



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

ANTONIO PAULO MAIA LINHARES

**PROPOSTA DE GEOMETRIA DE SUSPENSÃO DIANTEIRA PARA UM
PROTÓTIPO DO TIPO BAJA SAE**

CARAÚBAS-RN

2025

ANTONIO PAULO MAIA LINHARES

**PROPOSTA DE GEOMETRIA DE SUSPENSÃO DIANTEIRA PARA UM
PROTÓTIPO DO TIPO BAJA SAE**

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

Orientador: Prof. Dr. Diego David Silva Diniz

CARAÚBAS-RN

2025

© 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.

L735p Linhares, Antonio Paulo Maia.
Proposta de geometria de suspensão dianteira
para um protótipo do tipo Baja SAE / Antonio Paulo
Maia Linhares. - 2025.
53 f. : il.

Orientador: Diego David Silva Diniz.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2025.

1. suspensão veicular. 2. baja. 3. geometria
de suspensão. 4. veículos off-road. 5. simulação
dinâmica. I. Diniz, Diego David Silva, orient. II.
Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Sarah Freire Bezerra
CRB: 15/1052

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.

ANTONIO PAULO MAIA LINHARES

**PROPOSTA DE GEOMETRIA DE SUSPENSÃO DIANTEIRA PARA UM
PROTÓTIPO DO TIPO BAJA SAE**

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

Defendida em: 11 / 03 / 2025.

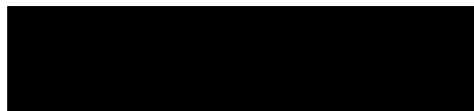
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Diego David Silva Diniz (UFERSA)
Presidente



Prof. Dr. Jackson de Brito Simões (UFERSA)
Membro Examinador



Prof. Me. Carlos Costa de Carvalho (UFERSA)
Membro Examinador

*Dedico esse trabalho ao meu pai Antonio
Linhares.*

E a minha mãe Eva Maria Olímpia Maia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder fé e coragem para enfrentar os desafios e seguir em busca dos meus sonhos.

Sou imensamente grato aos meus pais, Antonio Linhares e Eva Maria Olímpia Maia, pelo apoio incondicional, por nunca me deixarem faltar nada e por serem minha maior inspiração ao longo dessa jornada.

Também agradeço às minhas irmãs, Anne Caroline e Ana Vitória, pelo carinho e apoio constantes, sempre acreditando em mim e tornando essa caminhada ainda mais especial.

Ao meu sobrinho, Miguel, por encher meus dias de alegria com sua espontaneidade e por me proporcionar momentos de felicidade genuína.

À minha namorada, Raynoan Emilly, por seu apoio, paciência e motivação, sempre acreditando em mim e me impulsionando a seguir em frente.

Aos meus amigos, pelo companheirismo e incentivo ao longo dessa trajetória, tornando cada momento compartilhado ainda mais significativo.

Ao meu orientador, Dr. Diego David, pelos ensinamentos valiosos, pela dedicação e pelo suporte essencial durante toda essa caminhada.

À equipe Caraubaja, minha segunda família, pelo aprendizado, pelos desafios superados e pelas conquistas alcançadas juntos. Sou grato por fazer parte desse time incrível e por tudo o que vivemos ao longo dessa jornada.

A todos vocês, minha eterna gratidão!

“Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar.”

Josué 1:9

RESUMO

O desenvolvimento de veículos *off-road* exige um projeto bem estruturado de seus componentes, especialmente da suspensão, responsável por garantir a estabilidade, absorção de impactos e controle direcional em terrenos acidentados. No contexto das competições universitárias da Baja SAE, a otimização da geometria da suspensão se torna essencial para melhorar o desempenho do protótipo em provas dinâmicas. Este trabalho tem como objetivo desenvolver e analisar diferentes configurações geométricas para a suspensão dianteira de um veículo baja SAE, buscando identificar a configuração que proporcione maior estabilidade e melhor comportamento dinâmico. Para isso, foram projetadas três variações de geometria, considerando parâmetros como ângulos de *camber*, *caster* e *toe*, além da posição do centro instantâneo. A metodologia adotada envolveu a modelagem computacional dos componentes da suspensão e a realização de simulações dinâmicas em software específico, permitindo avaliar as respostas do veículo em diferentes condições de terreno. Os resultados obtidos fornecem informações relevantes para a otimização da suspensão, contribuindo para um projeto mais eficiente e competitivo no cenário das competições baja SAE.

Palavras-chave: suspensão veicular; baja; geometria de suspensão; veículos *off-road*; simulação dinâmica.

ABSTRACT

The development of off-road vehicles requires a well-structured design of their components, especially the suspension, which is responsible for ensuring stability, impact absorption, and directional control on rough terrains. In the context of the baja SAE university competitions, optimizing the suspension geometry becomes essential to improve the prototype's performance in dynamic tests. This study aims to develop and analyze different geometric configurations for the front suspension of a Baja SAE 4x4 vehicle, seeking to identify the configuration that provides greater stability and better dynamic behavior. To achieve this, three variations of suspension geometry were designed, considering parameters such as camber, caster, and toe angles, as well as the position of the instant center. The adopted methodology involved the computational modeling of suspension components and the execution of dynamic simulations using specific software, allowing the evaluation of the vehicle's responses under different terrain conditions. The obtained results provide relevant information for suspension optimization, contributing to a more efficient and competitive design in the baja SAE competition environment.

Keywords: *vehicle suspension; baja; suspension geometry; off-road vehicles; dynamic simulation;*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Veículos <i>off-road</i> .	17
Figura 2: Subsistemas de um Baja SAE.	19
Figura 3: Comparação da suspensão de um veículo de passeio para um <i>off-road</i> .	21
Figura 4: Modelos de suspensão dependentes.	22
Figura 5: Suspensões independentes.	23
Figura 6: Componentes de Suspensão.	24
Figura 7: Bitola.	25
Figura 8: Entre-eixos.	26
Figura 9: Pino mestre, <i>kingpin offset e kingpin inclination</i> .	27
Figura 10: Ângulo de <i>camber</i> .	28
Figura 11: Ângulo de <i>toe</i> .	28
Figura 12: Ângulo de <i>caster</i> .	29
Figura 13: Massa suspensa e não suspensa de um baja.	30
Figura 14: Geometria frontal da suspensão duplo A.	31
Figura 15: Interface do Autodesk Inventor.	34
Figura 16: Interface do Adams Car.	34
Figura 17: Fluxograma de organização.	35
Figura 18: Geometria de base da suspensão.	36
Figura 19: <i>Parallel wheel travel</i> .	37
Figura 20: Cenários utilizados.	37
Figura 21: Caminho da simulação.	38
Figura 22: Configuração da simulação de veículo completo (<i>Full-Vehicle</i>).	39
Figura 23: Variação do ângulo de <i>toe</i> .	40
Figura 24: Variação do ângulo de <i>camber</i> .	41
Figura 25: Variação do ângulo de <i>caster</i> .	41
Figura 26: Variação do ângulo de <i>toe</i> no cenário 1.	42
Figura 27: Variação do ângulo de <i>camber</i> no cenário 1.	43

Figura 28: Desenvolvimento da velocidade longitudinal no cenário 1.	43
Figura 29: Contato da roda ao solo no cenário 1.....	44
Figura 30: Deslocamento vertical da massa suspensa no cenário 1.	44
Figura 31: Variação do ângulo de <i>toe</i> no cenário 2.....	45
Figura 32: Variação do ângulo de <i>camber</i> no cenário 2.....	46
Figura 33: Desenvolvimento da velocidade longitudinal no cenário 2.	46
Figura 34: Contato do pneu ao solo no cenário 2.....	47
Figura 35: Deslocamento vertical da massa suspensa no cenário 2.	47
Figura 36: Variação do ângulo de <i>toe</i> no cenário 3.....	48
Figura 37: Variação do ângulo de <i>camber</i> no cenário 3.....	48
Figura 38: Desenvolvimento da velocidade longitudinal no cenário 3.	49
Figura 39: Contato do pneu ao solo no cenário 3.....	49
Figura 40: Deslocamento vertical da massa suspensa no cenário 3.	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros iniciais do Severo.....	32
Tabela 2: Parâmetros utilizados na simulação.....	38

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivo Específico	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	Veículos <i>off-road</i>	17
2.1.1	Modelo <i>baja</i>	18
2.2	Competições <i>Baja SAE Brasil</i>	18
2.3	Subsistemas do <i>baja SAE</i>	18
2.4	Suspensão Automotiva	20
2.4.1	Suspensão dependente	21
2.4.2	Suspensão independente	22
2.4.3	Componentes de suspensão	23
2.4.4	Parâmetros de suspensão	24
2.4.5	Geometria de suspensão	29
2.5	Dinâmica Veicular	31
3	METODOLOGIA DA PESQUISA	32
3.1	Objeto de estudo	32
3.2	Ferramentas utilizadas	33
3.2.1	JIRA	33
3.2.2	Autodesk Inventor	33
3.2.3	MSC ADAMS CAR	34
3.3	Metodologia aplicada	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1	Análise das geometrias de suspensão dianteiras em simulação <i>parallel wheel travel</i> ..	40
4.2	Análise dos resultados das simulações (<i>Full-Vehicle</i>)	42
4.2.1	Análise dos parâmetros no cenário 1 (rampas)	42
4.2.2	Análise dos parâmetros no cenário 2 (valas)	45
4.2.3	Análise dos parâmetros no cenário 3 (ondulações)	48
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
	REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

A indústria automobilística evolui constantemente em busca de veículos mais seguros, confortáveis e eficientes. Um aspecto fundamental desse avanço é a previsão do desempenho veicular antes da produção, reduzindo custos e otimizando processos. Segundo Diniz (2014), a modelagem computacional permite compreender o comportamento dos veículos em condições adversas, aprimorando seu desempenho antes mesmo da construção do protótipo físico. Entre os diversos segmentos do setor, os veículos *off-road* se destacam pela robustez e tecnologia voltadas para enfrentar terrenos irregulares e operar em condições extremas.

Os veículos *off-road* são projetados para enfrentar terrenos irregulares, como trilhas, lama e rochas, onde carros convencionais não conseguem passar. Eles possuem suspensão reforçada, pneus especiais, tração 4x4 ou 4x2 blocada e estrutura resistente, com chassi e eixos preparados para impactos e torções. Essas características os tornam ideais para atividades como trilhas, ralis e ambientes de trabalho desafiadores, como mineração e agricultura.

Algumas organizações realizam campeonatos desse tipo de veículos, um deles é o Baja SAE Brasil. A SAE Brasil (*Society of Automotive Engineers*) promove competições universitárias de veículos *off-road* do tipo baja. Segundo Carvalho (2017), eventos como esses representam oportunidades valiosas para estudantes de engenharia, proporcionando experiência prática em pesquisa e resolução de problemas reais, o que eleva seu nível de competitividade no mercado e impulsiona a introdução de inovações na indústria, possibilitando-os um aprimoramento de suas habilidades e desenvolvimento de outras que auxiliarão no mercado de trabalho.

O baja SAE é um protótipo desenvolvido exclusivamente para competições, não sendo destinado à circulação em vias públicas ou outros ambientes fora desse contexto. Para o desenvolvimento desse protótipo deve ser seguido um modelo de regulamentação que é fornecido pela SAE para manter a segurança do piloto e da equipe. No entanto, os estudantes devem projetar e fabricar as geometrias dos subsistemas do modelo, como suspensão, transmissão e chassi, estritamente dentro dos limites estabelecidos pelo regulamento.

Na concepção de Souza (2021), os veículos tipo baja requerem estudos dinâmicos para validar a eficácia de seus subsistemas em terrenos acidentados. Dentro os subsistemas, destaca-se a suspensão, em que tem um papel essencial na dinâmica e estabilidade. Para um desempenho eficiente, ela deve operar em perfeita sintonia com a transmissão, respeitando seus limites e garantindo a melhor resposta do conjunto.

No mercado, existem vários tipos de suspensão, cada um desenvolvido para diferentes objetivos e modelos de automóveis. Segundo Almeida (2012), esses componentes são responsáveis por absorver choques e vibrações, garantindo o conforto do piloto. Para veículos *off-road*, as suspensões independentes mais comuns incluem *Multilink*, *McPherson*, *Trailing arm* e *Swing arm*, sendo a Duplo A uma das mais usadas na dianteira.

Uma suspensão Duplo A é composta por dois braços triangulares, conectados ao chassi e à manga de eixo, permitindo o movimento vertical da roda. Sua geometria oferece estabilidade, controle de roda, resposta ágil e conforto. No entanto, Nicolazzi (2008) observa que suspensões independentes podem causar inclinação das rodas e carroceria, resultando em *camber* positivo na roda externa, o que reduz sua capacidade de absorver forças laterais. Esses fatores devem ser considerados no projeto da suspensão Duplo A.

Para definir configurações específicas da suspensão, é realizado um estudo da geometria, analisando parâmetros como Centro Instantâneo (CI), que distribui forças; *caster*, que melhora a estabilidade; *scrub radius*, que afeta o esforço de esterçamento; *camber*, que otimiza o contato do pneu; *king pin*, que define o eixo de rotação da roda; bitola, que impacta a estabilidade lateral; *toe*, que ajusta o alinhamento das rodas; e vão livre, que define a altura mínima do veículo. Essa análise é essencial para garantir estabilidade e desempenho, mas a validação exige o uso de softwares de simulação dinâmica.

Esses softwares desempenham um papel crucial no desenvolvimento de veículos, permitindo que engenheiros realizem testes virtuais antes da fase de fabricação. Com essas ferramentas, é possível analisar o desempenho da suspensão e do veículo como um todo em diversas condições, como diferentes tipos de terreno, velocidades e cargas. Isso reduz custos, otimiza o tempo de desenvolvimento e possibilita ajustes mais precisos no projeto, garantindo maior eficiência e segurança.

Dentro desse contexto, o presente trabalho visa analisar e otimizar a geometria de suspensão de um veículo *off-road* baja SAE 4x4, essencial para sua estabilidade e dinâmica vertical em terrenos desafiadores. Inicialmente, foram projetadas diferentes configurações de geometrias de suspensão, considerando parâmetros como variação do CI e o comportamento do *caster*, *camber* e *toe*, visando um desempenho otimizado nas provas dinâmicas. Em seguida, essas geometrias foram testadas por meio de simulações dinâmicas no software Adams Car, permitindo avaliar sua eficácia em condições virtuais. A análise dos resultados indicou a configuração com melhor desempenho em estabilidade e resposta dinâmica, garantindo um veículo mais eficiente para as competições baja SAE.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a influência da altura do Centro Instantâneo (CI) no comportamento da suspensão duplo A de um veículo do tipo baja SAE em diferentes situações, buscando a configuração de geometria ideal, considerando fatores como estabilidade, velocidade e dinâmica vertical em terrenos variados.

1.1.2 Objetivo Específico

- Realizar um estudo bibliográfico sobre geometria de suspensão duplo A;
- Usar como base a geometria dianteira do protótipo da equipe Caraubaja;
- Desenhar duas geometrias com a variação do CI a partir da geometria de base;
- Realizar simulações estáticas e dinâmicas no software Adams Car;
- Comparar a variação dos parâmetros e o comportamento ao alterar a geometria;
- Analisar qual das geometrias teve um melhor comportamento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Veículos *off-road*

Os veículos *off-road* são projetados especificamente para enfrentar terrenos acidentados e desafiadores. Segundo Diniz (2014), esses veículos possuem características distintivas que os diferenciam dos modelos convencionais, como maior distância ao solo, suspensão reforçada, opção de tração nas quatro ou duas rodas, freios melhorados, componentes mais robustos na parte não suspensa e uma tendência ao sobreesterçamento. Essas características tornam os veículos *off-road* ideais para uma ampla variedade de aplicações, incluindo atividades recreativas, competições, missões militares e operações de resgate, além do uso na agricultura, onde a resistência e a capacidade de locomoção em solos irregulares são essenciais.

Para atender a essa demanda, a indústria automobilística investe continuamente no desenvolvimento e aprimoramento desses veículos, abrangendo desde a concepção de novos modelos, como jipes e caminhonetes, até a fabricação de componentes e acessórios específicos para o uso fora de estrada. Além do mercado de veículos prontos para uso, há também um setor significativo voltado à personalização e ao mercado de reposição, permitindo que entusiastas e profissionais adaptem seus veículos para desafios ainda mais exigentes. Dessa forma, essa indústria desempenha um papel essencial tanto na inovação tecnológica quanto na ampliação das possibilidades de utilização dos veículos *off-road*. A Figura 1 ilustra alguns dos modelos que representam essa categoria de automóveis.

Figura 1: Veículos *off-road*.



Fonte: offlimits.com; baja nordeste; cabodiscounttours.com; TavaresAndres4x4.

2.1.1 Modelo baja

O modelo baja é uma categoria específica dentro do universo dos veículos *off-road*, desenvolvida especialmente para competições que exigem resistência, agilidade e desempenho em terrenos extremos. Diferente dos veículos *off-road* convencionais, que podem ser utilizados tanto para lazer quanto para fins profissionais, o Baja é concebido com foco na performance em provas que testam seus limites estruturais e mecânicos.

Os veículos baja possuem um design altamente funcional, com estruturas tubulares leves que garantem rigidez e segurança, suspensões reforçadas para absorver impactos intensos e pneus especiais para aderência em diversos tipos de terreno. Essas características são fundamentais para garantir desempenho em ambientes *off-road* desafiadores, onde a estabilidade, a tração e a resistência do veículo são constantemente testadas. Um exemplo marcante desse conceito é o Baja SAE, um veículo projetado especificamente para competições acadêmicas organizadas pela SAE, nas quais equipes universitárias desenvolvem e aprimoram seus próprios protótipos. O processo de engenharia envolvido no desenvolvimento do Baja SAE abrange estudos contínuos sobre dinâmica veicular, distribuição de peso e resistência dos materiais, buscando otimizar sua performance em provas que simulam condições reais de trilhas acidentadas.

2.2 Competições Baja SAE Brasil

A Sociedade de Engenheiros da Mobilidade (SAE) é uma organização global focada no avanço da mobilidade automotiva e na formação de profissionais da indústria. Ela organiza competições como Fórmula SAE, Aero Design SAE, Baja SAE e entre outros, desafiando estudantes a aplicarem seus conhecimentos em projetos práticos. No Baja SAE, equipes constroem veículos *off-road* para enfrentar desafios em terrenos acidentados, simulando situações reais, como subidas íngremes e trilhas enlameadas.

O Projeto Baja SAE começou em 1976 na Universidade da Carolina do Sul, EUA, e a SAE Brasil iniciou o Projeto Baja SAE BRASIL em 1994, com a primeira competição nacional em 1995. Desde 1997, a SAE BRASIL apoia eventos regionais. Essas competições promovem o trabalho em equipe, liderança e resolução de problemas, e muitas empresas da indústria buscam talentos com essa experiência prática.

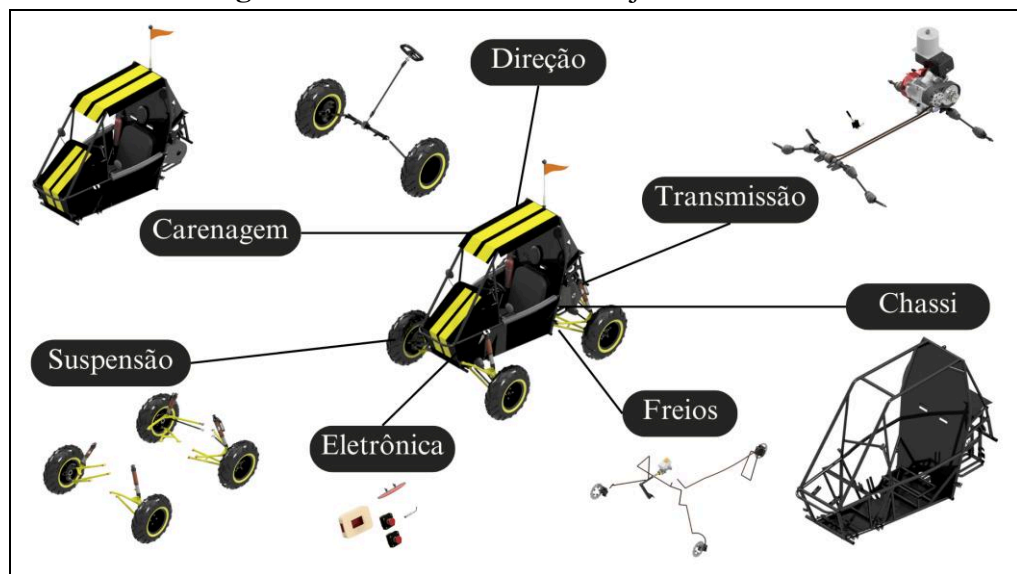
2.3 Subsistemas do baja SAE

Para que um protótipo baja tenha um desempenho satisfatório, é essencial que seu projeto seja conduzido com precisão, garantindo um equilíbrio entre resistência, eficiência e

segurança. Cada subsistema deve ser planejado de forma integrada, permitindo que o veículo enfrente terrenos desafiadores e atenda às exigências das competições *off-road*.

A qualidade do desempenho não se resume à robustez de um único componente, mas à maneira como todos trabalham juntos para proporcionar estabilidade e controle. Um projeto bem estruturado leva em conta não apenas a funcionalidade individual de cada elemento, mas também sua interação dentro do conjunto, evitando limitações que possam comprometer o rendimento do veículo. Na Figura 2 é mostrado todos os subsistemas de um baja SAE.

Figura 2: Subsistemas de um Baja SAE.



Fonte: Autoria Própria.

O chassi de um veículo baja SAE é a estrutura que suporta todos os componentes, garantindo resistência e segurança. Seu design deve equilibrar rigidez e leveza, sendo geralmente feito com tubos de aço SAE 1020. Segundo Melo (2019), a estrutura tubular monoposto visa reduzir a massa sem comprometer a resistência mecânica, e deve seguir as normas da SAE Brasil, garantindo espaço adequado ao piloto e evitando falhas estruturais em impactos.

A transmissão transfere a potência do motor para as rodas, impactando o desempenho e a eficiência do veículo. Ela deve garantir boa aceleração, controle de torque e tração, especialmente entre 4x2 e 4x4, adaptada a diferentes terrenos. Seus principais componentes incluem motor, caixa de transmissão, CVT, diferenciais e eixos de tração, otimizados para reduzir perdas mecânicas e melhorar a resposta na pilotagem.

Os freios são essenciais para a segurança do veículo, garantindo desaceleração eficaz em terrenos irregulares. Compostos por discos, pastilhas de alta resistência e um sistema

hidráulico, proporcionam uma resposta precisa e contribuem para um controle mais eficiente durante frenagens bruscas.

A eletrônica do Baja é responsável pela segurança e monitoramento do desempenho do veículo. Inclui a luz de freio, botoeiras para desligamento do motor, sensores de velocidade, controle do sistema 4x4 e monitoramento da temperatura do CVT. Todas as informações são exibidas ao piloto por meio de um painel.

A carenagem protege componentes contra impactos, poeira e detritos, além de melhorar a aerodinâmica. Feita de materiais leves e resistentes, como plásticos e compósitos, ela também oferece um toque estético, destacando o veículo nas competições. De acordo com o Regulamento Baja SAE Brasil, a carenagem deve ser projetada de forma a não comprometer a segurança e a manutenção do veículo, garantindo que todos os componentes essenciais permaneçam acessíveis e protegidos.

O sistema de direção do protótipo baja SAE, geralmente baseado no mecanismo de pinhão e cremalheira, converte o movimento do volante em deslocamento linear, transmitido às rodas dianteiras pelas barras de direção (Fernandes, 2005). Comparado a sistemas mais complexos, como a direção hidráulica ou elétrica, esse mecanismo se destaca pela robustez e precisão, garantindo uma conexão confiável entre o piloto e o terreno, proporcionando controle e estabilidade mesmo em condições adversas durante as competições.

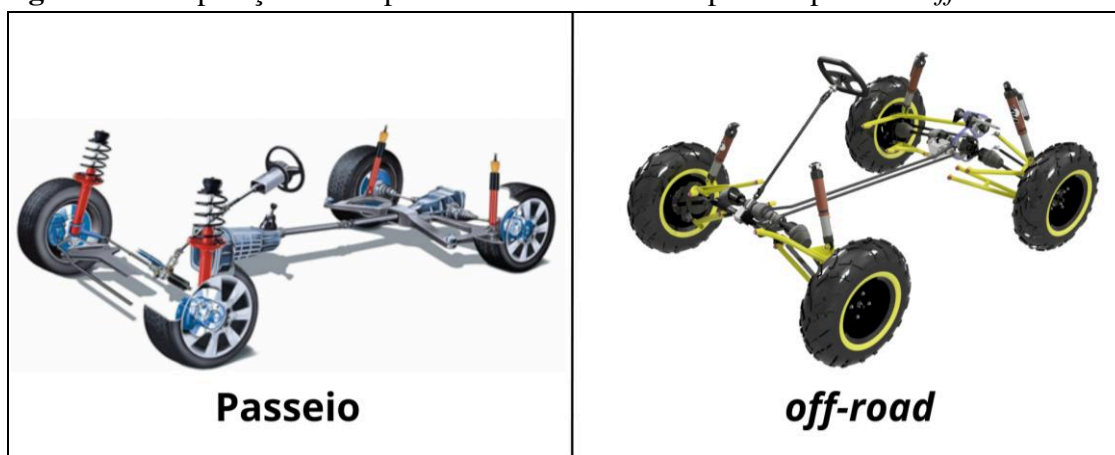
A suspensão, objeto de estudo deste trabalho, é um sistema essencial que garante o conforto, estabilidade e dinâmica do veículo. Ela é composta por amortecedores, bandejas estabilizadoras, braços de controle e buchas, que trabalham juntos para absorver impactos, manter o contato das rodas com a estrada e proporcionar uma condução suave. O elemento fundamental de um sistema de suspensão é assegurar o contato entre os pneus e a estrada. Este contato é essencial para viabilizar manobras como aceleração e curvas. Sem ele, tais manobras seriam impossíveis de realizar (Heibing e Ersoy, 2001).

2.4 Suspensão Automotiva

A suspensão é um dos principais sistemas de um veículo, desempenhando um papel essencial na confiabilidade, equilíbrio e suavidade da condução. Sua função vai além da simples absorção de impactos, influenciando diretamente na manobrabilidade, aderência dos pneus ao solo e distribuição das forças durante a movimentação do veículo. Um sistema de suspensão bem projetado garante não apenas maior controle em curvas e frenagens, mas também contribui para a durabilidade dos demais componentes do automóvel e na capacidade de superar obstáculos. Na Figura 3 é mostrado uma comparação de uma suspensão de um

veículo de passeio onde apresenta bitola e entre-eixos maiores, sistema de tração 4x2, uma suspensão dianteira do modelo *McPherson* e uma dependente na traseira, já um veículo *off-road* apresenta suspensões duplo A com geometrias simples na dianteira e na traseira, um sistema de tração 4x4, entre-eixos e bitolas menores e pneus com maiores rastros.

Figura 3: Comparação da suspensão de um veículo de passeio para um *off-road*.



Fonte: Combinado – (blog.jocar.com) e autoria própria.

O design da suspensão varia conforme a finalidade do veículo, impactando estabilidade, tração e conforto. Veículos de passeio possuem suspensão mais baixa, menor vão livre e bitola ajustada para estabilidade no asfalto, com pneus de perfil baixo e sistemas focados em conforto. Já os *off-road* têm maior vão livre, geometria otimizada para absorção de impactos e suspensão reforçada, utilizando pneus com sulcos mais profundos e sistemas que oferecem mais curso e adaptação ao terreno.

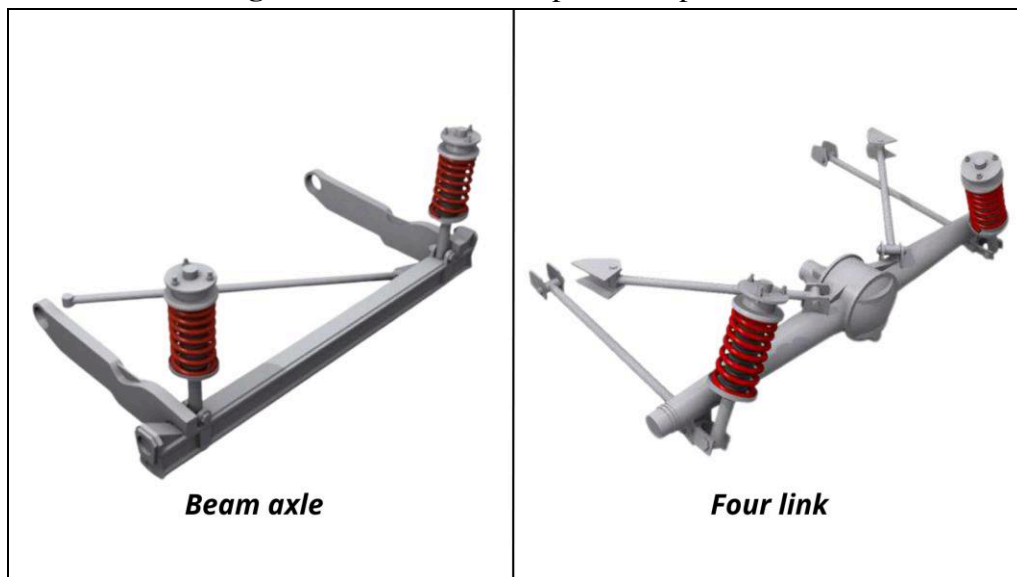
Segundo Melo (2019), as suspensões podem ser dependentes ou independentes, com características que afetam o desempenho e conforto. Além disso, existem configurações híbridas, desenvolvidas para equilibrar os benefícios de cada sistema, de acordo com as necessidades do veículo e seu ambiente de operação.

2.4.1 Suspensão dependente

As suspensões dependentes, onde o movimento de uma roda afeta as outras do mesmo eixo, são ideais para veículos utilitários e comerciais, focados na capacidade de carga e robustez. Sua principal vantagem é a simplicidade de projeto, resultando em menores custos, mas também em manobrabilidade mais rígida, com maior sensação de vibrações e imperfeições da estrada, especialmente em terrenos irregulares. Essas suspensões são altamente valorizadas por sua capacidade de suportar cargas pesadas e oferecer alta

durabilidade, especialmente em condições severas de uso. A Figura 4 ilustra os modelos de suspensões dependentes *beam axle* e *four link*.

Figura 4: Modelos de suspensão dependentes.



Fonte: Diniz (2014).

2.4.2 Suspensão independente

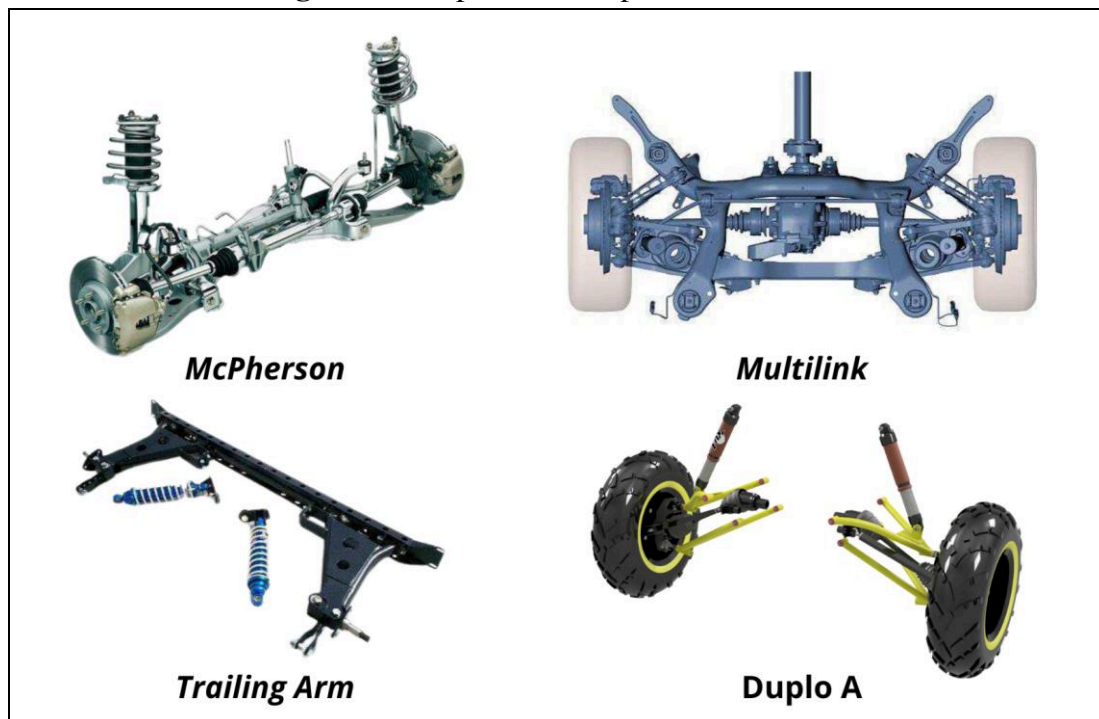
Segundo Diniz (2014), a suspensão independente permite que cada roda se mova verticalmente sem afetar a roda oposta, sendo amplamente utilizada em veículos de passeio, carros esportivos, de luxo e *off-road*. Sua principal vantagem é a capacidade de superar obstáculos, oferecendo uma condução mais suave e melhor manuseio, pois cada roda reage de forma independente às imperfeições da estrada, resultando em menos vibrações para os ocupantes e melhor tração, especialmente em terrenos irregulares.

Existem diversos tipos de suspensão independente, como a suspensão *McPherson*, comum em veículos de passeio, a suspensão *Multilink*, que oferece maior controle e conforto em veículos de luxo e esportivos, a suspensão *Trailing Arm*, frequentemente utilizada em veículos *off-road* devido à sua robustez e desempenho em terrenos difíceis, e a duplo A que é amplamente utilizada em carros esportivos e *off-road* por sua capacidade de proporcionar maior estabilidade e controle, permitindo ajustes precisos na geometria das rodas, o que melhora a aderência e o manuseio em terrenos desafiadores.

Devido à maior complexidade de design, as suspensões independentes têm custos de produção e manutenção mais elevados. Embora proporcionem mais conforto e manuseio, sua capacidade de carga tende a ser menor que as suspensões dependentes, especialmente em

veículos para transporte de cargas pesadas. A Figura 5 mostra os modelos de suspensão independente citados anteriormente.

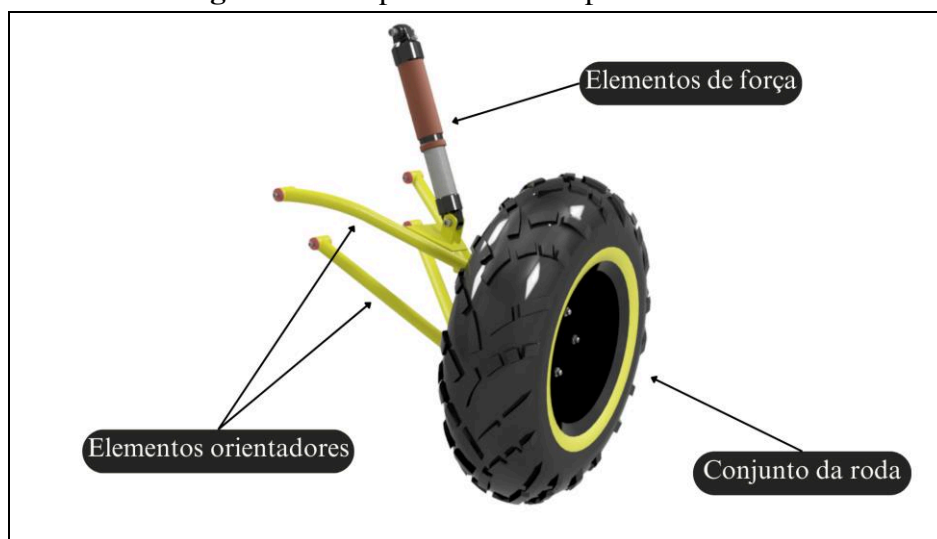
Figura 5: Suspensões independentes.



Fonte: Combinado - Diniz (2014) e autoria própria.

2.4.3 Componentes de suspensão

De acordo com Diniz (2014), um sistema de suspensão é composto por três principais grupos: o conjunto da roda, os elementos que orientam o movimento e os componentes responsáveis pela absorção de forças. Na Figura 6, são apresentados os componentes de uma suspensão do tipo duplo A, ilustrando como esses elementos se organizam para que haja harmonia integrante entre os componentes.

Figura 6: Componentes de Suspensão.

Fonte: Autoria própria.

O conjunto de roda inclui componentes próximos à roda, como manga de eixo, cubo, caliper de freio e pneu. Os elementos orientadores que conectam a roda ao chassi e controlam a cinemática da suspensão, são bandeja de suspensão e tirantes. Já os elementos de força, como molas e amortecedores, suportam as cargas estáticas e dinâmicas do veículo.

2.4.4 Parâmetros de suspensão

Os parâmetros de suspensão são cruciais para o desempenho de um veículo, impactando diretamente sua estabilidade, conforto e manuseio. Seu ajuste adequado é essencial para garantir que o veículo responda de forma eficiente em diferentes terrenos e condições de operação.

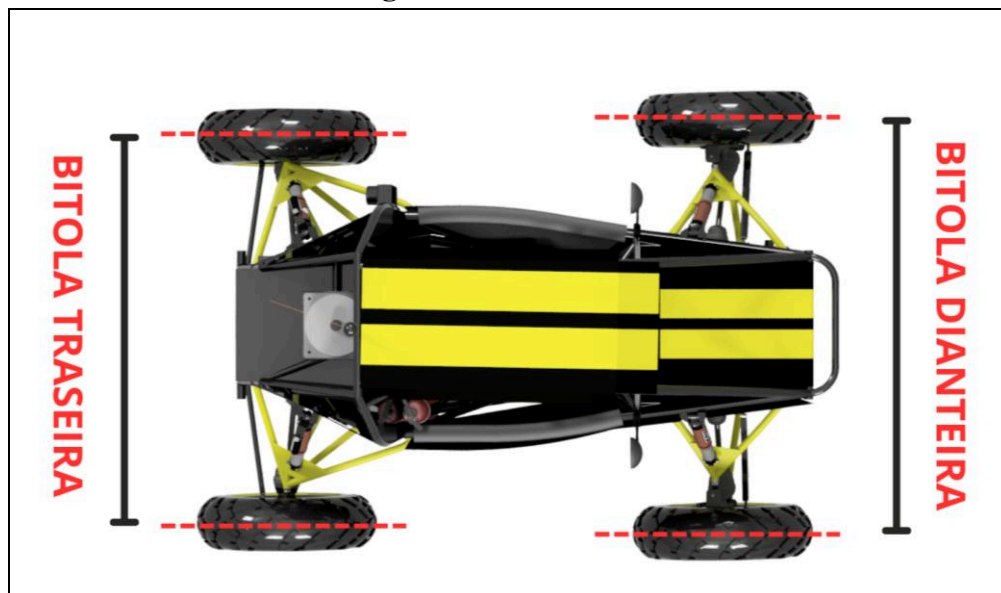
2.4.4.1 Bitola

A bitola de um veículo é definida como a distância entre as rodas de um mesmo eixo. De acordo com Almeida (2012), ela corresponde à distância entre o centro da banda de rodagem dos pneus, podendo variar entre os eixos dianteiro e traseiro. Essa característica influencia diretamente o comportamento do veículo, afetando sua resposta em curvas e a transferência de carga entre as rodas.

Uma bitola maior melhora a estabilidade em altas velocidades e reduz a inclinação lateral em curvas, enquanto uma menor facilita manobras em espaços reduzidos. No projeto de suspensões, especialmente do tipo Duplo A, a bitola pode sofrer pequenas variações devido ao deslocamento da manga de eixo, tornando essencial um ajuste preciso para equilibrar

desempenho e segurança. A Figura 7 ilustra um exemplo de bitola, demonstrando sua aplicação no contexto da suspensão.

Figura 7: Bitola.

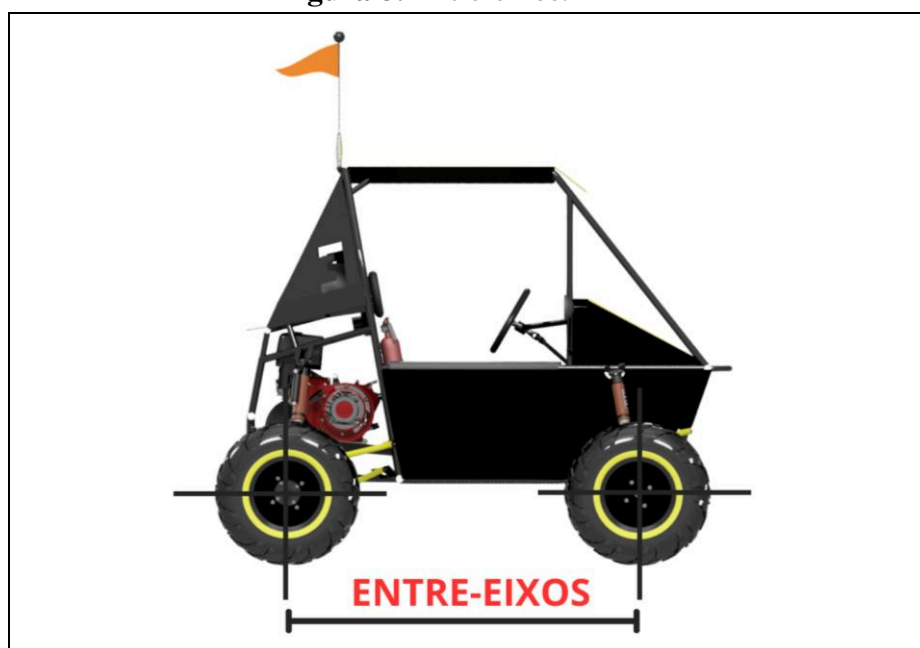


Fonte: Autoria própria.

2.4.4.2 Entre Eixo

A distância entre eixos é a medida linear entre os centros das rodas dianteiras e traseiras de um veículo, sendo um parâmetro fundamental no seu projeto, pois afeta a dinâmica e a distribuição de peso. Veículos com entre-eixos curtos tendem a ser mais ágeis e dinâmicos, facilitando manobras em espaços reduzidos, o que é vantajoso em competições e terrenos acidentados. Por outro lado, um entre-eixos mais longa melhora a estabilidade em altas velocidades e proporciona maior conforto aos ocupantes, reduzindo oscilações e impactos da pista.

Além disso, essa medida influencia a transferência de carga entre os eixos, o que afeta a tração e a distribuição de forças durante frenagens e acelerações. Segundo Nicolazzi (2008), a escolha do entre-eixos deve considerar o equilíbrio entre manobrabilidade e conforto, especialmente em veículos *off-road*, onde a adaptação a terrenos irregulares é essencial. A Figura 8 ilustra a medida do entre-eixos.

Figura 8: Entre-eixos.

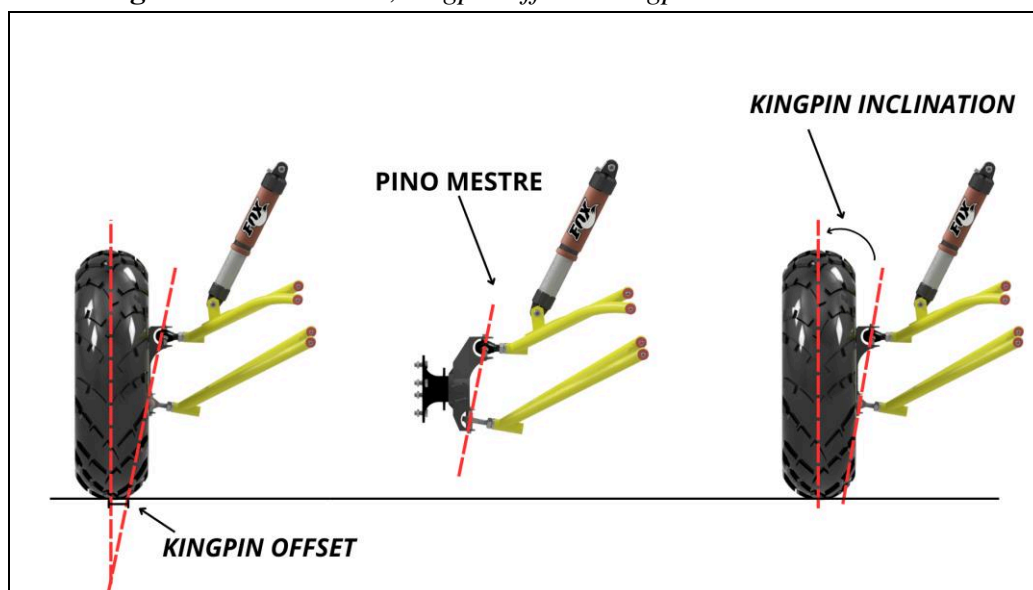
Fonte: Autoria própria.

2.4.4.3 Pino mestre

O pino mestre é um eixo imaginário que liga os pontos de articulação entre os braços de suspensão e a manga de eixo, funcionando como o eixo de rotação da roda. Sua inclinação influencia diretamente o comportamento do veículo, afetando tanto a estabilidade em curvas quanto o retorno do volante à posição central após uma manobra, fenômeno conhecido como autoalinhamento. Esse componente é essencial para garantir um equilíbrio adequado entre manobrabilidade e feedback do piloto, tornando a direção mais previsível e segura.

De acordo com Carvalho (2017), o pino mestre desempenha um papel fundamental na geometria da suspensão, pois sua posição impacta diretamente a dinâmica lateral do veículo. Quando visto pela frente, ele forma um ângulo com a vertical do solo, conhecido como *kingpin inclination*, que afeta a forma como a roda interage com o solo, melhorando o controle da direção. Além disso, o *kingpin offset*, que é a distância horizontal entre o centro da banda de rodagem do pneu e o ponto onde o prolongamento do pino mestre encontra o solo, influencia o torque de autoalinhamento das rodas, afetando a sensação de esforço ao girar o volante. Na Figura 9 ilustra a representação do pino mestre, *kingpin inclination* e *kingpin offset*.

Figura 9: Pino mestre, *kingpin offset* e *kingpin inclination*.

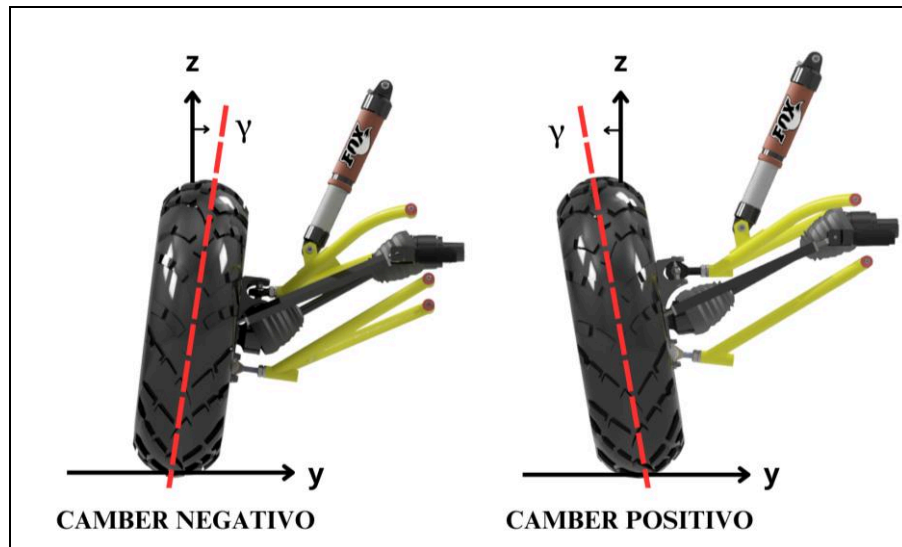


Fonte: Autoria própria.

2.4.4.4 Ângulo de *camber*

O ângulo de *camber* é a inclinação da roda em relação ao plano vertical do veículo quando visto de frente. Ele influencia diretamente o contato dos pneus com o solo e, consequentemente, a estabilidade e o desempenho em curvas. De acordo com Souza (2021), o *camber* negativo, quando a parte superior da roda se inclina para dentro, melhora a aderência nas curvas, reduzindo o risco de derrapagem. Já o *camber* positivo, com a parte superior da roda inclinada para fora, é mais comum em veículos pesados para compensar a deformação dos pneus e da suspensão sob carga.

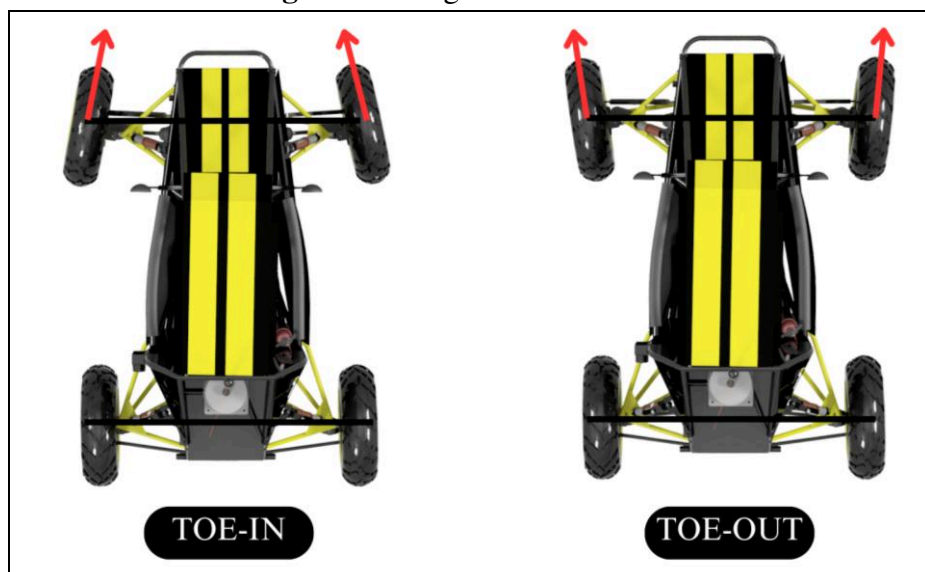
O ajuste inadequado do ângulo de *camber* pode comprometer o controle no volante e acelerar o desgaste dos pneus. Um *camber* excessivamente negativo pode causar desgaste irregular na parte interna dos pneus, enquanto um *camber* positivo exagerado pode prejudicar a estabilidade em curvas. Além disso, esse ângulo é representado pela letra grega γ (gama), indicando a variação da inclinação da roda em relação ao plano vertical do veículo. A correta configuração desse parâmetro é essencial para equilibrar aderência e desgaste, garantindo um desempenho eficiente em diferentes tipos de terreno. O *camber* também interage com outros parâmetros da suspensão, como o ângulo de *caster* e o *toe*, influenciando a dinâmica do veículo. A Figura 10 ilustra o ângulo de *camber* e suas variações.

Figura 10: Ângulo de *camber*.

Fonte: Autoria própria.

2.4.4.5 Ângulo de *toe*

O ângulo de *toe* refere-se ao alinhamento entre as rodas de um mesmo eixo, analisando sua posição relativa enquanto o veículo está em movimento. Esse ajuste é essencial para minimizar o atrito lateral entre os pneus e o solo, garantindo uma rodagem mais eficiente. Quando as extremidades dianteiras dos pneus estão inclinadas para dentro, o veículo apresenta convergência, também chamada de *toe in*. Por outro lado, se as extremidades estão voltadas para fora, ocorre a divergência, conhecida como *toe out* (Jazar, 2008). A Figura 11 ilustra esse parâmetro de forma clara.

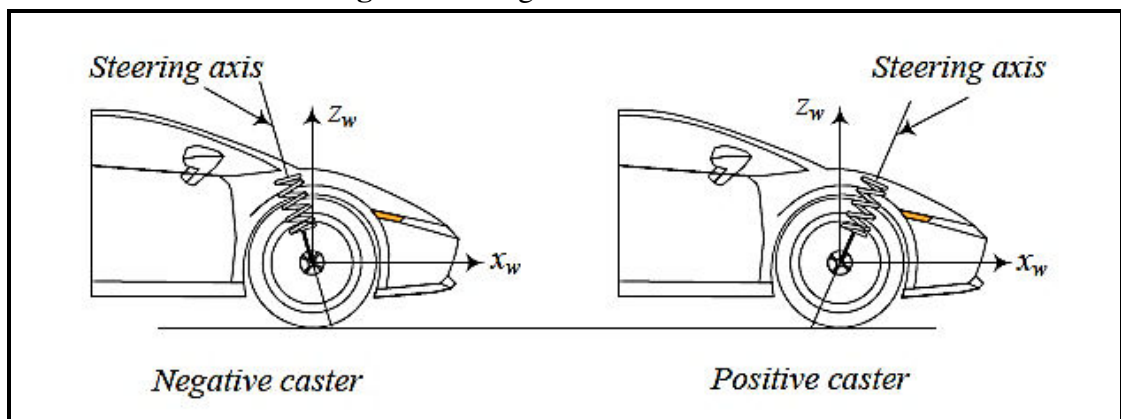
Figura 11: Ângulo de *toe*.

Fonte: Autoria própria.

2.4.4.6 Caster

O ângulo de *caster* é um parâmetro da geometria da suspensão que influencia na estabilidade e na absorção de impactos do veículo. Um *caster* negativo melhora o controle direcional, facilita o retorno das rodas à posição reta e ajuda na absorção de impactos, distribuindo melhor as forças na suspensão. No entanto, valores elevados podem tornar a direção mais pesada. Já um *caster* positivo deixa a direção mais leve, mas compromete a estabilidade. A escolha do *caster* varia conforme o tipo de veículo e as condições de uso, impactando diretamente a experiência de condução.

Figura 12: Ângulo de *caster*.

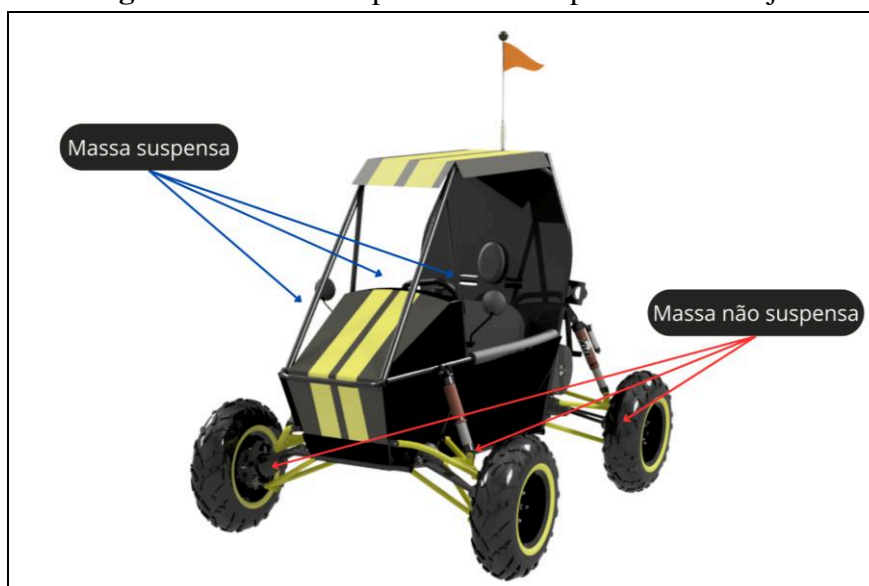


Fonte: Carvalho (2017).

2.4.5 Geometria de suspensão

A geometria da suspensão é um aspecto crucial do comportamento dinâmico de um veículo, determinando como a estrutura responde às forças externas e à interação com o solo. A suspensão define a conexão entre a massa suspensa, que inclui o chassi e os componentes suportados por ela, e a massa não suspensa, composta por rodas, pneus e partes da suspensão ligadas diretamente ao solo. Essa relação influencia a estabilidade, a dirigibilidade e a distribuição de carga entre as rodas. Na Figura 13 indica os componentes que são massa suspensa e não suspensa.

Figura 13: Massa suspensa e não suspensa de um baja.

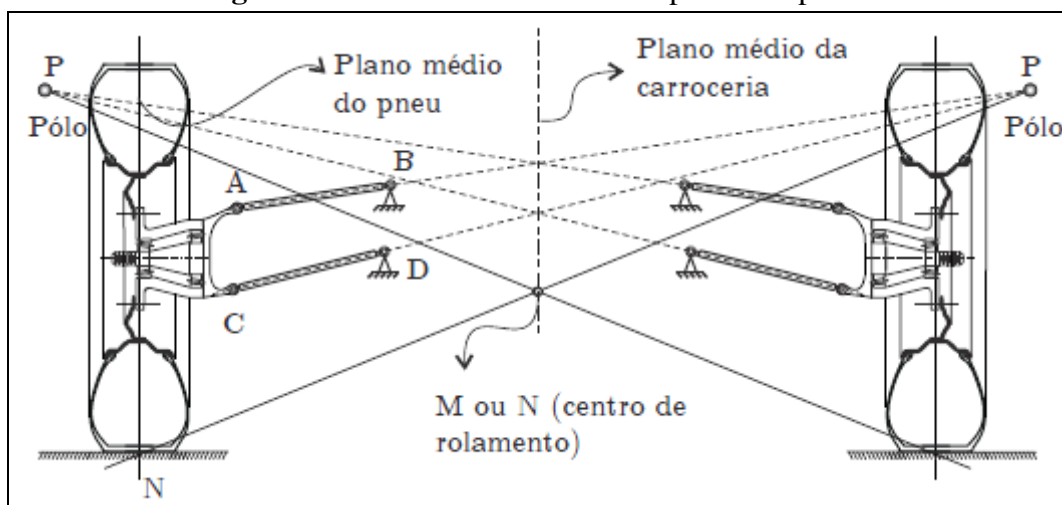


Fonte: Autoria própria.

Dentre os conceitos fundamentais da geometria da suspensão, destaca-se o centro instantâneo (CI), ponto em torno do qual a roda se move em um dado instante. Sua posição influencia diretamente a variação do ângulo de cambagem e, conseqüentemente, a aderência do pneu ao solo. O centro de rolamento (*roll center*) representa o ponto em que as forças laterais atuam na carroceria, afetando a rolagem do veículo em curvas. O eixo de rolamento (*roll axis*) é a linha imaginária que conecta os centros de rolamento dos eixos dianteiro e traseiro, determinando o comportamento do veículo em manobras e sua resistência ao rolamento lateral.

O correto posicionamento desses elementos permite otimizar a distribuição de forças, minimizar oscilações indesejadas e melhorar a resposta da suspensão em diferentes condições de terreno e condução. Na Figura 14 é mostrado um modelo representativo de uma geometria de suspensão duplo A.

Figura 14: Geometria frontal da suspensão duplo A.



Fonte: Nicollazi (2008).

2.5 Dinâmica Veicular

A dinâmica veicular estuda o comportamento do veículo sob diferentes condições de movimento, dividindo-se em três categorias: vertical, lateral e longitudinal. Esses aspectos são essenciais para a segurança, estabilidade e conforto, influenciando diretamente o desempenho do veículo em diversas situações de condução.

A dinâmica vertical analisa o impacto das irregularidades do solo, sendo crucial para conforto e estabilidade. Envolve o deslocamento da suspensão, além de oscilações como *bounce*, arfagem (*pitch*) e rolagem (*roll*). Segundo Diniz (2014), avalia como o veículo responde a excitações externas, como irregularidades da pista, e internas, como vibrações do motor, otimizando a interação entre a suspensão e o solo.

A dinâmica lateral envolve as forças durante curvas e mudanças de trajetória, afetando a estabilidade do veículo, gerando subesterçamento, sobreesterçamento ou comportamento neutro. O centro de gravidade e o posicionamento dos eixos influenciam diretamente a distribuição dessas forças, impactando a dirigibilidade e segurança.

A dinâmica longitudinal estuda as forças durante aceleração e frenagem, analisando a transferência de carga e parâmetros como o centro de gravidade e geometrias como *anti-squat* e *anti-dive*, que controlam a inclinação da carroceria, melhorando a performance e estabilidade durante essas manobras.

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

Este trabalho teve como objetivo analisar três geometrias de suspensão dianteira diferentes para o protótipo *off-road* baja SAE da equipe Caraubaja. A abordagem adotada baseou-se em estudos bibliográficos, modelagem de diferentes geometrias de suspensão e simulações dinâmicas, visando analisar o comportamento e o desempenho do sistema veicular com base na variação de parâmetros de suspensão.

3.1 Objeto de estudo

A equipe Caraubaja SAE, formada por estudantes da UFERSA, se destaca no desenvolvimento de protótipos para a competição Baja SAE, com foco em inovação e aprimoramento contínuo. Desde 2015, busca otimizar seus subsistemas, com ênfase na suspensão, essencial para o desempenho em competições. Como parte desse aprimoramento, a equipe projetou um conjunto de suspensão que garante maior controle e estabilidade em terrenos irregulares.

O protótipo possui uma suspensão dianteira do tipo duplo A e uma suspensão traseira também do tipo duplo A, acompanhada de uma barra guiadora. Seu chassi tubular, fabricado em aço SAE 1020, é complementado por um trem de força composto por um motor Honda GX390, um CVT Gaged GX9 e um conjunto de pinhão e coroa de duplo estágio. Além disso, conta com um sistema de direção mecânica do tipo pinhão-cremalheira. A Tabela 1 apresenta os parâmetros iniciais do protótipo (Severo) da equipe Caraubaja.

Tabela 1: Parâmetros iniciais do Severo.

Entre eixos	1450 mm
Bitola dianteira	1330 mm
Bitola traseira	1300 mm
Vão livre	385 mm
Ângulo de <i>Caster</i>	15°
<i>Kingpin offset</i>	36,6 mm
Raio do Pneu	292,1 mm
Largura do Pneu	177,8 mm
Distância do CG (positivo para frente)	725 mm
Altura do <i>Roll Center</i>	420 mm
Peso total (sem condutor)	180 Kg

Fonte: Autoria própria.

No entanto, o objeto de estudo desse trabalho é a geometria da suspensão dianteira do protótipo Severo, da equipe Caraubaja. A análise da geometria da suspensão dianteira é fundamental para entender como as variações da altura do centro instantâneo (CI) podem afetar o comportamento do protótipo. Alterações nesse parâmetro podem melhorar a performance do veículo e diminuir as variações de *toe* e *camber*, aumentar sua capacidade de absorver impactos e melhorar a estabilidade nas provas.

3.2 Ferramentas utilizadas

Este trabalho foi conduzido utilizando ferramentas e softwares que auxiliaram o desenvolvimento deste trabalho e na análise do comportamento da geometria da suspensão dianteira do protótipo Severo. As ferramentas escolhidas permitem realizar planejamento de atividades, modelagens geométricas, simulações dinâmicas e análises de desempenho.

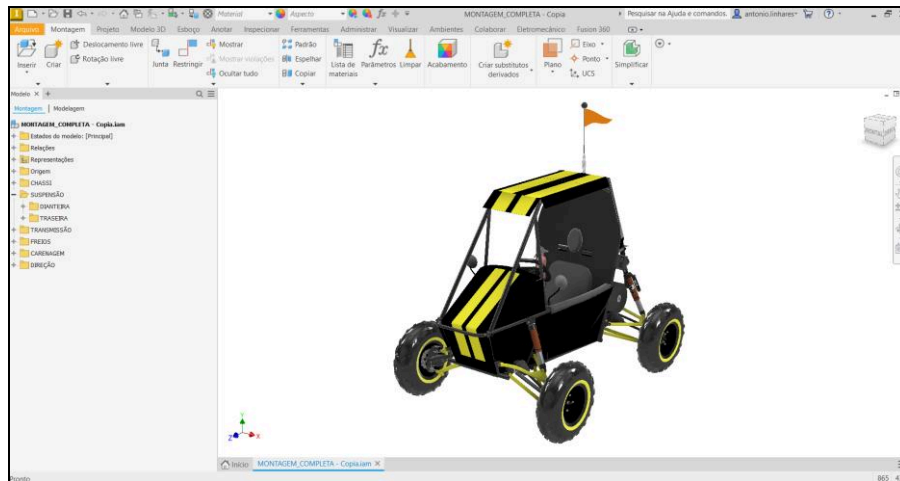
3.2.1 JIRA

Para organizar e monitorar as etapas do projeto, foi utilizada a plataforma JIRA, desenvolvida pela *Atlassian*. A ferramenta permitiu a criação, atribuição e acompanhamento das tarefas, garantindo que as atividades fossem realizadas de forma estruturada e dentro dos prazos estabelecidos. O JIRA também possibilitou a personalização dos fluxos de trabalho, facilitando a gestão eficiente das etapas do projeto. Dessa forma, a plataforma auxiliou na manutenção, controle e a organização ao longo do desenvolvimento do trabalho.

3.2.2 Autodesk Inventor

Para a modelagem das geometrias da suspensão, foi utilizado o *software Autodesk Inventor*, uma ferramenta para design 3D e 2D. O Autodesk Inventor permite a criação de modelos tridimensionais, facilitando o desenvolvimento e a análise dos componentes mecânicos. Com ele, foi possível criar representações das peças de suspensão, realizar montagens e análises volumétricas. Na Figura 15 é mostrado a interface do *software* com a montagem do protótipo.

Figura 15: Interface do Autodesk Inventor.



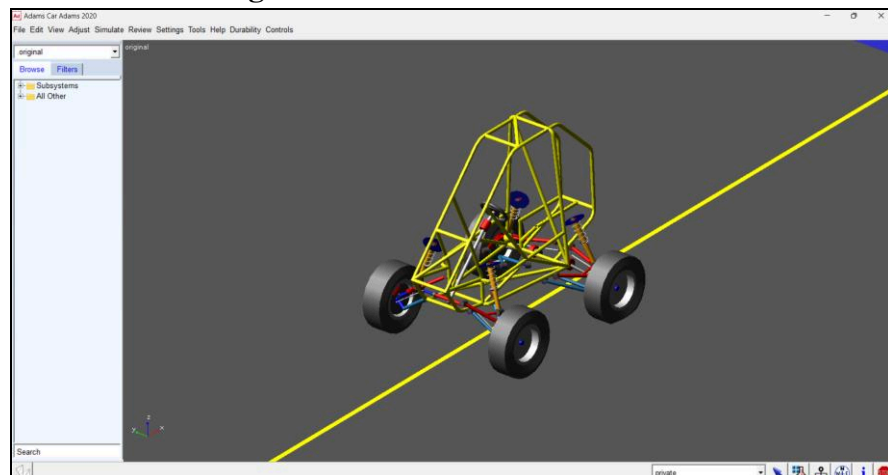
Fonte: Autoria própria.

3.2.3 MSC ADAMS CAR

Para a análise dinâmica e simulação do comportamento da suspensão dianteira, foi utilizado o software MSC Adams Car. Se trata de uma ferramenta avançada de Simulação dinâmica de multicorpos (*multibody system dynamics*) que permite modelar e simular o desempenho de sistemas mecânicos complexos, como o sistema de suspensão de veículos.

Através deste software, foi possível realizar simulações dinâmicas para avaliar como a geometria da suspensão dianteira responde a diferentes condições de operação, como forças de impacto, aceleração e frenagem. As simulações forneceram dados importantes sobre o comportamento da suspensão, como a trajetória das rodas, a distribuição de cargas e a estabilidade do veículo, permitindo ajustes finos na geometria para melhorar o desempenho geral do protótipo. Na Figura 16 é apresentado a interface com um modelo de baja montado no software.

Figura 16: Interface do Adams Car.

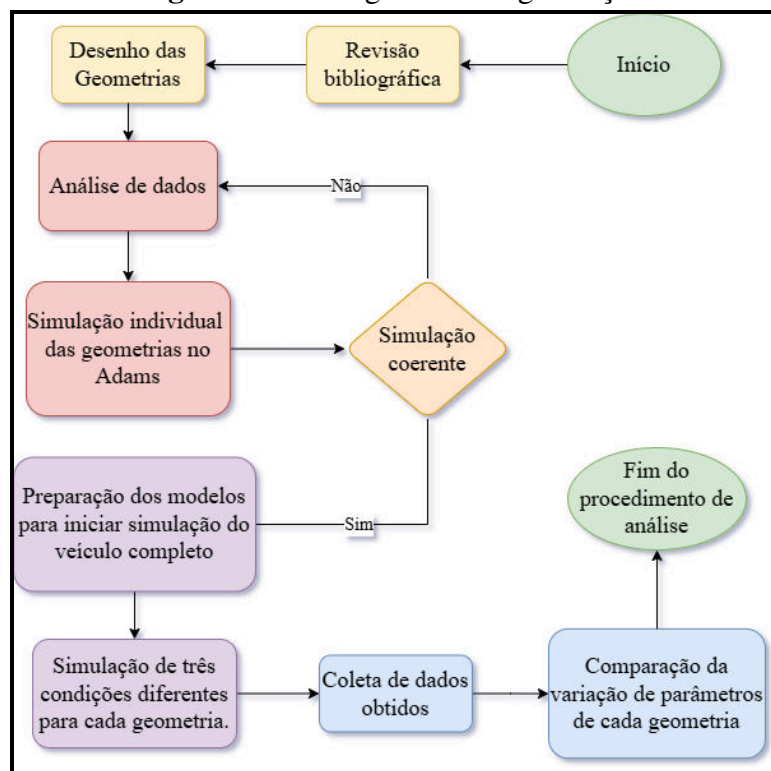


Fonte: Autoria própria.

3.3 Metodologia aplicada

Para atingir os objetivos propostos, a metodologia adotada inclui as seguintes etapas mostradas no fluxograma da Figura 17.

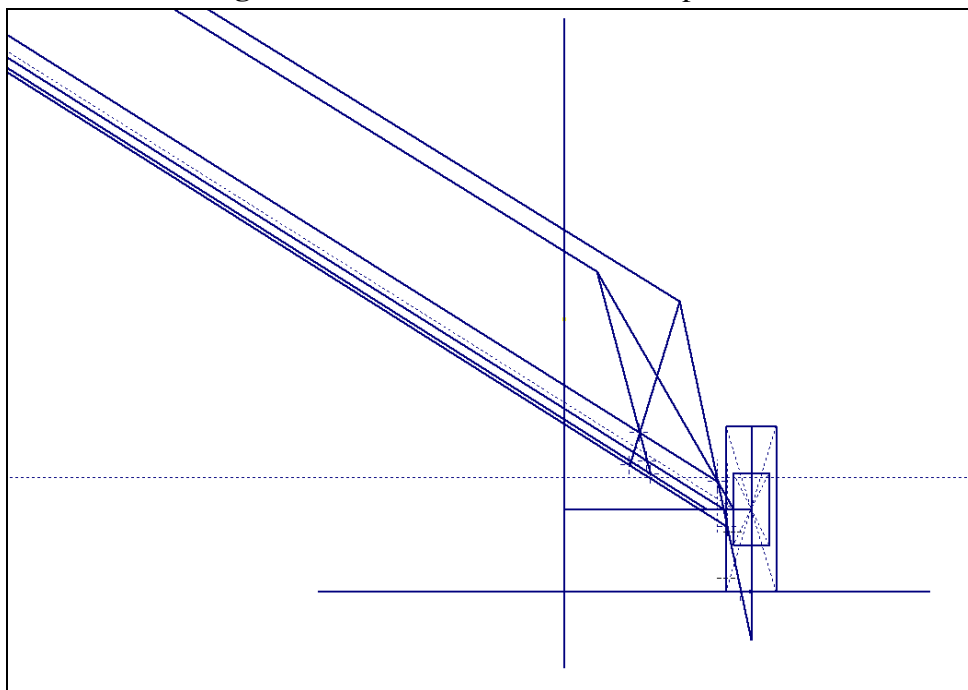
Figura 17: Fluxograma de organização.



Fonte: Autoria própria.

Ao iniciar o projeto, a primeira etapa envolve uma revisão bibliográfica, na qual são pesquisadas referências técnicas e científicas sobre sistemas de suspensão, dinâmica veicular, geometrias de suspensão e sua influência no comportamento do veículo. Esses estudos são essenciais para embasar as escolhas de modelagem e simulação, garantindo que os parâmetros adotados reflitam as condições reais de operação do veículo.

A partir dessas informações, inicia-se a etapa de desenho das geometrias, na qual foi utilizada como base a geometria da suspensão dianteira do protótipo Severo, da equipe caraubaja. Com essa configuração inicial, foram desenvolvidas duas novas variações, mantendo a mesma estrutura, mas modificando apenas a altura do centro instantâneo (CI). Essas alterações permitem avaliar como diferentes posições do CI influenciam o comportamento dinâmico da suspensão. Na Figura 18 é apresentado o desenho da geometria de suspensão utilizada como referência.

Figura 18: Geometria de base da suspensão.

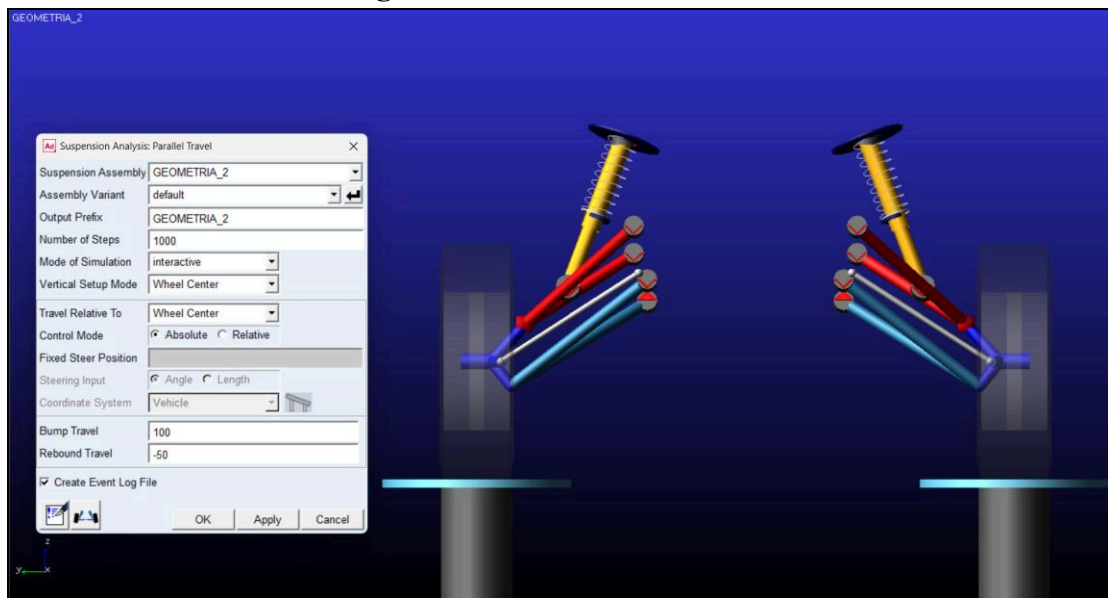
Fonte: Autoria própria.

A altura do CI foi variada em 20% para cima e 20% para baixo em relação à geometria base, que será chamada de geometria 1. A geometria com a altura aumentada será chamada de geometria 2, e a com a altura reduzida será a geometria 3.

A altura do CI ao piso da geometria 1 é de 36014 mm, logo a geometria 2 apresenta uma variação de 20% para cima na altura do Centro Instantâneo (CI) em relação à geometria base, resultando em um valor de 43216,8 mm. Por outro lado, a geometria 3 apresenta uma variação de 20% para baixo na altura do CI, com o valor de 28811,2 mm.

Antes de prosseguir para a simulação, é realizada uma análise de dados preliminar para garantir que as geometrias atendem aos requisitos estabelecidos. Caso necessário, ajustes são feitos para evitar inconsistências que possam comprometer os resultados. Com as geometrias validadas, cada uma passa por uma simulação individual estática no *Adams car*, onde seu comportamento é avaliado separadamente por meio da simulação *Parallel wheel travel*. Na Figura 19 é mostrado uma representação do modelo e as configurações utilizadas para realizar a simulação.

Figura 19: *Parallel wheel travel.*

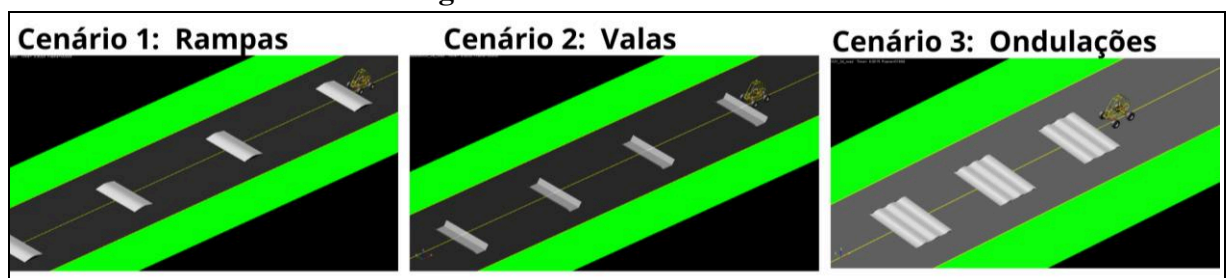


Fonte: Autoria própria.

Após essa fase, os resultados foram analisados para verificar se as simulações apresentaram coerência com as expectativas do projeto. Se os dados não forem consistentes, ajustes são feitos e a análise retorna à fase de validação. Caso os resultados sejam satisfatórios, os modelos são preparados para a simulação com o veículo completo, onde todos os componentes interagem.

Na etapa referente a simulação (*Full-Vehicle*), foram aplicadas três condições de simulação distintas para cada geometria, com o objetivo de avaliar o desempenho dos diferentes modelos sob múltiplos cenários de terrenos e obstáculos. As simulações realizadas utilizaram pistas específicas, com características que simulam condições adversas para o comportamento do sistema de suspensão. As pistas escolhidas incluíram rampas, valas e ondulações. Na Figura 20 serão mostradas as pistas utilizadas nas simulações.

Figura 20: Cenários utilizados.



Fonte: Autoria própria.

Antes de realizar as simulações, foi definido um conjunto de parâmetros iniciais do veículo completo, que incluíram características como o peso total do veículo, rigidez dos pneus e das molas, amortecedores, e as demais configurações do Severo (Tabela 2).

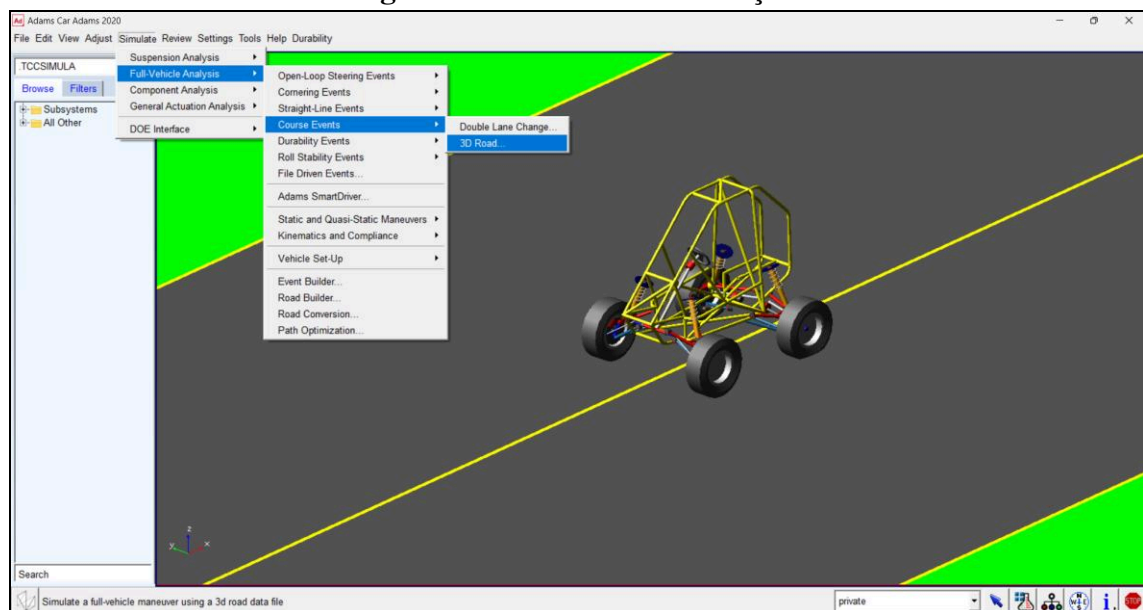
Tabela 2: Parâmetros utilizados na simulação.

Pressão do pneu dianteiro	5 psi
Pressão do pneu traseiro	25 psi
Pressão do amortecedor dianteiro	50 psi
Pressão do amortecedor traseiro (Extensão)	110 psi
Pressão do amortecedor traseiro (Compressão)	200 psi

Fonte: Autoria própria.

A simulação utilizada é a “*Full-Vehicle Analysis > Course Events > 3D Road*”, conforme ilustrado na Figura 21, essa simulação gera um modelo tridimensional do veículo e o submete a diferentes condições dinâmicas, permitindo a análise do seu comportamento em situações realistas.

Figura 21: Caminho da simulação.



Fonte: Autoria própria.

As configurações utilizadas nessa simulação são apresentadas na Figura 22, utilizando o *Assembly Variant* como *default* e as outras configurações escolhidas pelo usuário.

Figura 22: Configuração da simulação de veículo completo (*Full-Vehicle*).

Vehicle Assembly	TCCSIMULA
Assembly Variant	default
Output Prefix	TesteG1
End Time / Duration	8 [Sec]
Number of Steps	10000 [-]
Analysis Mode	interactive
Road Data File	mdids://MiniBaja/roads.tbl/SINE.xml
Velocity	25 km/hr
Gear Position	2
☒ Quasi-Static Straight or Skidpad Set-Up	
Lateral Path Offset	0.1
Speed Control	DCD File
Driver Data File	mdids://acar_shared/driver_data.tbl/velocity
☒ Create Event Log File	☒ Add Vehicle Dynamics Requests
	☐ Compute Characteristic Values

OK Apply Cancel

Fonte: Autoria própria.

Logo, os dados obtidos dessas simulações foram então coletados e organizados para posterior análise. Com essas informações, procedeu-se à comparação da variação dos parâmetros de cada geometria, identificando tendências e variações relevantes no desempenho do veículo em resposta a esses cenários distintos.

Por fim, o estudo é concluído com a finalização do procedimento de análise, onde os resultados são sintetizados e interpretados para auxiliar na tomada de decisões sobre o desempenho das geometrias avaliadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

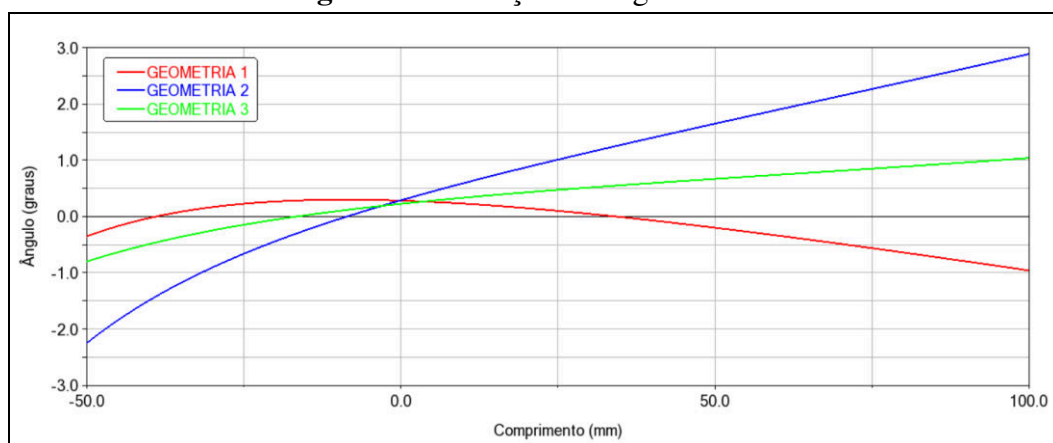
As simulações no Adams Car permitiram analisar a variação dos ângulos de *camber*, *toe* e *caster* em diferentes condições para cada geometria de suspensão, além de conseguir realizar análises e verificações de qual geometria trouxe um melhor desempenho para o veículo. Os resultados demonstram como essas alterações influenciam o comportamento dinâmico do protótipo.

4.1 Análise das geometrias de suspensão dianteiras em simulação *parallel wheel travel*

Os seguintes resultados foram obtidos a partir da simulação estática das geometrias da suspensão dianteira, considerando a condição de deslocamento máximo da suspensão (*rebound e bump*). A Figura 23 apresenta a variação do ângulo de *toe* em função do deslocamento da suspensão. Nessas simulações, foram analisados exclusivamente os modelos da suspensão dianteira.

A comparação entre as três geometrias permite avaliar como cada configuração influencia a convergência e divergência das rodas ao longo do curso da suspensão, no entanto, a análise feita se trata apenas do comportamento da roda do lado esquerdo.

Figura 23: Variação do ângulo de *toe*.

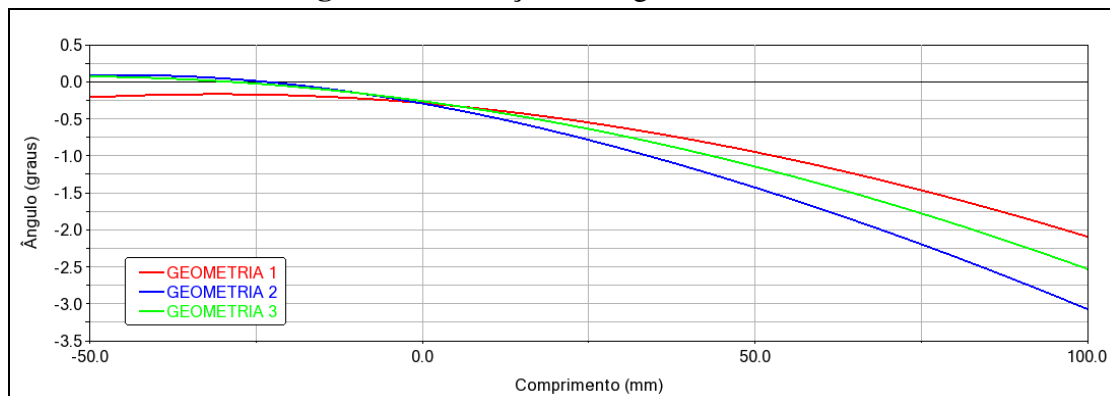


Fonte: Autoria própria.

Usando como métrica de estudo, o valor dos máximos e dos mínimos atingidos por cada geometria. Na geometria 1, com o CI em sua configuração original, tem uma variação mais próxima de zero, tendo seus picos máximo de 0,29° e a mínimo de -0,95°. Na geometria 2, onde o CI tem maior altura, observa-se um aumento progressivo do *toe-in* variando de -2,25° a 2,88°. Já na geometria 3, com o CI mais baixo, o movimento provoca um *toe-in* bem mais estável em comparação com a geometria 2, iniciando com -0,8° e atingindo seu pico com 1,04°. Essa variação acontece devido a mudança da posição dos pontos de suspensão,

ocasionando essa diferença de *toe* inicial quando a suspensão está em sua máxima extensão. Na Figura 24 é mostrado a variação do *camber* aplicado as mesmas condições.

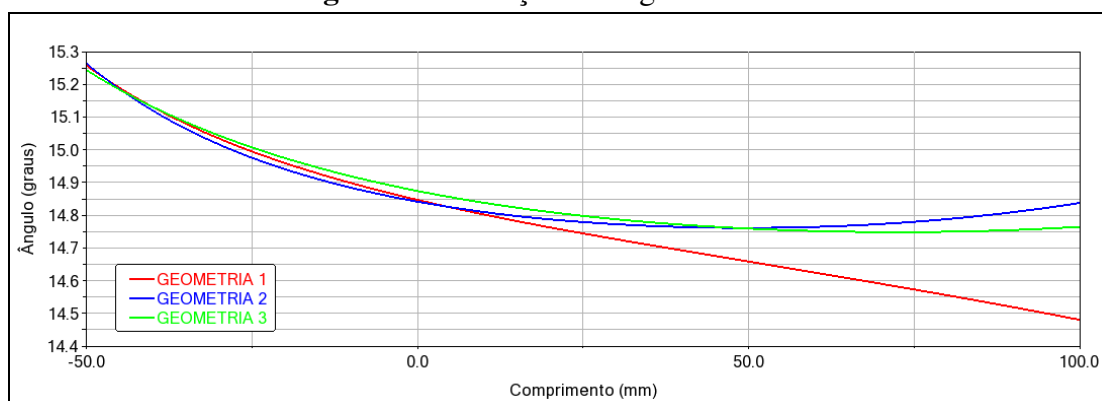
Figura 24: Variação do ângulo de *camber*.



Fonte: Autoria própria.

O *camber* também varia em função da posição do CI e apresentou um comportamento semelhante nas três geometrias analisadas. A geometria 1 obteve uma variação de $-0,16^\circ$ para $-2,1^\circ$, ela se manteve com uma variação de *camber* negativa durante todo o percurso da roda. Já na geometria 2 e 3, tiveram uma variação de positiva para negativa iniciando do mesmo ponto ($0,1^\circ$), no entanto, a geometria 2 teve uma variação final de $-3,0^\circ$ enquanto a geometria 3 variou até $-2,5^\circ$. Na Figura 25 ilustra a variação do *caster* aplicado as mesmas condições.

Figura 25: Variação do ângulo de *caster*.



Fonte: Autoria própria.

O gráfico mostra que o *caster* diminui em todas as geometrias à medida que a suspensão comprime. A geometria 1 foi a que teve uma maior variação, chegando a um *caster* de $14,48^\circ$ na compressão máxima, já a geometria 2 teve a menor variação onde na compressão máxima da suspensão ficou com uma angulação de $14,8^\circ$ foi a que se mantém mais estável, a geometria 3 tem um comportamento semelhante a 2, mudando um pouco a angulação para $14,7^\circ$.

4.2 Análise dos resultados das simulações (*Full-Vehicle*)

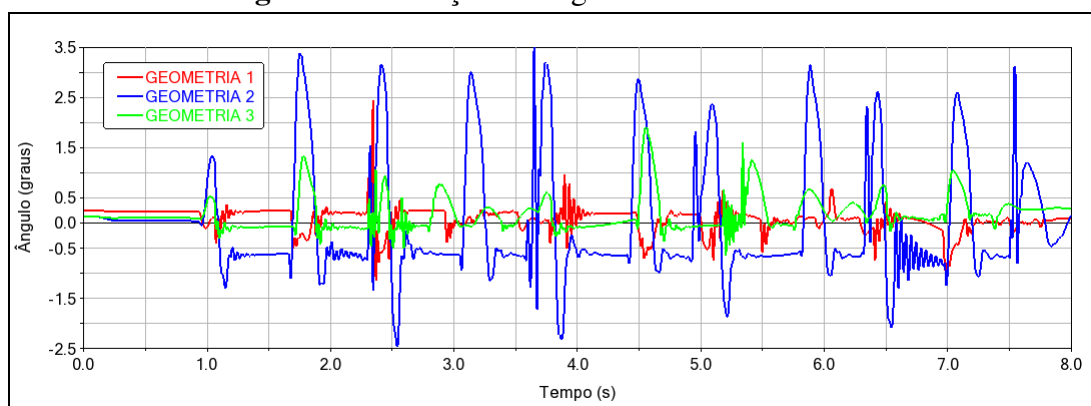
A simulação *Full-Vehicle* permite analisar o comportamento das massas suspensas e não suspensas do veículo. Esse tipo de simulação é fundamental para avaliar o desempenho da suspensão em diferentes condições, visando encontrar uma geometria que minimize a variação dos parâmetros ao longo do movimento.

Para a análise dos resultados, foram utilizadas métricas de estudo que possibilitam uma avaliação objetiva e comparável do desempenho do veículo. Essas métricas auxiliam na identificação de variações nos parâmetros da suspensão e na validação dos modelos simulados, garantindo maior precisão na interpretação dos resultados. A seguir, são apresentados os resultados das simulações, evidenciando a influência de cada parâmetro na dinâmica vertical e longitudinal do veículo.

4.2.1 Análise dos parâmetros no cenário 1 (rampas)

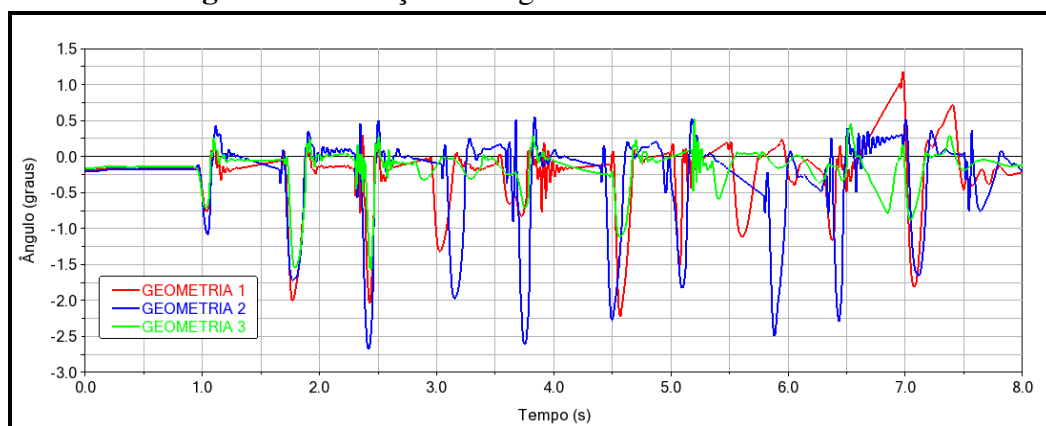
A simulação foi inicialmente conduzida na pista com rampas, a fim de analisar o comportamento dos parâmetros. Os pontos de picos representam o momento em que está subindo na rampa ou após impactar no chão. A Figura 26 mostra a variação do ângulo de *toe* para as três geometrias na primeira condição de teste.

Figura 26: Variação do ângulo de *toe* no cenário 1.



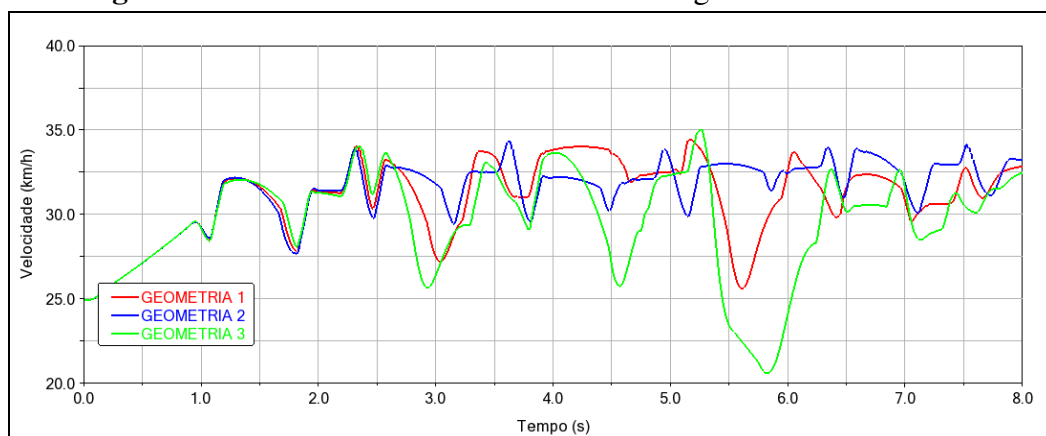
Fonte: Autoria própria.

Os gráficos da Figura 26 foram avaliados com base na métrica dos valores de RMS (*Root Mean Square*) e picos máximo de variação. A geometria 1 (RMS 0,246) teve um pico máximo de 2,44°, mas é a que apresenta a menor variação do *toe*, se mantendo mais constante durante o percurso. A geometria 2 (RMS 1,18) é a que apresenta os maiores picos de variação chegando em até 3,5° de *toe*, já a geometria 3 (RMS 0,377) possui um comportamento semelhante a primeira só que com uma variação um pouco maior e um pico máximo menor de 1,91°. Na Figura 27, com a mesma simulação, apresenta a variação do ângulo de *camber*.

Figura 27: Variação do ângulo de *camber* no cenário 1.

Fonte: Autoria própria.

Analisando o gráfico do ângulo de *camber* durante saltos em rampas, a geometria 1 (RMS 0,524) ao passar nas rampas ou impactar no chão, foi a que teve o maior pico de *camber* positivo chegando a $1,18^\circ$ e um pico mínimo de $-2,23^\circ$. A geometria 2 com uma métrica de RMS equivalente a 0,686, foi a que se manteve menos estável, além de atingir um pico mínimo de $-2,67^\circ$. Já a geometria 3 (RMS 0,318) foi a que teve menor variação de *camber* e atingiu um pico mínimo de $-1,57^\circ$. Na Figura 28 é apresentado o desenvolvimento da velocidade longitudinal nas rampas ao longo do tempo.

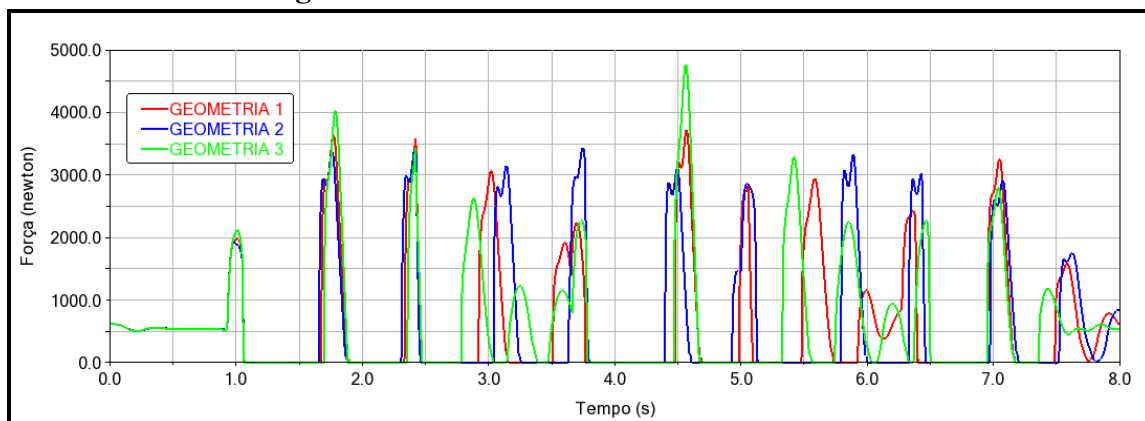
Figura 28: Desenvolvimento da velocidade longitudinal no cenário 1.

Fonte: Autoria própria.

Utilizando como métrica de estudo os valores de Avg (média) para avaliar o desenvolvimento da velocidade de cada geometria, cada uma possui uma velocidade inicial de 25 km/h. A geometria 1 demonstra uma redução da velocidade depois dos 5 segundos e possui uma velocidade média de 30,99 km/h. A geometria 2 apresenta variações bem menores, com uma média de 31,38 km/h, sendo a que teve o melhor desenvolvimento. Já a

geometria 3 sofre uma queda de velocidade após 5 segundos devido a uma possível perda de estabilidade ao saltar as rampas, reduzindo para 20,58 km/h, uma velocidade menor que a inicial além de possuir uma média de 29,61 km/h, indicando menor capacidade de manter a velocidade ao longo de um percurso. Na Figura 29 é apresentado o gráfico do contato da roda esquerda dianteira ao solo.

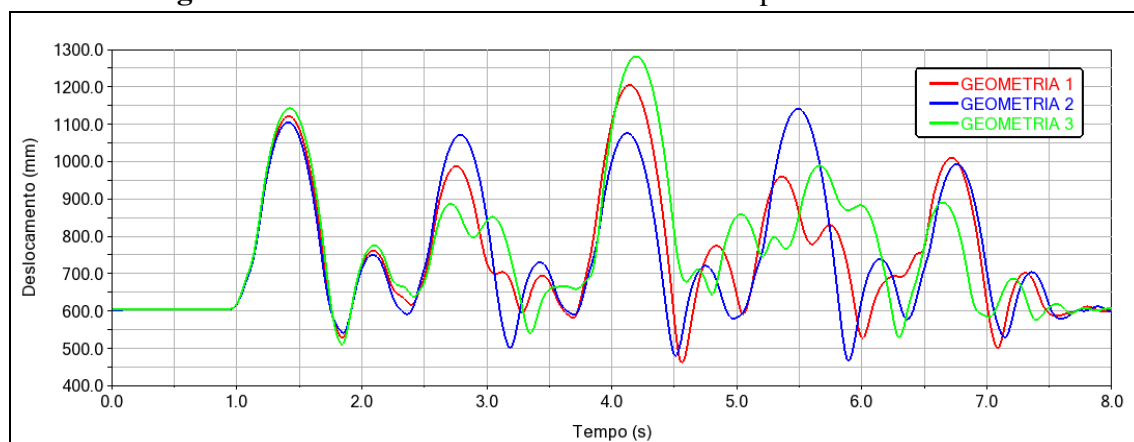
Figura 29: Contato da roda ao solo no cenário 1.



Fonte: Autoria própria.

Na geometria 1, o pico de força máxima é de 3718,3 N, devido ao impacto causado após o salto na rampa. Já geometria 2 mantém um padrão mais repetitivo, além de ter o menor pico em relação as outras geometrias, sendo ele de 3436,2 N. Já a geometria 3 tem impactos maiores atingindo o maior pico de 4767,8 N. Essas variações refletem nas diferenças da geometria de suspensão, visando menores impactos e baixas amplitudes de salto, na Figura 30 é mostrado o deslocamento vertical das massas suspensas.

Figura 30: Deslocamento vertical da massa suspensa no cenário 1.



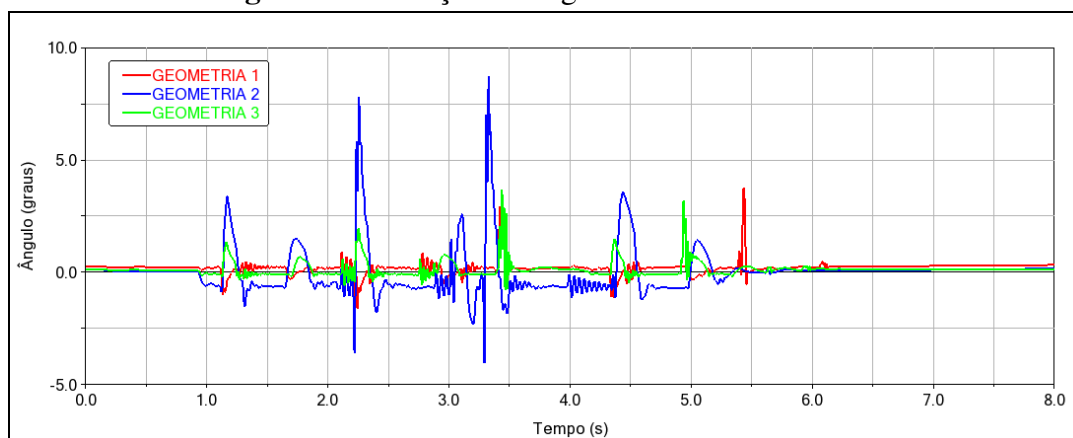
Fonte: Autoria própria.

Os picos do gráfico representam os momentos em que cada geometria do veículo atinge a maior altura ao passar pelas rampas, enquanto os vales indicam o retorno de contato com o solo, esse gráfico é proporcional ao da Figura 30. A geometria 1 apresenta o menor deslocamento de compressão, atingindo um pico mínimo de 461,24 mm no tempo 4,56 s. A geometria 2 exibe picos mais semelhantes e possui o pico máximo de deslocamento menor entre as três geometrias, sendo ele de 1141,2 mm. Já a geometria 3 atinge o maior deslocamento chegando a 1282 mm no tempo 4,2s.

4.2.2 Análise dos parâmetros no cenário 2 (valas)

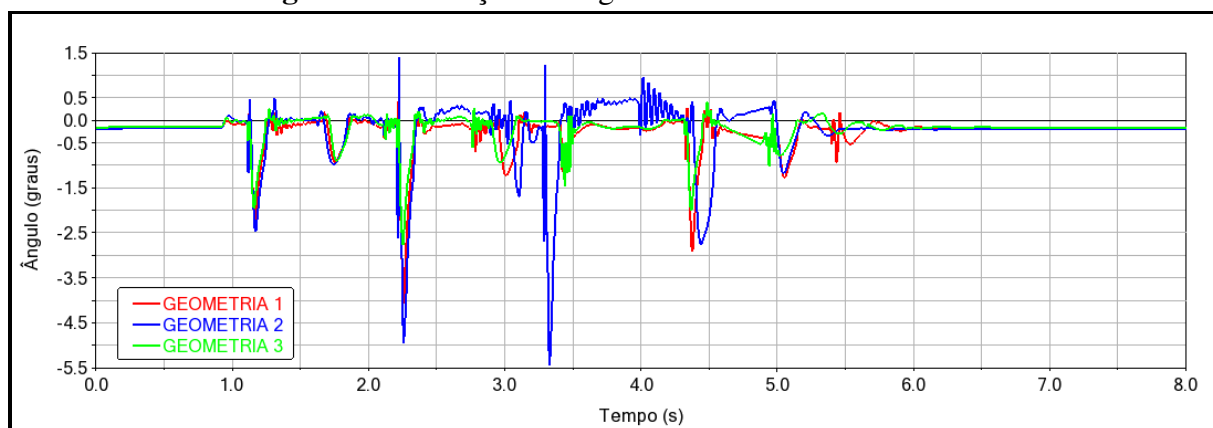
Foi realizado a simulação na pista com quatro valas de espaçamentos iguais a cada cinco metros, para avaliar como seria o comportamento dos parâmetros, a simulação foi feita com 8 segundos, que era o tempo necessário para o carro passar em todas as valas e se estabilizar. Na figura 31 ilustra a variação do *toe* das 3 geometrias na primeira condição.

Figura 31: Variação do ângulo de *toe* no cenário 2.



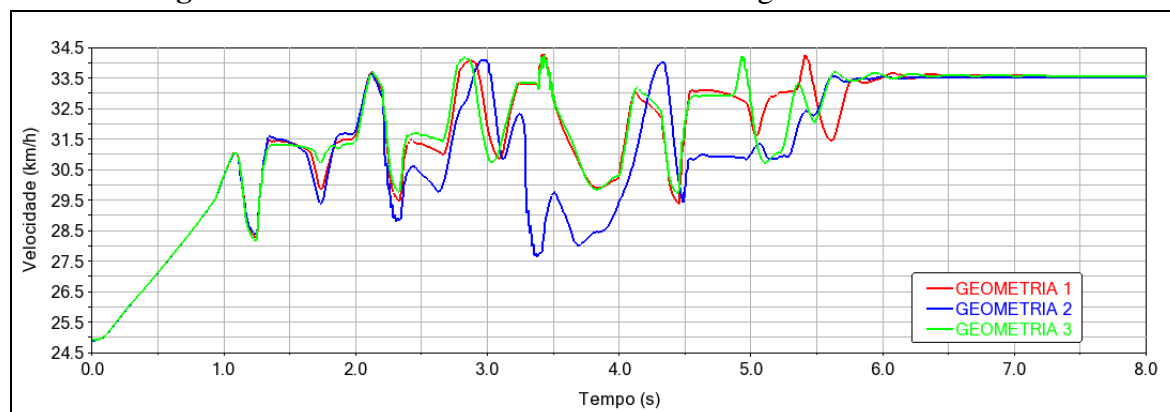
Fonte: Autoria própria.

Analisando o gráfico do ângulo de *toe* no cenário 2, avaliando pela métrica dos valores RMS (*root mean square*), observa-se que os picos de variação são causados pelos impactos das rodas nas irregularidades do terreno. A geometria 1, com menor RMS (0,377), demonstra um pico máximo de 3,78° no último obstáculo. Já a geometria 2, o RMS é 1,06 e é a que apresenta maior instabilidade, atingindo maiores picos de *toe-in* chegando a 8,7°. A geometria 3 (RMS de 0,358) é a que demonstra ser a mais estável e apresentando o menor pico de 3,6°. Na Figura 32 ilustra a variação do *camber* entre as Geometrias.

Figura 32: Variação do ângulo de *camber* no cenário 2.

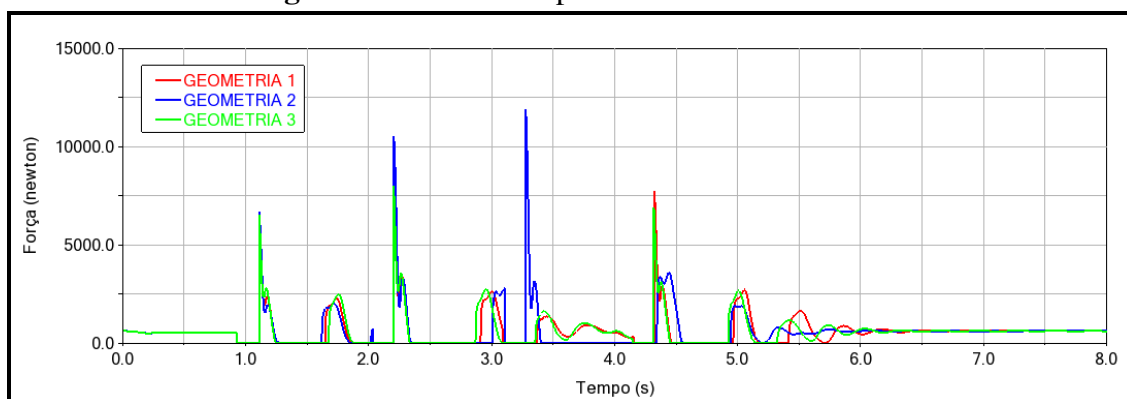
Fonte: Autoria própria.

A geometria 1, com valor de RMS (0,481), atingiu um pico mínimo de $-4,0^\circ$ em relação as outras geometrias, ela se classifica como intermediária. A geometria 2, com o maior RMS (0,695) e atingindo o pico de $-5,45^\circ$, demonstra a maior variação de *camber* devido aos impactos causados ao passar nas valas, tornando a geometria mais instável. A geometria 3, com RMS menor (0,365) e atingindo o menor pico de $-2,77^\circ$, exibe um comportamento mais estável. Na Figura 33 é feita a comparação do desenvolvimento de velocidade longitudinal do veículo.

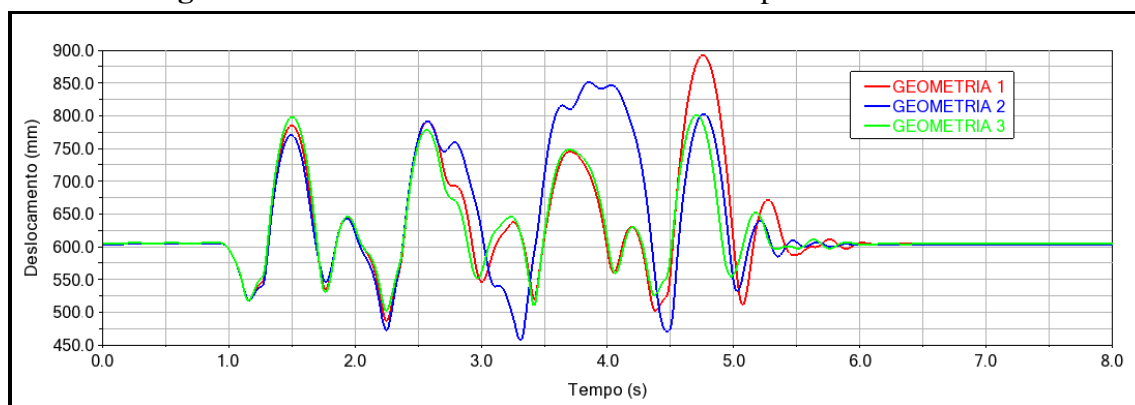
Figura 33: Desenvolvimento da velocidade longitudinal no cenário 2.

Fonte: Autoria própria.

A geometria 1 apresentou uma redução na velocidade após 3,5 s, resultando em uma média de 31,75 km/h. A geometria 2 demonstrou maiores variações ao longo do tempo e sofreu uma queda significativa na velocidade após 3 s, alcançando a menor performance entre as três, com uma velocidade média de 31,22 km/h. Já a geometria 3 teve um desenvolvimento semelhante a primeira, alcançando a maior média 31,76 km/h. A Figura 34 ilustra o gráfico do contato da roda dianteira esquerda com o solo ao passar pelas valas.

Figura 34: Contato do pneu ao solo no cenário 2.**Fonte:** Autoria própria.

Analisando o gráfico da força de contato do pneu com o solo, os picos representam os momentos em que a roda passa por um buraco e sofre impacto. A magnitude desses picos indica a intensidade da força exercida no momento do impacto. A geometria 1 apresenta picos menores e mais consistentes, sugerindo um contato mais estável, com um pico máximo de 9105,9 N. A geometria 2 exibe picos mais altos, atingindo 11.871,7 N no tempo 3,2 s, o que indica impactos mais fortes e momentos de perda de contato. Já a geometria 3 demonstra um comportamento mais estável, semelhante ao da geometria 1, com um pico máximo de 8019,8 N. O deslocamento vertical da massa suspensa é apresentado na Figura 35.

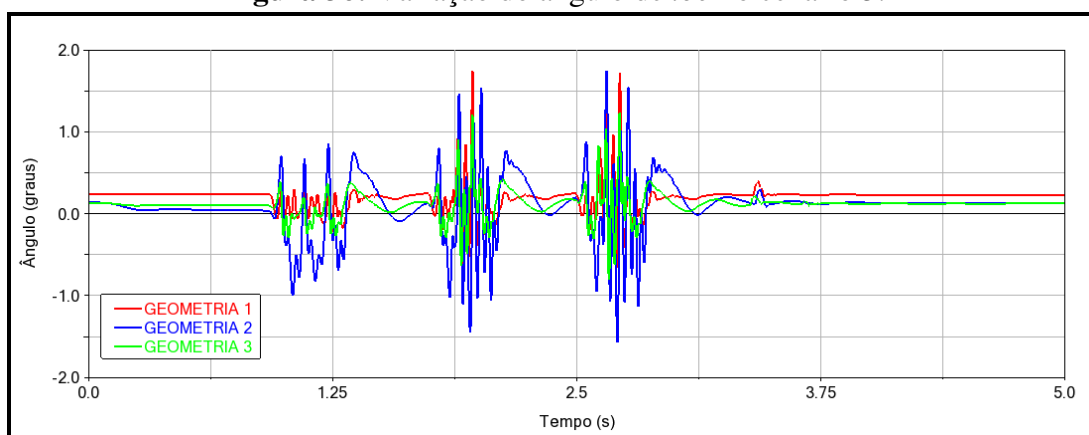
Figura 35: Deslocamento vertical da massa suspensa no cenário 2.**Fonte:** Autoria própria.

A geometria 1 apresenta deslocamentos estáveis com uma média de 627,1 mm, atingindo um pico máximo de 892,5 mm no tempo 4,7 s devido ao impacto no último obstáculo. A geometria 2 exibe oscilações mais acentuadas com uma média de 635 mm e possui o menor pico máximo de deslocamento entre as três configurações, com um valor de 457,7 mm. Já a geometria 3 apresenta a menor média de 623,8 mm, alcançando 800,6 mm.

4.2.3 Análise dos parâmetros no cenário 3 (ondulações)

A simulação foi realizada inicialmente em uma pista com três obstáculos de ondulações a cada cinco metros, a simulação foi feita com 5 segundos de duração, sendo o tempo necessário para o carro passar nos obstáculos e estabilizar, ela tem como objetivo analisar o comportamento do veículo quando exposto a vibrações. A Figura 36 apresenta a variação do ângulo de *toe* para as três geometrias na primeira condição de teste.

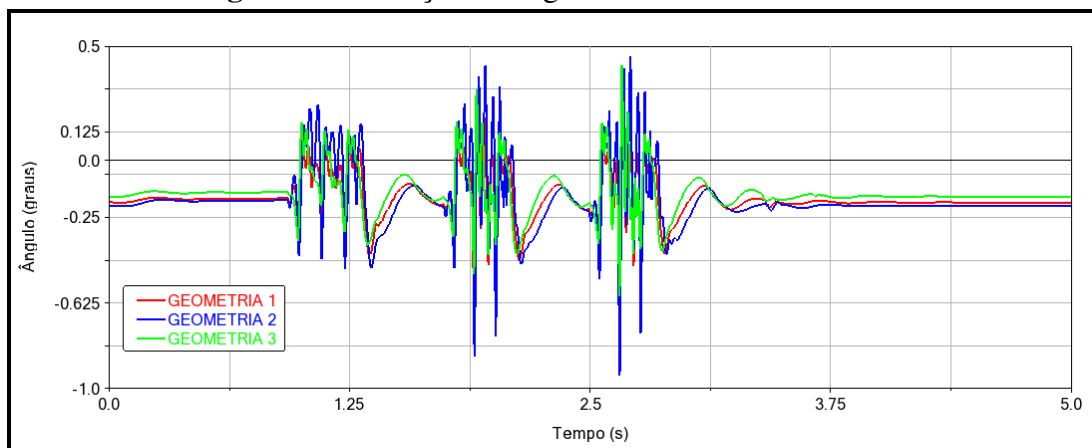
Figura 36: Variação do ângulo de *toe* no cenário 3.



Fonte: Autoria própria.

A geometria 1 (RMS 0,269) apresenta uma variação intermediária em relação as outras geometrias. A geometria 2 (RMS 0,346) tem a maior variação, refletindo maior sensibilidade às ondulações da pista. Já a geometria 3 (RMS 0,188) tem a menor variação, refletindo melhor estabilidade nas ondulações. Os picos no gráfico ocorrem devido ao impacto com as ondulações, influenciando o comportamento do alinhamento das rodas. Na Figura 37 é mostrado a variação do ângulo de *camber*.

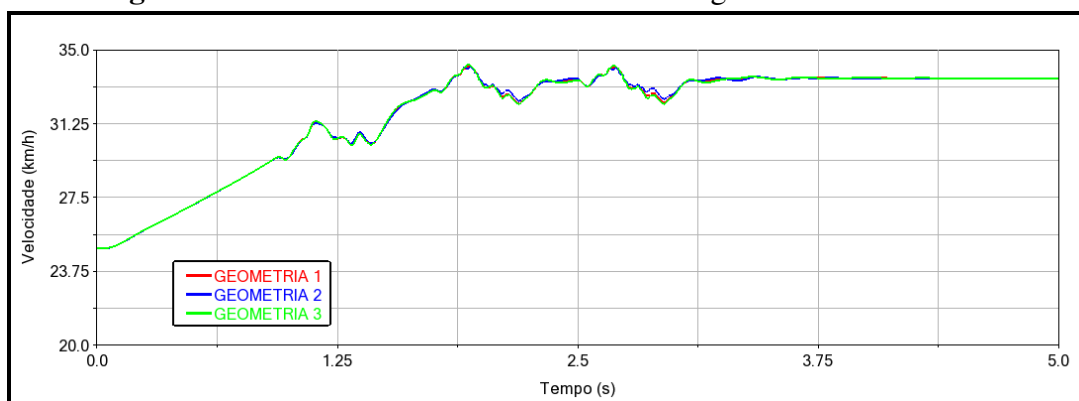
Figura 37: Variação do ângulo de *camber* no cenário 3.



Fonte: Autoria própria.

A geometria 1, com um RMS de (0,190), apresentou um comportamento intermediário em termos de variação do ângulo de *camber*. A geometria 2, que obteve o maior RMS (0,216), exibiu as maiores oscilações, indicando uma maior sensibilidade aos impactos ao passar pelos obstáculos. Esse comportamento sugere uma menor estabilidade da geometria. Já a geometria 3, com o menor RMS (0,171), demonstrou variações mais controladas, indicando um comportamento mais estável ao longo do percurso. A Figura 38 apresenta a velocidade longitudinal das três geometrias.

Figura 38: Desenvolvimento da velocidade longitudinal no cenário 3.

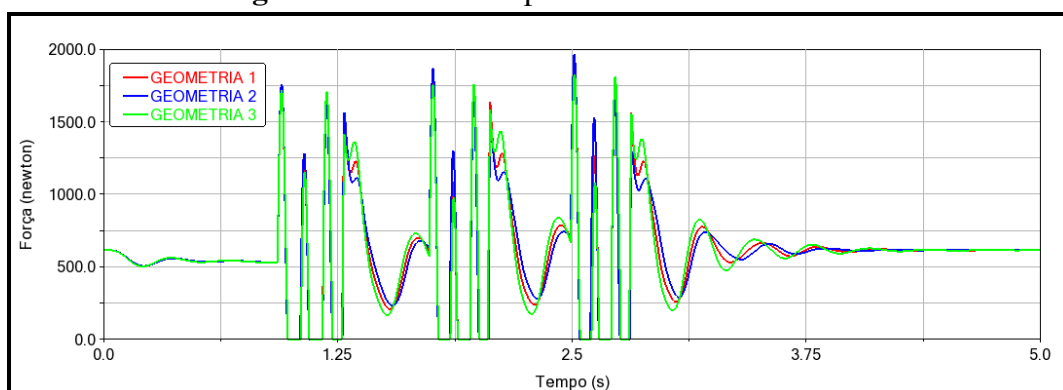


Fonte: Autoria própria.

O gráfico mostra a velocidade longitudinal do veículo, as diferentes geometrias de suspensão exibem um comportamento de velocidade semelhante, mantendo-se com uma velocidade crescente à medida que passa pelo percurso, todas com média de 31,8 km/h, o que indica que o veículo está se movendo de forma relativamente uniforme. As pequenas oscilações na velocidade podem estar relacionadas a interações com a estrada e obstáculos.

Na Figura 39 é mostrado o gráfico do contato entre o pneu dianteiro esquerdo e o solo no cenário das ondulações.

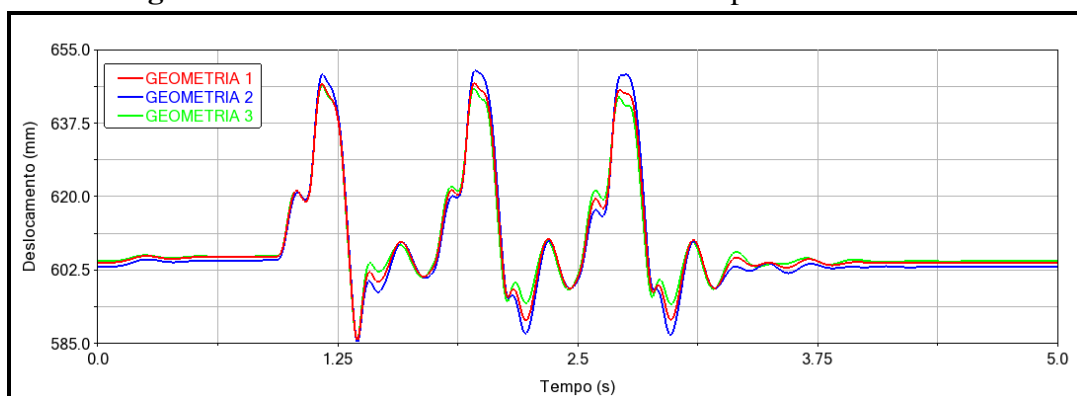
Figura 39: Contato do pneu ao solo no cenário 3.



Fonte: Autoria própria.

O gráfico de força de contato do pneu mostra a interação entre as rodas e o solo durante a simulação. As três geometrias apresentam padrões semelhantes, mas com intensidades variadas. Inicialmente, as forças são constantes, mas após 1 segundo, ocorrem picos repetitivos de até 2000 Newtons. Após cada pico, a força cai, sugerindo a perda momentânea de contato com o solo. Esse padrão se repete três vezes devido aos obstáculos disponíveis na pista, antes das forças se estabilizarem após 4 segundos. O comportamento vertical das massas suspensas é apresentado na Figura 40.

Figura 40: Deslocamento vertical da massa suspensa no cenário 3.



Fonte: Autoria própria.

O gráfico mostra o deslocamento vertical das massas suspensas ao passar por ondulações. As geometrias apresentam comportamentos similares, com picos de deslocamento aproximadamente aos 1, 2 e 3 segundos, refletindo a resposta da suspensão às ondulações. Após cada pico, a suspensão estabiliza a massa suspensa. A partir de 4 segundos, o deslocamento se estabiliza, indicando uma superfície uniforme.

O gráfico da Figura 40 demonstra o deslocamento da massa suspensa com o comportamento estável e similar, diferentemente dos cenários anteriores, que apresentaram picos de variação bem maiores e pouca semelhança entre as 3 geometrias, assim como mostra nas Figuras 33 e 38.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver e analisar diferentes configurações geométricas para a suspensão dianteira de um veículo baja SAE, com foco na otimização do desempenho e estabilidade em terrenos acidentados. Para isso, foram projetadas três geometrias distintas, variando a altura do centro instantâneo da suspensão, que foram posteriormente submetidas a simulações dinâmicas no *MSC Adams Car*, permitindo uma análise detalhada do comportamento do veículo sob diversas condições de terreno.

A partir dos resultados das simulações realizadas no *Adams Car*, foi possível comparar as geometrias de suspensão em vários aspectos cruciais, como a força de contato do pneu com o solo, o deslocamento vertical das massas suspensas e as variações de *toe* e *camber*. A geometria 3 se destacou como a de melhor desempenho geral, pois ofereceu um equilíbrio ideal entre estabilidade e capacidade de resposta às irregularidades do terreno. Esse design demonstrou uma combinação eficiente de rigidez e flexibilidade, mantendo um bom contato do pneu com o solo e absorvendo de maneira eficaz os impactos das ondulações, ao mesmo tempo em que minimizava as variações de *toe* e *camber*.

Por outro lado, a geometria 2, com uma configuração mais agressiva, apresentou maior sensibilidade às irregularidades do terreno, mas comprometeu a estabilidade do veículo. Já a geometria 1 priorizou a estabilidade, porém sua capacidade de absorção de impactos foi inferior. Com base nesses resultados e nas análises realizadas, a geometria 3 se destaca como a que apresenta o melhor desempenho entre as opções avaliadas. Como proposta, uma redução na altura do CI pode ser uma alternativa interessante a ser aplicada no protótipo Baja do Caraubaja.

A metodologia adotada se mostrou eficiente para a otimização da suspensão, destacando a importância das ferramentas computacionais no desenvolvimento de veículos *off-road*. Os resultados obtidos podem servir como base para futuras otimizações na equipe Caraubaja, contribuindo para a melhoria contínua do projeto. Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se a realização de testes experimentais para validar as simulações realizadas, além da investigação de novas configurações geométricas que possam aprimorar ainda mais o desempenho do protótipo.

REFERÊNCIAS

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.

CARVALHO, Carlos Costa de Carvalho. **ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM NOVO CONCEITO DE SUSPENSÃO TRASEIRA PARA VEÍCULOS DO TIPO BAJA**. 2017. 56 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2017.

DINIZ, D. D. S.; **ESTUDO DA DINÂMICA VERTICAL EM SUSPENSÃO DUPLO A DE UM VEÍCULO OFFROAD TIPO BAJA**. 2014. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

FERNANDES, Marcelo Arronilas. **ESTUDOS EM UM SISTEMA DE DIREÇÃO VEICULAR**. 2005. 99 p. Dissertação (Título de Mestre Profissional em Engenharia Automotiva) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

HEIBING, B.; ERSOY, M.; **CHASSIS HANDBOOK**. s.l.: Vieweg Teubner, 2001. ISBN: 978-3-8348-0994-0.

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.

MELO, M. C. D. L. **ESTUDO COMPARATIVO DA INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE ATAQUE NA RESPOSTA DINÂMICA DE UM VEÍCULO BAJA**. 2019. 56 f. TCC (Graduação) – Curso de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2019.

NICOLAZZI, L.C. **DINÂMICA VEICULAR**, Santa Catarina, 2008 [Apostila do curso de especialização em engenharia automotiva da Universidade Federal de Santa Catarina].

SAE BRASIL. Histórico. Disponível em: <<http://portal.saebrasil.org.br/programas-estudantis/baja-sae-brasil>>. Acesso em: 22 abr. 2024.

SOUZA, Geneses Izidio de. **ESTUDO DINÂMICO E DIMENSIONAL DE UM NOVO MODELO DE TIRANTE PARA UM VEÍCULO BAJA**. 2021. 55 f. TCC (Graduação) - Curso de Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas-Rn, 2021.