertical do veículo e uma linha imaginária que liga os pontos de articulação das bandejas superior e inferior, também conhecido como eixo do pino mestre. Conforme mostrado na Figura 17, esse ângulo é negativo quando a parte superior do eixo do pino mestre, mencionado como eixo de direção, está inclinada para a parte frontal do veículo, caso contrário, é tido como positivo.

Figura 17: Ângulo de caster



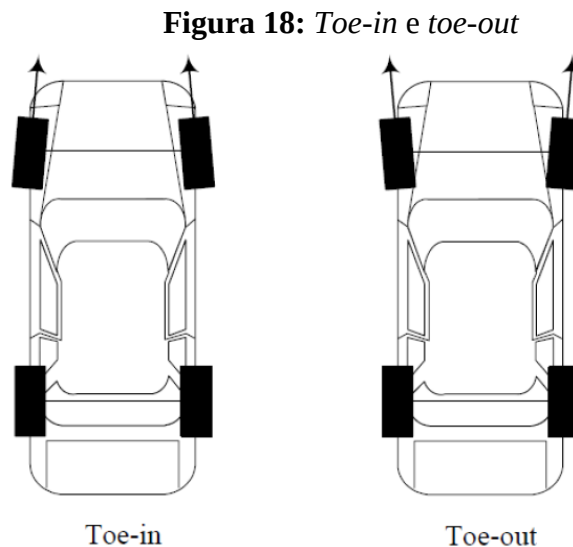
Fonte – (JAZAR, 2008)

De acordo com Ribeiro (2012), o caster, assim como o câmbor, também pode variar de acordo com a necessidade do projeto do veículo, o que afetará na movimentação da suspensão. O caster zero proporciona melhor dirigibilidade, o volante fica mais leve para manobras, porém não ajudar a centralizar o veículo após uma curva, prejudicando a estabilidade em linha reta.

- **Ângulo de toe:**

Para Jazar (2008), a influência do desempenho do pneu e estabilidade do veículo em linha reta, estar relacionado a alteração do ângulo *toe*, o qual dependendo da sua configuração facilitará ou não na entrada de um veículo em uma curva. O ângulo *toe* consiste na medição de paralelismo de um par de rodas, comparadas durante o movimento do veículo.

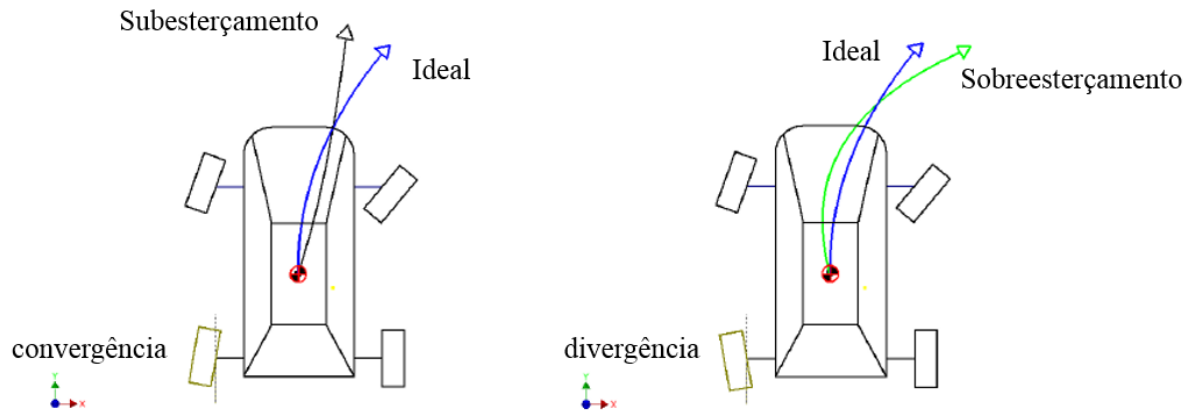
Diniz (2014) explica que quando o par de rodas são configurados de maneira que suas bordas de ataque estejam apontadas de uma para a outra, chama-se *toe-in*, nessa configuração pode-se dizer que as rodas convergem. De maneira inversa, quando as bordas de ataque um par de rodas estão direcionadas em sentidos contrários, leva o nome de *toe-out*, nessa configuração as rodas divergem. Na Figura 18 está ilustrado a diferença das rodas convergindo (*toe-in*) e divergindo (*toe-out*).



Fonte – (JAZAR, 2008)

Essa variação de convergência pode ser também utilizada no eixo traseiro, pois segundo Diniz (2012), a partir da variação de ângulos *toe-in* e *toe-out* é possível variar o arrasto lateral dos pneus e perda de estabilidade, deixando o veículo com características sobterçantes, na qual as rodas dianteiras escorregam lateralmente e percorrem um percurso maior do que as rodas traseira, ou sobre-esterçante, que o escorregamento acontece com as rodas traseiras para o lado de fora das curvas diminuindo o raio da curva. Sob tudo para veículos de competições *off-roads* é preferível um veículo com característica sobreesterçante, para isso é necessário uma certa variação *toe-out* (divergência), da roda traseira externa a curva. Esta configuração do comportamento, conforme a variação de convergência e divergência da roda traseira externa a curva, é mostrado na Figura 19.

Figura 19: Comportamento sobre/subesterçante conforme variação da roda traseira



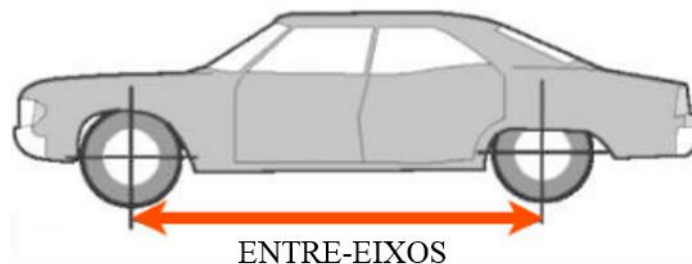
Fonte – Adaptado de Diniz (2012)

- **Entre eixo e Bitola:**

Duarte (2017) ressalta a importância de alguns outros conceitos, além dos conceitos dos parâmetros mencionados anteriormente. Para projetar uma suspensão, pode-se citar como parâmetros, definidos geralmente no início de projeto, o entre eixo e a bitola.

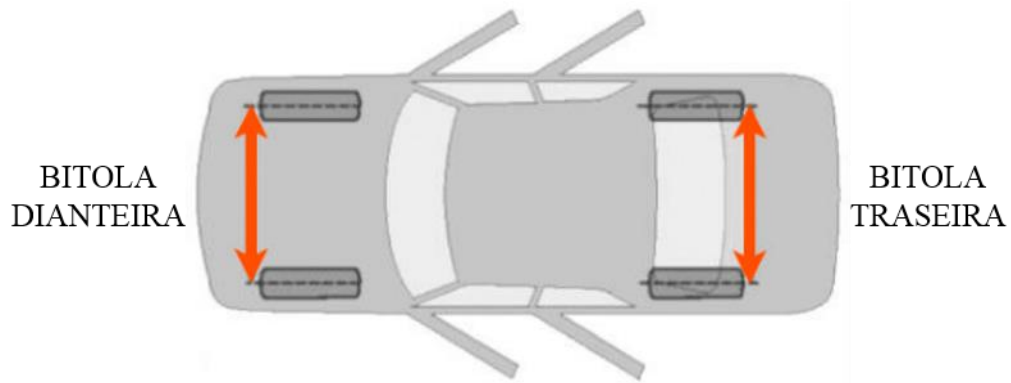
Segundo Viegas (2016), o entre eixo é distância medida entre o eixo das rodas dianteiras e o eixo das rodas traseiras, é um parâmetro que interfere principalmente no tamanho e na dirigibilidade do veículo. Na Figura 20 está mostrada a distância entre eixos de um veículo.

Figura 20: Entre eixo



Fonte – Adaptado de Duarte (2017)

Segundo Almeida (2012), a bitola de um veículo consiste na distância entre o centro da banda de rodagem de pneus do mesmo eixo, logo a bitola dianteira de um veículo pode diferir da bitola traseira. Quanto maior a bitola de um veículo, maior será o seu raio de giro em uma curva, porém é mais estável, principalmente em curvas e em altas velocidades. Na Figura 21 está mostrada a distância da bitola de um veículo.

Figura 21: Bitola

Fonte – Adaptado de Duarte (2017)

2.2.2.3. Parâmetros para o movimento da suspensão

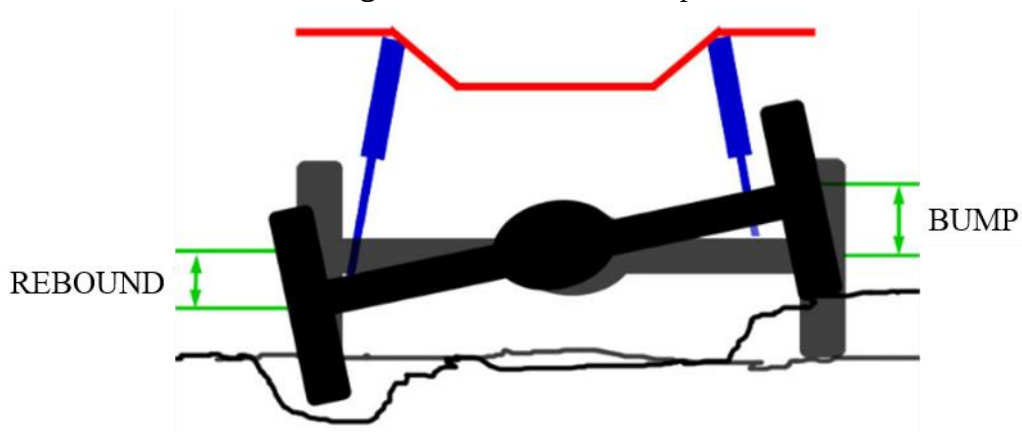
Para o estudo do movimento de uma suspensão, é necessário compreender os seus parâmetros de movimento (DUARTE, 2017).

- **Rebound travel e Bump travel:**

Conforme Almeida (2012), o curso máximo inferior da suspensão é nomeado como *rebound travel*, ou seja, é o deslocamento descendente máximo da roda em relação ao veículo.

Bump travel, também chamado *jounce*, segundo Diniz (2014), é o deslocamento ascendente máximo da roda em relação ao veículo, ou seja, curso máximo superior.

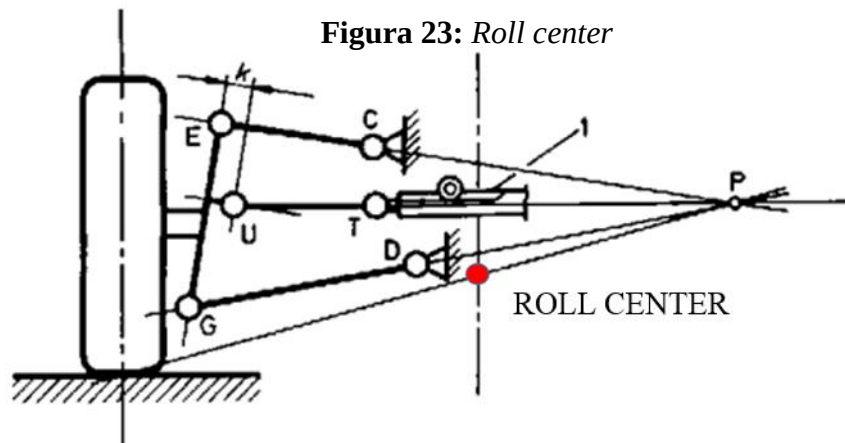
Segundo Vargas (2011), a massa suspensa de um sistema varia em relação a condição estática, onde aumenta com o movimento de *rebound* e diminuir com movimento de *bump*. Na Figura 22 pode-se observar ambos movimentos.

Figura 22: Rebound e bump

Fonte – Adaptado de Duarte (2017)

- **Roll center e Roll axis:**

O *roll center* ou centro de rolagem (Figura 23), segundo Jazar (2008), é definido como o ponto de rolagem do corpo do veículo, sendo um ponto instantâneo que pode variar com o movimento da suspensão. Em todo veículo existe dois centros de rolagem, o um na dianteira e outro da traseira.



Fonte – Adaptado de Crolla (2009)

Na Figura 23, está ilustrado como determinar o ponto do *roll center*, o ponto P, é o CI (centro instantâneo de rolagem), intersecção do prolongamento dos links da suspensão EC e GD, e o link da direção UT. O roll center é o ponto que intersecta a linha vertical central do veículo e a linha transada do ponto CI para o ponto inferior central do pneu.

Bravo (2013) confirma que os centros de rolagem da traseira e da dianteira são independentes, complementa dizendo que o eixo que liga os dois centros de rolagem denominado *roll axis*. No que diz respeito à altura do centro de rolagem ao chão e ao CG (centro de gravidade) do veículo, influencia fortemente na transferência de carga e consequentemente no comportamento dinâmico.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar todos os objetivos do trabalho, a metodologia empregada contempla as seguintes etapas: resultados práticos e simulações computacionais, como mostradas na Figura 24.

Figura 24: Fluxograma com etapas das atividades



Fonte – Autoria própria

A metodologia utilizada para o presente trabalho foi comparativa, onde foram estudados os projetos dos veículos CT17/18 e SEVERO18/19, com intuito de verificar o quão é influente a variação do ângulo de ataque na resposta dinâmica do veículo. Logo, a metodologia empregada consistiu em realizar a coleta dos resultados das competições dos dois protótipos em estudo e correlacionar esses resultados com as modificações feitas no ângulo de ataque do último protótipo. Para tanto, lançou-se mão dos recursos de simulação, de modo que fosse possível estabelecer relação entre o resultado nas provas e as alterações feitas na suspensão. No ambiente computacional foram feitas análises estáticas e dinâmicas, nos softwares Inventor e ADAMS Car, possibilitando a análise de alguns parâmetros, através destas simulações foram quantificadas essas melhorias dinâmicas.

Os objetos de estudo utilizados no trabalho são veículos desenvolvidos pela equipe Caraubaja, mostrados na Figura 25.

Figura 25: Objetos de estudo

(a) CT17/18



(b) SEVERO18/19



Fonte – (a) e (b) Autoria própria

3.1. Resultados nas últimas competições

Os resultados foram obtidos a partir das competições: 12º Competição Baja SAE Regional – Etapa Nordeste 2017, 24º Competição Baja SAE Brasil – Etapa Nacional 2018, 13º Competição Baja SAE Regional – Etapa Nordeste 2018 e 25º Competição Baja SAE Brasil – Etapa Nacional 2019. Analisando especificamente as pontuações das provas de enduro de resistência das competições regionais, e pontuações das provas de suspensão das competições nacionais, foram listados os respectivos ângulos de ataque dos protótipos.

Para análise das pontuações, foram calculadas percentagens dos resultados das provas dinâmicas analisadas. Para a prova de enduro de resistência, por regimento da competição, é definido que a equipe que atingir o maior número de voltas terá pontuação máxima, neste caso 300 pontos, e a partir disso é feito o cálculo da pontuação das demais equipes. A percentagem da prova de enduro de resistência, das competições regionais, foram calculadas levando em consideração a pontuação atingida, com relação ao cálculo da pontuação máxima da prova de enduro, o qual é definido no regulamento que rege as competições, através da seguinte equação:

$$Pontuação_{Enduro} = Pontuação_{Máxima} \cdot \frac{N_{Equipe} - N_{Pior}}{N_{Melhor} - N_{Pior}} \quad (1)$$

Onde:

- N_{Pior} é o menor número de voltas completadas entre as equipes que participaram do enduro.
- N_{Melhor} é o número de voltas da equipe vencedora do enduro.
- N_{Equipe} é o número de voltas da equipe para a qual o cálculo é feito.

Com relação a prova de suspensão das competições nacionais, foram levantados dados da quantidade de equipes participantes na competição em que a equipe Caraubaja obteve melhores resultados. Para a prova de suspensão, por regimento da competição, é definido que a equipe que conseguir concluir o circuito no menor tempo terá pontuação máxima, neste caso 70 pontos, e a partir disso é feito o cálculo da pontuação das demais equipes levando em consideração o tempo de conclusão de cada uma. Assim, foi calculado a percentagem do resultado na prova de suspensão em cada uma das competições, levando em consideração a pontuação da prova de suspensão, assim como é definido no regulamento o cálculo da pontuação do enduro, é definido o cálculo da pontuação da prova de suspensão, através da seguinte equação:

$$Pontuação_{Suspensão} = Pontuação_{Máxima} \cdot \frac{T_{Pior} - T_{Equipe}}{T_{Pior} - T_{Melhor}} \quad (2)$$

Onde:

- T_{Pior} é o menor valor entre $(2,5 \cdot T_{Melhor})$ e o menor tempo da equipe com resultado mais lento.
- T_{Melhor} é o menor tempo da equipe com o resultado mais rápido.
- T_{Equipe} é o menor tempo da equipe para a qual o cálculo é feito.

3.2. Simulações computacionais

Como mostrado no fluxograma da Figura 24, esta etapa foi desenvolvida em dois softwares: Inventor e ADAMS Car.

3.2.1. Inventor

No software Autodesk Inventor, foram modelados ambos os veículos (CT17/18 e SEVERO18/19), em escala real. Foram necessários os parâmetros de projeto já predestinados pela equipe Caraubaja, com isso todas as peças que compõe os veículos foram modeladas separadamente, para que posteriormente fosse realizada a montagem de cada sistema, e por fim a montagem final. Na Figura 26 está exemplificada modelagens 3D do sistema de suspensão com todos seus itens modelados e montados.

Figura 26: Modelagem dos itens de suspensão do veículo SEVERO18/19



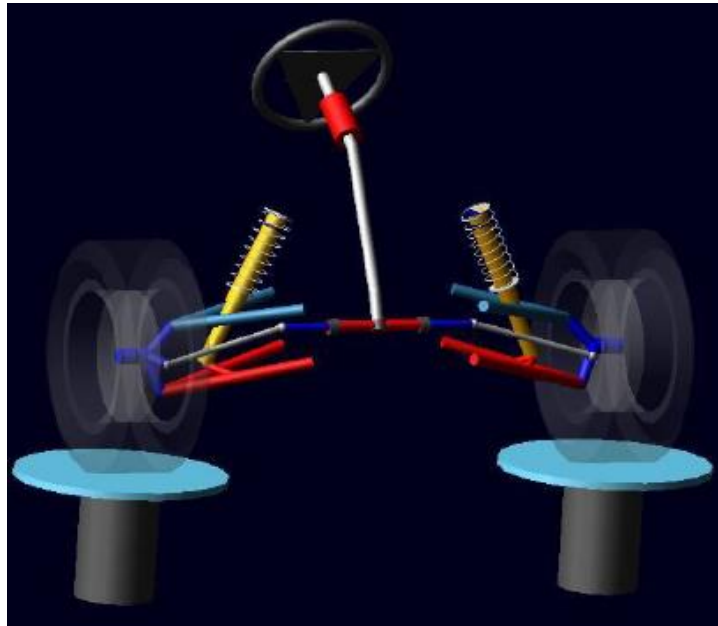
Fonte – Autoria própria

Com os veículos modelados, foram geradas fotometrias para conferir o ângulo de ataque dos veículos. Além dos veículos modelados no software, foi feita a representação de um obstáculo, com altura de 350 mm. Foram geradas renderizações, nas quais os veículos foram postos frente ao mesmo obstáculo, nas mesmas condições, para melhor visualização das imagens foi retirada a visibilidade de toda a suspensão dianteira. Com isso, foi realizada a análise comparativa e quantitativa, medindo a distância do ponto dianteiro inferior do chassi para o ponto de altura máxima do obstáculo, analisando a capacidade de transpor obstáculos com relação a mudança do ângulo de ataque.

3.2.2. ADAMS Car

Com base nos modelos de suspensão desenvolvidos dos dois veículos implementados no software Inventor, foram postos nas mesmas condições no software ADAMS. Primeiramente foi selecionado o modelo da suspensão, identificando as coordenadas dos pontos necessários. Posteriormente foram alimentadas outras informações de projeto dos veículos, com abordagem sob os amortecedores, pneus, rodas, buchas, componentes de direção, manga de eixo, entre eixo e massa de suspensão total, para assim conseguir simular os veículos de maneira próximo à realidade. De acordo com o que é alimentado no software, é fornecido um modelo 3D, como mostrado na Figura 27 de modo mais próximo do real, o qual realiza o movimento da suspensão de acordo com as simulações. Vale ressaltar que ambos veículos foram postos nas mesmas condições, com alteração dos pontos de suspensão, decorrentes da alteração do ângulo de ataque.

Figura 27: Sistemas de suspensão e direção do ADAMS Car



Fonte – Autoria própria

Por fim, simulou-se o movimento das suspensões de modo *parallel travel* ou paralelo, ou seja, com ambos os lados trabalhando em sincronia. As simulações foram feitas com o intuito de obter resultados de variações relevantes de alguns parâmetros, quando comparado os dois veículos, provenientes da mudança do ângulo de ataque (caster, camber, *roll center* e deslocamento longitudinal da roda).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No Quadro 1 estão mostrados resultados obtidos em competições regionais, apresentando os respectivos veículos e percentagem da pontuação da prova de enduro de resistência, a qual é comum à todas as competições.

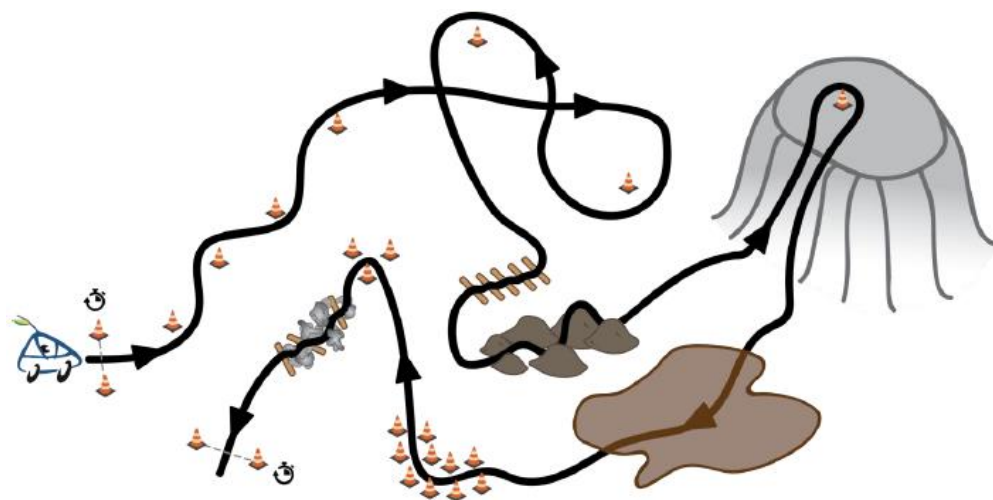
Quadro 1: Resultados da prova de enduro em competições regionais

COMPETIÇÃO	VEÍCULO	PONTUAÇÃO DO ENDURO DE RESISTÊNCIA
12º Competição Baja SAE Regional – Etapa Nordeste 2017	CT17-18	29,87%
13º Competição Baja SAE Regional – Etapa Nordeste 2018	SEVERO	50%

Fonte – Autoria própria

Comparando os resultados das competições regionais, é notório que o protótipo SEVERO18/19 apresentou melhores percentagens de conclusão da prova de enduro de resistência, que é a prova dinâmica que possui maior pontuação e que exige maior esforço do veículo. Esses resultados refletem a influência da melhoria dinâmica do projeto de um veículo para o outro, pois o protótipo mais atual conseguiu realizar mais voltas no circuito sem que houvesse problemas. Com base nesses resultados apenas, não é possível concluir que o sucesso se deve a alterações na suspensão ou ângulo de ataque.

Por isso, além dos resultados nas provas de enduro, é relevante analisar os resultados nas provas de suspensão. Nas competições nacionais os veículos são submetidos a um circuito exclusivo de suspensão, ilustrado na Figura 28, apresentando vários obstáculos, no Quadro 2 estão mostrados os resultados obtidos.

Figura 28: Desenho ilustrativo do evento de Suspensão

Fonte – www.portal.saebrasil.org.br. Acesso em: 09 mar. 2019

Quadro 2: Resultados da prova de suspensão das competições nacionais

COMPETIÇÃO	VEÍCULO	PONTUAÇÃO DA PROVA DE SUSPENSÃO
24º Competição Baja SAE Brasil – Etapa Nacional 2018	CT17/18	0%
25º Competição Baja SAE Brasil – Etapa Nacional 2019	SEVERO18/19	95,78%

Fonte – Autoria própria

Foi na 24º Competição Baja SAE Brasil – Etapa Nacional 2018, que o protótipo CT17/18 não conseguiu concluir o circuito de suspensão por ficar preso em um dos obstáculos. Já o protótipo SEVERO18/19, no ano de 2019 concluiu com sucesso o circuito de suspensão, evidenciando a melhoria na superação de obstáculos.

O bom resultado da pontuação da prova de suspensão na 25º Competição Baja SAE Brasil, também é evidenciado nos resultados da colocação da equipe Caraubaja. De acordo com o Baja online (2019), houve a participação de 86 equipes na Etapa Nacional 2019, destas, 10 equipes conseguiram concluir o circuito de suspensão, entre elas a equipe Caraubaja obtendo a 4ª colocação. Além da melhoria apresentada na superação de obstáculos, a porcentagem da pontuação atingida reflete um bom projeto de suspensão e uma boa

desenvoltura do veículo como um todo, por concluir o circuito em menor tempo do que os demais veículos que assumiram colocações inferiores.

Com a modelagem dos dois veículos no software Inventor, foi possível analisar diferenças estáticas. Na Figura 29 está mostrada a modelagem do veículo CT17/18, enquanto na Figura 30 está mostrada a modelagem do veículo SEVERO18/19.

Figura 29: Modelagem do veículo CT17/18

(a) Suspensão

(b) Veículo completo



Fonte – (a) e (b) Autoria própria

Figura 30: Modelagem do veículo SEVERO18/19

(a) Suspensão

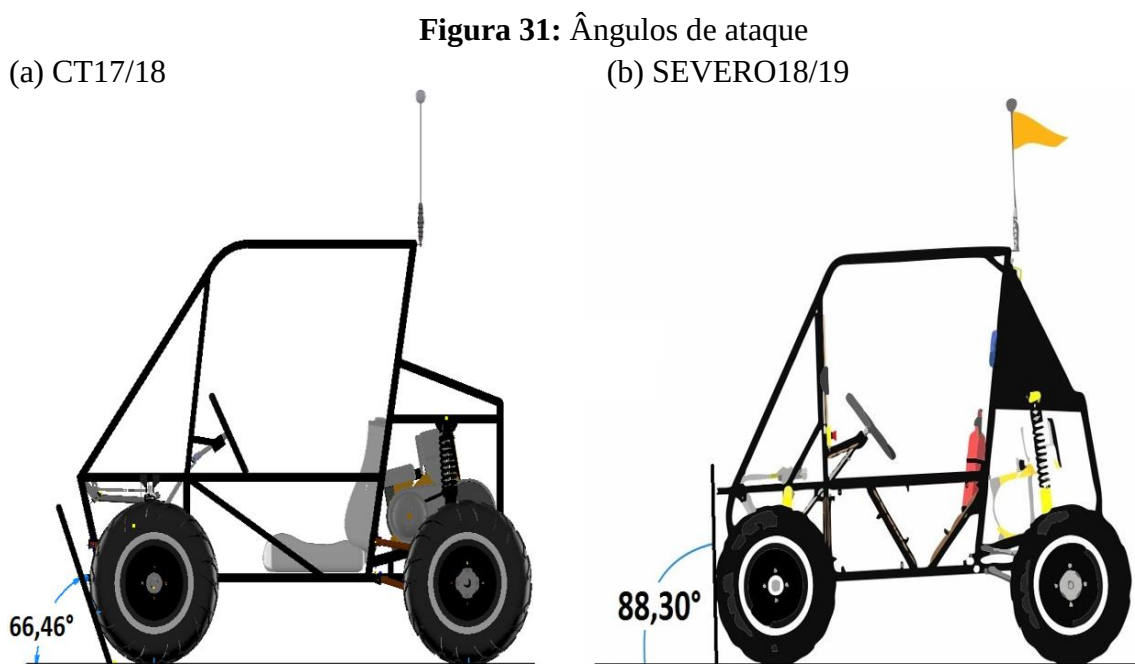
(b) Veículo completo



Fonte – (a) e (b) Autoria própria

Na Figura 10 também está mostrada a modelagem feita no Inventor de um dos sistemas dos protótipos, o chassi. Através dessas modelagens foram feitas algumas

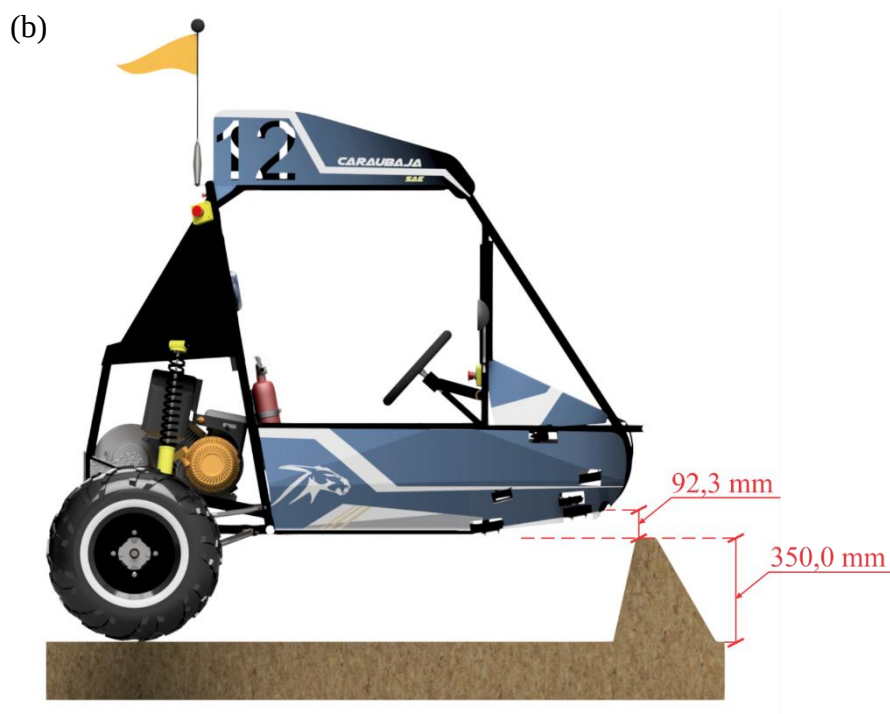
renderizações, como mostrado na fotometria na Figura 31, onde é possível conferir os ângulos de ataques de ambos os veículos.



Fonte – (a) e (b) Autoria própria.

Com a alteração do projeto foi possível observar ambos os veículos submetidos a uma mesma situação. Na Figura 32 estão mostradas renderizações feitas no Inventor com os veículos frentes a um mesmo obstáculo, considerando uma linha de origem horizontal passando pelo ponto mais alto do obstáculo, é possível perceber se o ponto mais baixo do chassi está positivo ou negativo em relação a linha de origem. Figura 33 – (a) CT17/18, (b) SEVERO18/19.





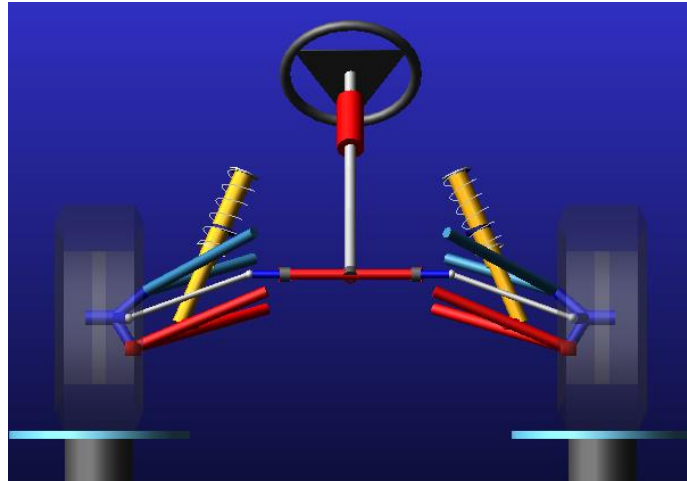
Fonte – (a) e (b) Autoria própria

Foi possível analisar, através da Figura 32, a distância do ponto inferior do chassi para o ponto superior do obstáculo, o que apresenta de 350 mm de altura, percebe-se que há uma diferença de 142,3 mm do ponto inferior de um veículo em comparação com o outro. O modo como o ângulo de ataque foi acrescido, com inclinação do chassi e inclinação da suspensão, resultou em melhoria na superação de obstáculos, evitando que o chassi colidisse com os mesmos.

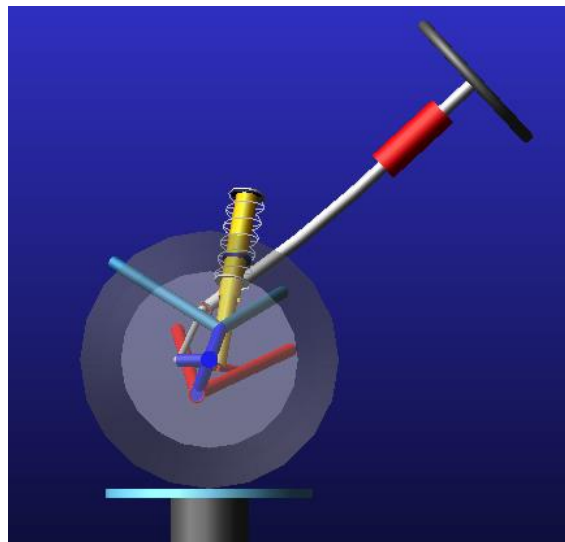
No ADAMS Car foram realizadas simulações das suspensões dos dois veículos com todos os parâmetros de projetos colocados no software, o sistema de suspensão juntamente com o de direção apresentou-se em 3D, como está mostrado a Figura 33, onde é possível observar a inclinação dos componentes da suspensão do protótipo SEVERO. Figura 33 – (a) Frontal, (b) Lateral esquerda.

Figura 33: Simulação do sistema de suspensão do veículo SEVERO

(a)

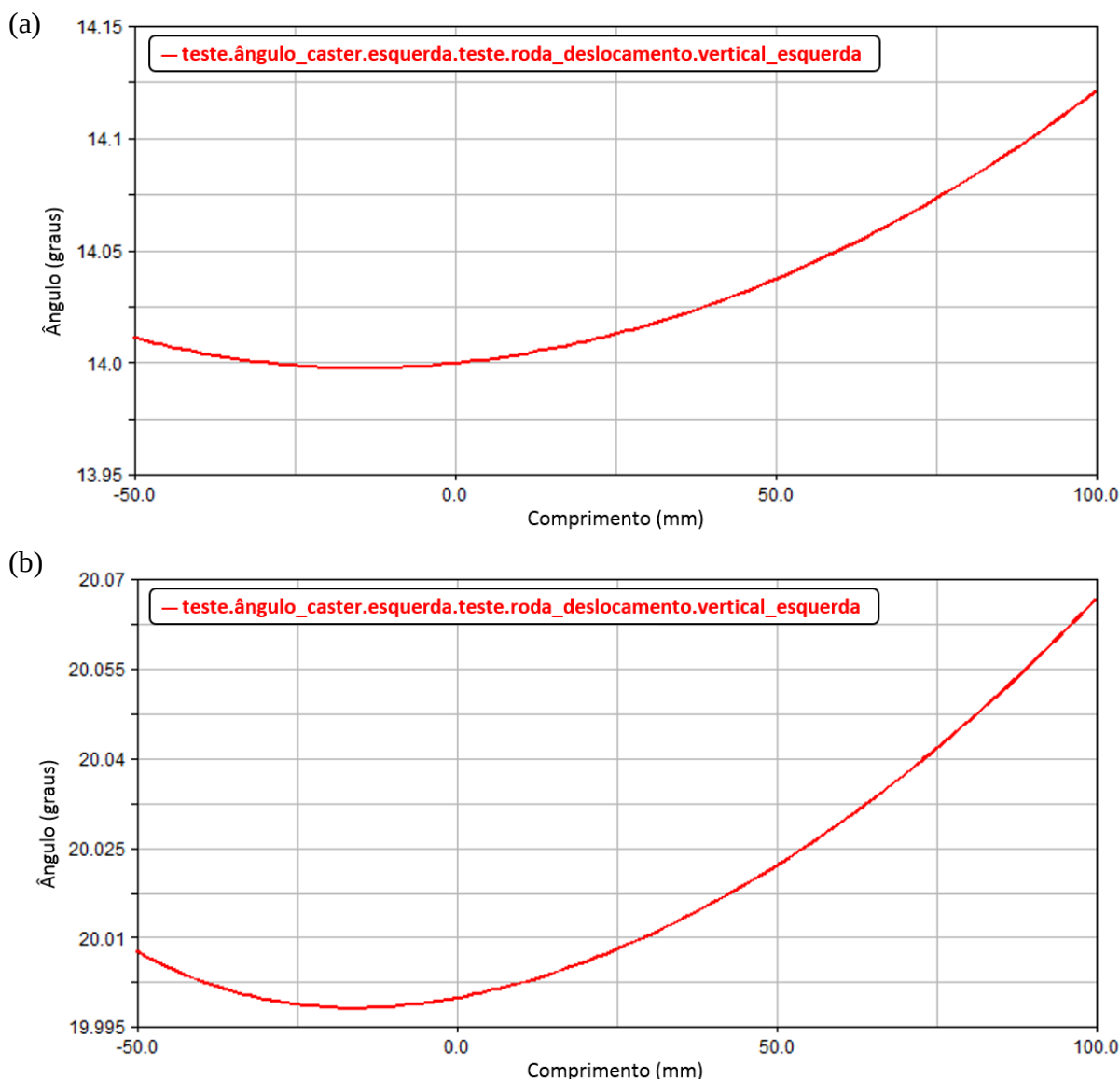


(b)



Fonte – (a) e (b) Autoria própria

Com a suspensão de cada veículo projetada e simulada separadamente no software Adams Car, na condição de simulação *parallel travel* com *bump travel* de +100 mm e *rebound travel* de -50 mm, possuindo comprimento do curso de suspensão de 150 mm em ambos projetos. Foram gerados gráficos dos parâmetros de ângulo de caster, camber, *roll center* e do deslocamento longitudinal, os quais apresentaram alteração relevante pós a mudança do ângulo de ataque. Através da geração de gráficos, é mostrado o comparativo de cada um desses parâmetros, no Gráfico 1 está mostrada a variação de caster de cada um dos veículos. Gráfico 1 – (a) CT17/18, (b) SEVERO18/19.

Gráfico 1: Variação de caster com o movimento da suspensão

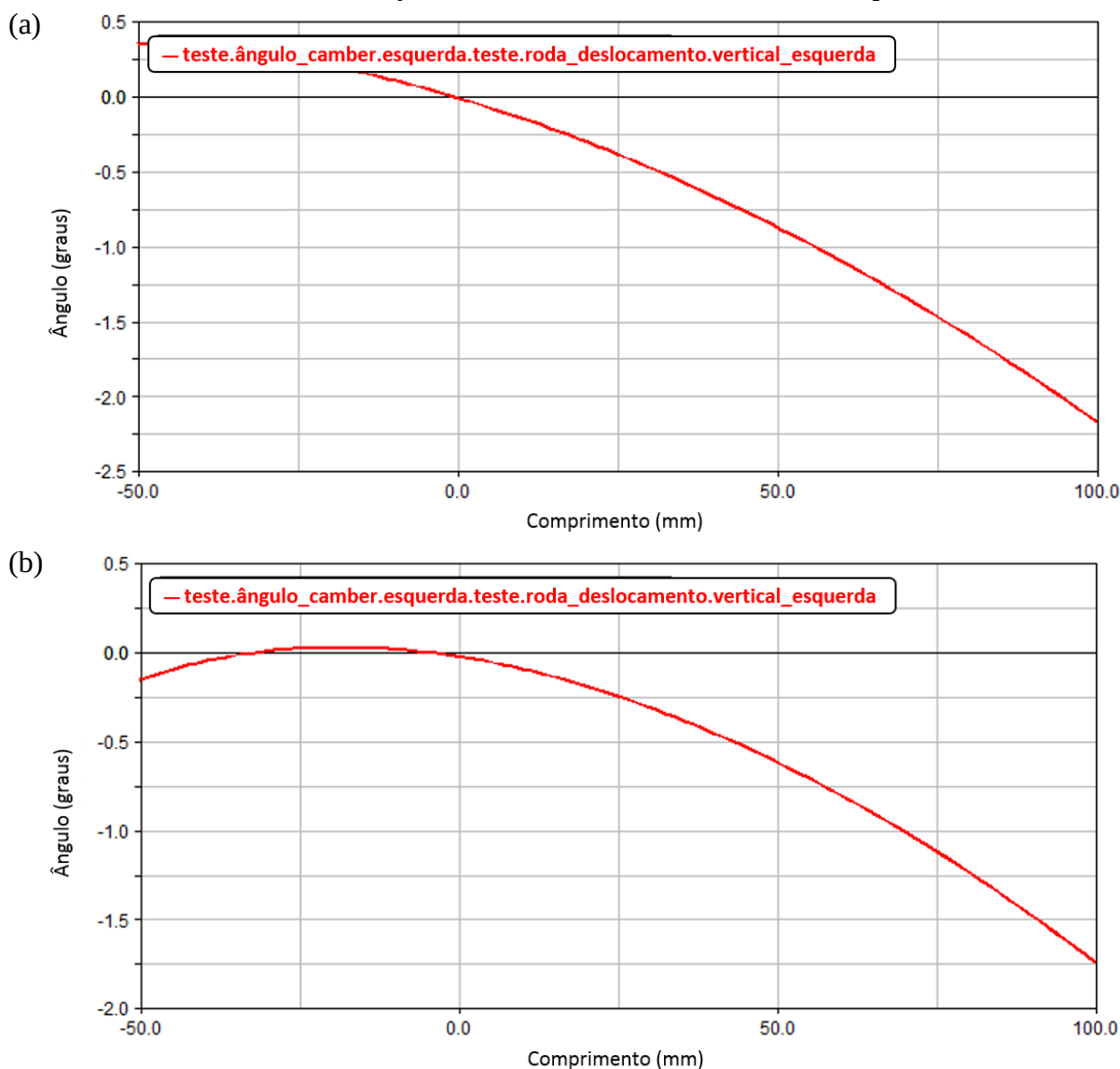
Fonte – (a) e (b) Autoria própria

O ângulo de caster em ambos os veículos apresenta-se com inclinação positiva, segundo Nicolazzi (2001) tende a aumentar o esforço na direção, mas provoca o auto alinhamento do volante após uma curva, que é uma das características desejadas não só para um veículo baixa, mas para todos os veículo, mudando a intensidade de acordo com a necessidade de cada veículo. Levando isso em consideração, com o aumento do ângulo de ataque através da inclinação da suspensão, houve um aumento no ângulo de caster de 6° positivos, como pode ser observado no Gráfico 1. Além disso, é possível observar as pequenas variações durante o curso total da suspensão, o veículo CT17/18 varia 0,12° e o

SEVERO18/19 varia $0,07^\circ$, ambas variações de caster estão dentro do tolerável definido nas premissas dos projetos, que é de no máximo 1° .

O segundo parâmetro analisado foi o ângulo de camber, no Gráfico 2 está mostrada a variação de camber durante o comprimento do curso total de cada uma das suspensões simuladas. Gráfico 2 – (a) CT17/18, (b) SEVERO18/19.

Gráfico 2: Variação de camber com o movimento da suspensão



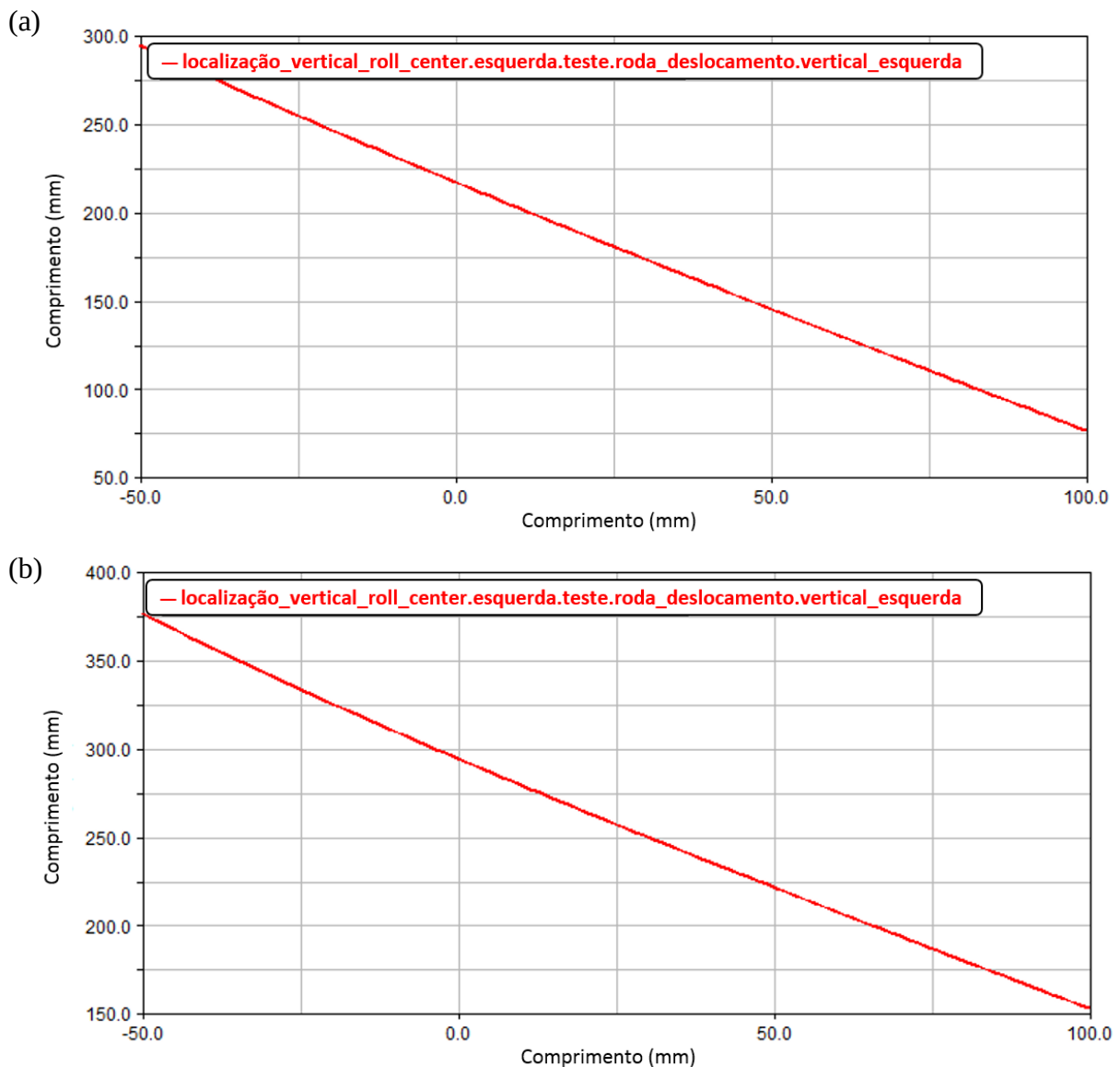
Fonte – (a) e (b) Autoria própria

A variação tolerável do ângulo de camber do veículo CT17/18 e do SEVERO18/19, foram definidas com o valor máximo admissível de 5° . Pode-se observar no Gráfico 2 que a variação do ângulo de camber de ambos veículos estão dentro do valor tolerável, a cambagem do veículo CT17/18 varia $2,5^\circ$, enquanto a do veículo SEVERO18/19 varia $1,75^\circ$. É possível observar que nas duas situações estáveis, os veículos possuem cambagem de 0° , levando com

consideração as duas rodas dianteiras, assim elimina o possível risco do veículo tender a puxar para algum dos lados. Com essas configurações, segundo Gillespie (1992) ao executar uma curva, a roda externa apresenta uma cambagem positiva acentuada, reduzindo consideravelmente a absorção de forças laterais.

O terceiro parâmetro analisado foi o *roll center*, no Gráfico 3 está mostrada a variação da posição do *roll center* durante o comprimento do curso total de cada uma das suspensões simuladas. Gráfico 3 – (a) CT17/18, (b) SEVERO18/19.

Gráfico 3: Variação de *roll center* com o movimento da suspensão



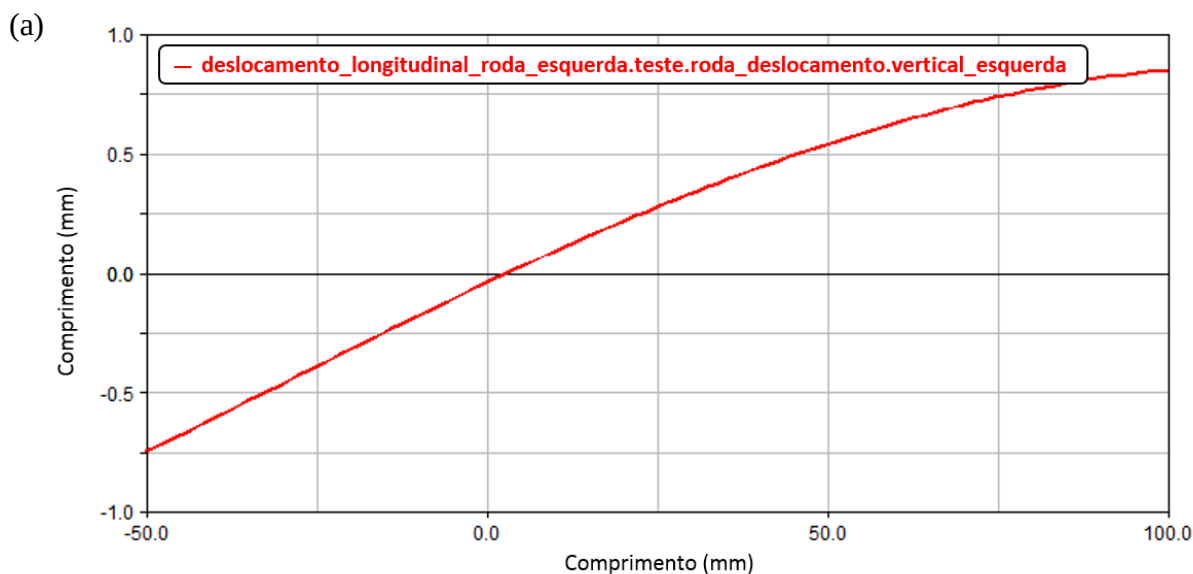
Fonte – (a) e (b) Autoria própria

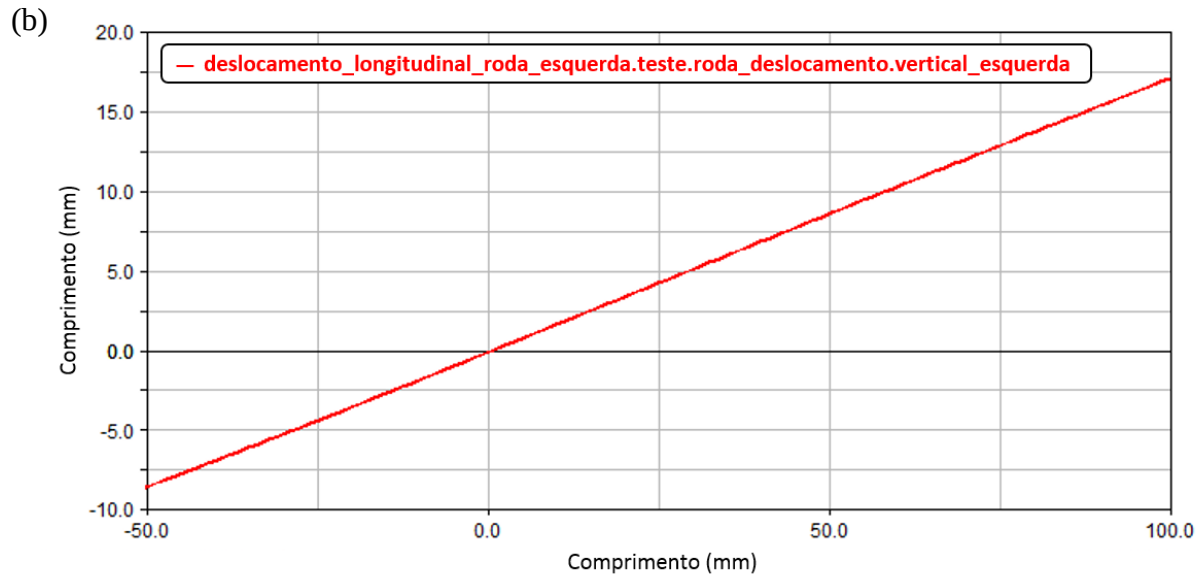
O aumento do ângulo de ataque influenciou diretamente no aumento da altura do *roll center*, causado pela inclinação mais acentuada das bandejas. No Gráfico 3 é possível observar a relação do comprimento da altura do *roll center* com o comprimento do curso de

suspensão total, em cada um dos veículos simulados. No veículo CT17/18 a altura do *roll center* na condição estável é de aproximadamente 215 mm, já o veículo SEVERO18/19 na mesma condição, tem o *roll center* com altura de 290 mm, ambos possuindo a mesma variação no trabalho da suspensão, de aproximadamente 450 mm. Com essa alteração no projeto dos dois veículos, levando em consideração o que diz Diniz (2014), o projeto no qual o *roll center* apresenta-se relativamente mais alto (SEVERO18/19) tem o maior risco de tombamentos, pois quanto mais alto for o *roll center* maior a rolagem e consequentemente maior risco de tombar. Assim, o veículo que apresenta *roll center* mais baixo (CT17/18), tem um menor momento de rolamento, o que deixa o veículo mais “solto” ao entrar em uma curva.

A quarta análise foi feita levando em consideração o movimento das rodas dianteiras trabalhando simultaneamente, no sentido longitudinal, em relação ao trabalho do curso total da suspensão. Para essa análise, foram gerados resultados, os quais estão expostos no Gráfico 4. Gráfico 4 – (a) CT17/18, (b) SEVERO18/19.

Gráfico 4: Deslocamento longitudinal da roda dianteira com o movimento da suspensão





Fonte – (a) e (b) Autoria própria

Verificando as variações apresentadas no Gráfico 4, é notório a relevância da inclinação do atual projeto de suspensão. No veículo CT17/18, o qual as bandejas de suspensão rotacionam em eixos horizontais paralelos ao solo, tem-se um trabalho vertical da suspensão com uma variação longitudinal mínima das rodas, de aproximadamente 1,6mm. Já o veículo SEVERO18/19, por possuir uma fixação das bandejas em eixos com ângulo ascendente em relação ao solo, as mesmas rotacionam em torno deles, proporcionando uma maior variação longitudinal das rodas, de 25,5mm. A principal influência do aumento dessa variação é a minimização dos esforços nos componentes de suspensão.

5. CONCLUSÃO

Com o aperfeiçoamento do projeto, foi analisado a viabilidade da alteração do ângulo de ataque levando em consideração que houveram algumas influências positivas e outras não. Isso é perceptível nos gráficos gerados no software ADAMS Car, com a comparação dos parâmetros analisados, onde o projeto do veículo SEVERO18/19 apresentou melhor variação dos parâmetros de caster, camber e de deslocamento longitudinal da roda durante o movimento da suspensão, já o projeto do veículo CT17/18 apresentou melhor variação do *roll center*.

O estudo realizado no presente trabalho tem relevância por comprovar melhorias a partir da alteração do projeto do veículo CT17/18 para o projeto do veículo SEVERO18/19, analisadas também do software Inventor, levando em consideração o aumento no ângulo de ataque. As melhorias apresentadas resultaram no comportamento de alguns parâmetros de suspensão, na superação de obstáculos, na redução da absorção das forças laterais e na resistência, principalmente aos esforços causados nos componentes de suspensão, assim apresentando melhor desempenho dinâmico. Os resultados de competições evidenciam que o veículo SEVERO18/19, o qual possui maior ângulo de ataque, obteve melhores colocações, apresentando melhor desempenho nas provas dinâmicas de enduro de resistência e suspensão.

Os estudos mostraram que a mudança adotada para de um projeto para o outro, foi viável. No entanto, não é correto afirmar que quanto maior o ângulo de ataque de um veículo melhor será o seu desempenho. Devem ser realizados estudos levando em consideração as condições de projeto, de acordo com a necessidade e comportamento desejado de um veículo, comprovando ou não a viabilidade quanto ao comportamento dinâmico em relação ao ângulo de ataque.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Daniel de Araújo. **DIMENSIONAMENTO CINEMÁTICO E DINÂMICO DE SUSPENSÃO DUPLO A**. 2012. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

ALVES, André Batista. **SISTEMA DE AFERIÇÃO DE INCLINAÇÃO EM VEÍCULOS OFF-ROAD**. 2006. 80 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia da Computação, Centro Universitário Positivo, Curitiba, 2006.

Baja online, (2019) Arquivo: **Nacional**. [online] Disponível em: <<https://bajasaebrazil.online>> Acessado em: 01 de mar. de 2019.

BARBIERI, F. A. A.; **Sistema de suspensão**. Disponível em: <<http://www.apostilasgratis.net.br>> Acesso em: 02 dez. 2018.

BASSETTO, Edson Luis. **PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA O ENSINO DAS FASES DE PROJETO INFORMACIONAL E PROJETO CONCEITUAL**. 2004. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

BORNHOLD, Adelson Moacir. **DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE FREIO PARA VEÍCULO OFFROAD DE PEQUENO PORTE**. 2012. 48 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade Horizontina, Horizontina, 2012.

BRAVO, Diego Moreno. **Projeto Cinemático da Suspensão e Direção de um Veículo de Fórmula SAE Elétrico**. 2013. 77 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2013.

BRITO, A. C. S.; **Análise de uma suspensão automotiva usando dinâmica multicorpos**. 2013. 62f. Trabalho de conclusão de curso, Bacharel em Ciência e Tecnologia – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Angicos, 2013.

CROLLA, David A.. **Automotive Engineering: Powertrain, Chassis System and Vehicle Body**. Amsterdam: First, 2009.

DINIZ, Diego David Silva; SILVA, Raphael de Sousa; FERREIRA, Arthur Azevedo. **ANÁLISE COMPUTACIONAL DE UM CONCEITO DE SISTEMA DE SUSPENSÃO TRASEIRA PARA UM VEÍCULO OFF-ROAD**. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 7. 2012, São Luiz-Maranhão.

DINIZ, D. D. S.; **Estudo da dinâmica vertical em suspensão duplo A de um veículo off-road tipo baja**. 2014. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

DUARTE, Murilo del Rio. **SIMULAÇÃO DE RIDE PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO ATRAVÉS DO USO DE CARREGAMENTO DE PISTA**. 2010. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

DUARTE, Alex Ronny Dantas. **PROJETO DETALHADO DE UMA SUSPENSÃO DIANTEIRA DO TIPO DUPLO A PARA UM VEÍCULO BAJA**. 2017. 107 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2017.

FREITAS, Luís M., **Estudo da dinâmica vertical de uma suspensão veicular do tipo Macpherson**. 2006. 131f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

GILLESPIE, T. D.. **Fundamentals of vehicle dynamics**. SAE R – 114, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, USA, 1992.

JAZAR, Reza N.. **Vehicle dynamics: Theory and applications**. Springer Science and Business Media, LLC. New York, NY, USA, 2008.

KAFFKA, D.; **Projeto conceitual de estrutura e suspensão para protótipo Baja**. Panambi. Unijuí, 2007. 71f. Trabalho de conclusão de curso, Curso de Engenharia Mecânica - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2009.

MENEZES, Lucas Bezerra; GEVINSKI, Jakerson Ricardo. **ESTUDO NO DESENVOLVIMENTO DE SUSPENSÃO DUPLO “A” E APLICAÇÃO EM VEÍCULO DE CLASSE FÓRMULA SAE**. In: Ênfase Veicular da Universidade Federal de Santa Catarina, SD, Santa Catarina.

REZENDE, Jean Carlos Campos. **PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM MODELO DE SUSPENSÃO AUTOMOTIVA EM BANCADA DE LABORATÓRIO**. 2007. 171 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

SAE Brasil, (2018) Programas Estudantis: **O que é o Baja**. [online] Disponível em: <<http://portal.saebrasil.org.br/programas-estudantis/baja-sae-brasil>> Acessado em: 02 de nov. de 2018.

VARGAS, V. A.. **Efeitos da flexibilidade estrutural em simulações de dinâmica lateral de veículo de transporte de carga**. 2011. 132f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

VIEGAS, Bruno Barbo Colangelo. **ANÁLISE NUMÉRICA DE MANGAS DE EIXO PARA VEÍCULO BAJA SAE**. 2016. 91 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

VIEIRA NETO, A. J.. **Metodologia de aperfeiçoamento de suspensões veiculares através de modelo virtual em ambiente multicorpos**. 2011. 90f. Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Dinâmica das Máquinas e Sistemas). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.