

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

VICTOR AUGUSTO LOPES MOURATO

**CONCEPÇÃO GEOMÉTRICA E ANÁLISE CINEMÁTICA DE SISTEMA DE
ESTERÇAMENTO DO EIXO TRASEIRO EM FUNÇÃO DA ROLAGEM DE
CARROCERIA PARA VEÍCULOS DE QUATRO RODAS**

PATO BRANCO

2023

VICTOR AUGUSTO LOPES MOURATO

**CONCEPÇÃO GEOMÉTRICA E ANÁLISE CINEMÁTICA DE SISTEMA DE
ESTERÇAMENTO DO EIXO TRASEIRO EM FUNÇÃO DA ROLAGEM DE
CARROCERIA PARA VEÍCULOS DE QUATRO RODAS**

**Geometric design and kinematic analysis of rear axle steering system
considering body roll for four-wheeled vehicles**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Sérgio Luiz Ribas Pessa.

PATO BRANCO

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

VICTOR AUGUSTO LOPES MOURATO

**CONCEPÇÃO GEOMÉTRICA E ANÁLISE CINEMÁTICA DE SISTEMA DE
ESTERÇAMENTO DO EIXO TRASEIRO EM FUNÇÃO DA ROLAGEM DE
CARROCERIA PARA VEÍCULOS DE QUATRO RODAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 15/06/2023

Sérgio Luiz Ribas Pessa
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Fábio Junkes Correa
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Luiz Carlos Martinelli Junior
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PATO BRANCO

2023

Dedico o presente trabalho à minha família e amigos próximos, sendo eles principalmente minha mãe, meu pai e minha irmã, pois foram meus principais apoiadores motivacionais e financeiros até mesmo nos momentos mais difíceis desta jornada de graduação. Dedico também a todos meus ex-colegas, contemporâneos da equipe Pato Baja.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a todos aqueles que inspiraram a vontade de me tornar um engenheiro mecânico, desde os professores do período do ensino médio até os nomes de inventores históricos, capazes de mudar a humanidade para sempre através da aplicação dos princípios da ciência e engenharia.

Agradeço carinhosamente à minha família e a Deus, principalmente, por me concederem a oportunidade de cursar a universidade com todo suporte e estrutura familiar necessários neste período, sendo isto um privilégio que nem todos dispõem.

Agradeço aos meus amigos com quem dividi moradia, aqueles que viveram momentos marcantes durante a graduação e que me trazem muita saudade e guardo as lembranças com muita alegria.

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná por disponibilizar sua infraestrutura, prestação de serviço de todos os seus colaboradores e também dos bons profissionais responsáveis por ministrar as disciplinas de formação profissional.

Agradeço meu professor orientador, Sérgio Luiz Ribas Pessa, por dedicar seu tempo durante a orientação para a formulação e estruturação dos conceitos necessários para o desenvolvimento do presente trabalho.

Primeiro diga a si mesmo o que você seria; e
então faça o que você tem que fazer.
(EPICTETO).

RESUMO

O trabalho demonstra o funcionamento de um sistema capaz de esterçar as rodas traseiras do veículo durante movimentos curvilíneos por meio da rolagem da carroceria sem que as rodas do eixo traseiro sofram variações de direção ao transpor desníveis simétricos em ambos os lados durante trajetórias retilíneas. Para alcançar esse objetivo é apresentado o modelo veicular tradicional, sem esterçamento do eixo traseiro, que mantém as direções das rodas traseiras paralelas ao eixo longitudinal do veículo ao longo de todo o curso vertical da suspensão. Em seguida é apresentado um modelo veicular com capacidade de esterçar as rodas do eixo traseiro com base na rolagem da carroceria através da geometria da suspensão, destacando as vantagens desse modelo em relação ao tradicional. Posteriormente é proposto um novo mecanismo capaz de esterçar as rodas do eixo traseiro em função da rolagem da carroceria em um veículo de quatro rodas. Esse mecanismo é capaz de manter as rodas traseiras paralelas ao eixo longitudinal em situações em que ambos os lados da suspensão traseira são simetricamente comprimidos ou estendidos durante trajetórias retilíneas. Após a concepção de cada modelo veicular são realizados quatro ensaios em que o primeiro descreve a variação da direção de uma roda ao longo de todo o curso vertical da suspensão do eixo traseiro em um veículo sem capacidade de esterçar as rodas do eixo traseiro, o segundo repete os procedimentos do primeiro ensaio, porém em um veículo com capacidade de esterçar as rodas do eixo traseiro por meio da rolagem da carroceria utilizando uma geometria fixa de suspensão e o terceiro ensaio ocorre após a introdução do novo mecanismo proposto, aferindo as inclinações de ambas as rodas do eixo traseiro ao longo do curso vertical da suspensão quando ambos os lados são comprimidos e estendidos simetricamente. Por fim, o último ensaio descreve as direções das rodas traseiras em uma situação em que um lado da suspensão traseira é comprimido e o outro estendido, simulando a rolagem da carroceria que ocorre durante curvas. Os resultados demonstram a capacidade do novo mecanismo reduzir o raio de curva de um veículo, sem comprometer a estabilidade ao transpor desníveis simétricos durante trajetórias retilíneas.

Palavras-chave: Dinâmica Veicular, Geometria de Suspensão, Duplo A, Rolagem de Carroceria, Chassis, Esterçamento por Compressão, Esterçamento por Rolagem, Sistema de Direção, Caixa de Direção.

ABSTRACT

The work demonstrates the operation of a system capable of steering the rear wheels of a vehicle during curved movements by utilizing body roll, without causing directional variations in the rear axle wheels when encountering symmetrical irregularities on both sides during straight paths. To achieve this goal, the traditional vehicle model is presented, which lacks rear axle steering and keeps the directions of the rear wheels parallel to the longitudinal axis of the vehicle throughout the vertical range of suspension. Subsequently, a vehicle model with the ability to steer the rear wheels based on body roll, using suspension geometry, is introduced, highlighting the advantages over the traditional model. Furthermore, a novel mechanism is proposed to steer the rear wheels based on body roll in a four-wheeled vehicle. This mechanism ensures that the rear wheels remain parallel to the longitudinal axis when both sides of the rear suspension are symmetrically compressed or extended during straight paths. Following the development of each vehicle model, four tests are conducted. The first test examines the variation in wheel direction throughout the vertical suspension travel of the rear axle in a vehicle without rear wheel steering capability. The second test replicates the procedures of the first test, but in a vehicle equipped with rear wheel steering through body roll using a fixed suspension geometry. The third test is performed after implementing the proposed new mechanism, evaluating the inclinations of both rear wheels during vertical suspension travel when both sides are symmetrically compressed or extended. Lastly, the fourth test describes the directions of the rear wheels in a situation where one side of the rear suspension is compressed while the other is extended, simulating the body roll that occurs during curves. The results demonstrate the effectiveness of the new mechanism in reducing the vehicle's turning radius without compromising stability when traversing symmetrical irregularities during straight paths.

Keywords: Vehicle Dynamics, Suspension Geometry, Double A, Body Roll, Chassis, Compression Steering, Roll Steering, Steering System, Steering Box.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Raio e centro de curva com esterçamento das rodas dianteiras.....	16
Figura 2 - Raio e centro de curva com esterçamento das quatro rodas	17
Figura 3 - Princípio de Ackermann	18
Figura 4 - Princípio de Ackermann com esterçamento das quatro rodas.....	18
Figura 5 - Força centrípeta e força centrífuga	19
Figura 6 - Rolagem de carroceria.....	19
Figura 7 - Ângulo de deriva	20
Figura 8 - Suspensão duplo A.....	21
Figura 9 - Rodas em direções convergentes e divergentes	22
Figura 10 - Curso angular das bandejas e links de suspensão	22
Figura 11 - Geometria de REIMPELL (2001)	23
Figura 12 - Geometrias fora do padrão de REIMPELL (2001).....	23
Figura 13 - Esterçamento do eixo traseiro.....	24
Figura 14 - Mecanismo de quatro barras.....	25
Figura 15 - Dimensões gerais do veículo	26
Figura 16 - Centro de Curva	27
Figura 17 - Posição dos elementos da suspensão traseira do primeiro ensaio	28
Figura 18 - Plano zero	29
Figura 19 - Plano de comparação	30
Figura 20 - Medida de ângulo durante a compressão total da suspensão.....	30
Figura 21 - Curso máximo em extensão.....	31
Figura 22 - Curso máximo em compressão	31
Figura 23 - Posição dos elementos da suspensão traseira do segundo ensaio	32
Figura 24 - Integração do dispositivo ao eixo traseiro.....	33
Figura 25 - Acoplamento do dispositivo	34
Figura 26 - Componentes internos	34
Figura 27 - Princípio de funcionamento	36
Figura 28 - Planos de referência	38
Figura 29 - Ensaio de compressão simétrica.....	39
Figura 30 - Ensaio de rolagem de carroceria	40
Figura 31 - Comparativo de raio de curva.....	46
Figura 32 - Comparativo de compressão simétrica da suspensão.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Direção das rodas traseiras no primeiro ensaio	41
Tabela 2 - Direção das rodas traseiras no segundo ensaio	43
Tabela 3 - Direção das rodas traseiras no terceiro ensaio	44
Tabela 4 - Direção das rodas traseiras no quarto ensaio	45

LISTA DE SÍMBOLOS

M	Centro de curva
ρ	Raio de curva
L	Eixo longitudinal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVO	14
1.1.1	Objetivo geral	14
1.1.2	Objetivos específicos.....	14
1.2	Motivação	14
1.3	Estrutura do trabalho	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1	Raio de curva	16
2.2	Geometria de ackermann.....	17
2.3	Rolagem de carroceria	19
2.4	Ângulo de deriva	20
2.5	Suspensão duplo a.....	20
2.6	Direção da roda em função do curso vertical da suspensão	21
2.7	Esterçamento das rodas traseiras com a rolagem de carroceria	24
2.8	Mecanismo de quarto barras.....	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1	Configuração do veículo utilizado no estudo	26
3.2	Primeiro ensaio.....	28
3.3	Segundo ensaio.....	32
3.4	Concepção de um novo mecanismo de esterçamento	32
3.5	Ensaio de compressão simétrica da suspensão traseira	37
3.6	Ensaio de rolagem de carroceria	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1	Análise do primeiro ensaio.....	41
4.2	Análise do segundo ensaio	42
4.3	Análise do terceiro ensaio.....	43
4.4	Análise do quarto ensaio.....	44
4.5	Comparativo de raio de curva durante a rolagem de carroceria.....	45
4.6	Comparativo das direções das rodas traseiras	46
5	CONCLUSÕES	48
	REFERÊNCIAS.....	49

1 INTRODUÇÃO

Os automóveis fazem parte da rotina de grande parte da população mundial, tendo sua origem no século XIX, quando vários inventores disputavam o título que garantiria os direitos de patente. O resultado foi o registro do que ficou conhecido como o primeiro automóvel a combustão, creditado a Karl Benz, segundo a revista Autoesporte (2016).

Desde então, o veículo criado por Benz passou por evoluções substanciais ao longo do século XX, com a criação de modelos para diversas aplicações. Entre eles, destaca-se o carro, o mais popular e tradicional veículo de quatro rodas, que é o objeto de estudo deste trabalho.

Durante a condução de um veículo, a interação entre seus sistemas transmite ao condutor uma resposta instantânea sobre o seu comportamento, seja ao percorrer uma reta ou uma curva.

Quando o terreno é pouco acidentado, as sensações mais intensas ocorrem durante as curvas, onde a estrutura do veículo é afetada por uma força na direção do centro da curva, conhecida como força centrífuga. Essa força surge como resposta à força centrípeta, que é a componente lateral da força aplicada pelo solo aos pneus. A força centrífuga atua no centro de gravidade do veículo e é definida por Reimpell (2001) como força lateral, sendo responsável pelo fenômeno conhecido como rolagem de carroceria, que consiste na rotação da estrutura do veículo ao longo de seu eixo longitudinal.

Para guiar o veículo na direção desejada, a maioria dos veículos rotaciona apenas as rodas dianteiras no plano horizontal. No entanto, existem projetos de veículos com capacidade de rotacionar simultaneamente as rodas traseiras por meio da rolagem da carroceria, aumentando a capacidade de contornar curvas de menor raio.

Esse recurso é amplamente utilizado nos veículos de competição da categoria baja SAE, que são veículos fora de estrada projetados para transpor obstáculos em terrenos acidentados.

1.1 Objetivo

1.1.1 Objetivo geral

Apresentar a concepção geométrica de um sistema mecânico dedicado ao esterçamento do eixo traseiro, acionado pela rolagem da carroceria, com o objetivo de aumentar a capacidade de contornar curvas de menor raio.

Esse sistema deve permitir o esterçamento das rodas traseiras durante as curvas, ao mesmo tempo em que impede variações nas direções dessas rodas ao transpor desníveis simétricos em trajetória retilínea.

1.1.2 Objetivos específicos

O objetivo principal é composto pelos seguintes objetivos específicos:

- Introduzir um mecanismo de esterçamento do eixo traseiro baseado na rolagem da carroceria;
- Demonstrar sua limitação ao transpor um desnível simétrico nos dois lados esquerdo e direito da suspensão traseira;
- Apresentar a concepção geométrica do novo conjunto mecânico, detalhando o seu funcionamento;
- Demonstrar a capacidade do sistema de esterçamento em direcionar as rodas durante as curvas e evitar variações nas direções das rodas quando o veículo está em movimento retilíneo;
- Com base nos resultados dos ensaios, avaliar e classificar, de forma positiva e negativa, as características gerais identificadas em cada um dos modelos;
- Realizar uma comparação entre os modelos de veículos apresentados no trabalho.

1.2 Motivação

Ao abordar o controle de direção das rodas traseiras, este estudo oferece contribuições e alternativas para a otimização da dinâmica veicular, sendo potencialmente útil tanto para os projetistas de veículos de competição do tipo Baja SAE quanto para a indústria automobilística em geral.

1.3 Estrutura do trabalho

Para o desenvolvimento deste trabalho, inicialmente serão revisados alguns conceitos básicos de dinâmica veicular. Em seguida, serão apresentados sistemas de suspensão automotiva, nos quais serão conduzidos estudos cinemáticos para demonstrar seus benefícios e limitações.

Com base no conhecimento adquirido sobre as vantagens e desvantagens dos modelos tradicionais apresentados, será proposta a concepção de um novo sistema mecânico. Esse sistema consiste em um equipamento dedicado ao controle da direção das rodas do eixo traseiro, visando aprimorar a estabilidade do veículo em deslocamentos em linha reta.

Em seguida, serão realizados estudos sobre as direções das rodas traseiras em relação às suas posições ao longo do curso vertical de suspensão. Posteriormente, serão analisadas as condições dinâmicas de um veículo em movimento retilíneo ao transpor irregularidades simétricas presentes no terreno, seguidas das condições dinâmicas durante movimentos curvilíneos.

Por fim, será feita uma comparação entre os três modelos abordados, destacando as vantagens e desvantagens dos sistemas utilizados.

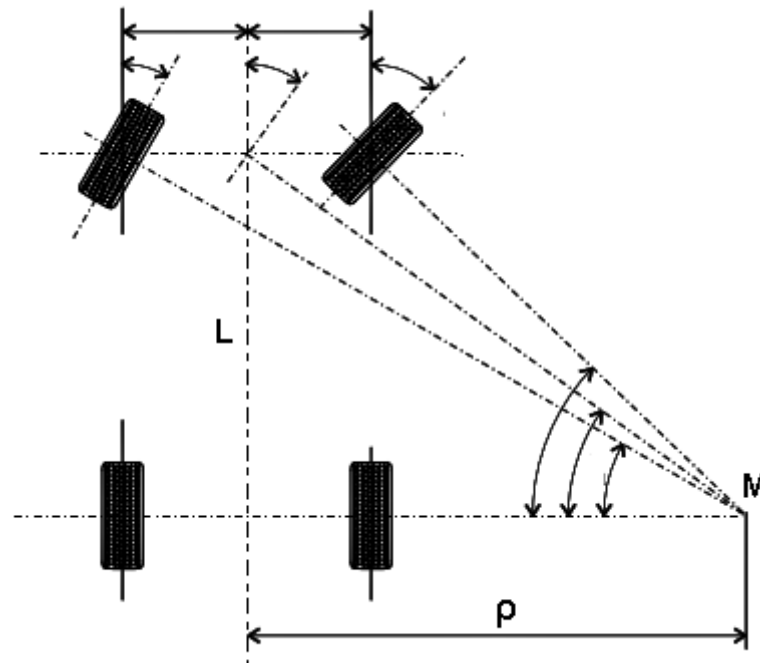
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Raio de curva

Ao deslocar-se ao longo de uma curva de raio constante, o raio de curva é definido como a distância entre o centro da circunferência e o eixo longitudinal do veículo (NICOLAZZI, 2012).

Quando um veículo de quatro rodas, com capacidade de esterçar apenas as rodas dianteiras, percorre uma curva de raio constante, ele circula em torno de um ponto conhecido como centro de curva, representado na Figura 1 como M. O raio da curva é representado por ρ e o eixo longitudinal do veículo por L.

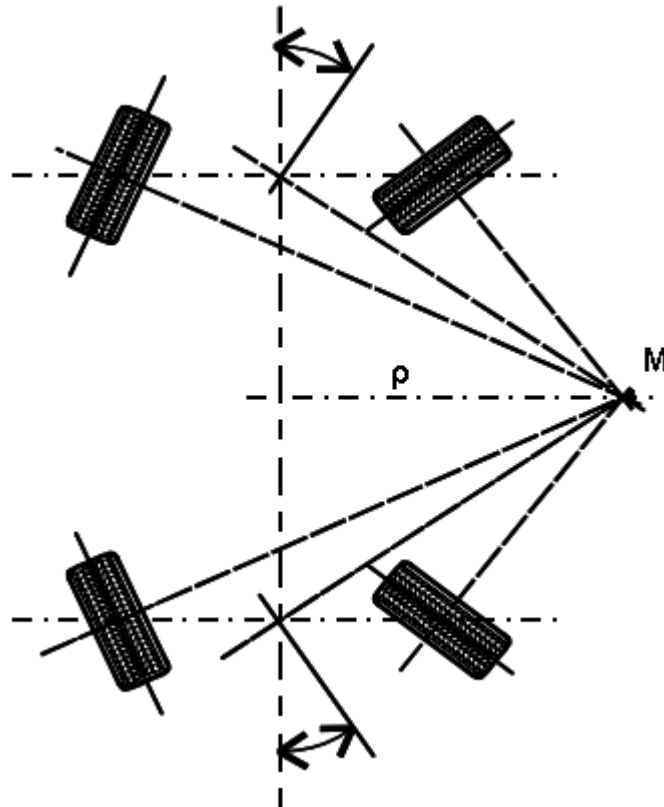
Figura 1 – Raio e centro de curva com esterçamento das rodas dianteiras



Fonte: Adaptado de NICOLAZZI (2012)

Os veículos que possuem a capacidade de esterçar tanto as rodas dianteiras quanto as rodas traseiras circulam em torno de um centro determinado por uma geometria distinta, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Raio e centro de curva com esterçamento das quatro rodas

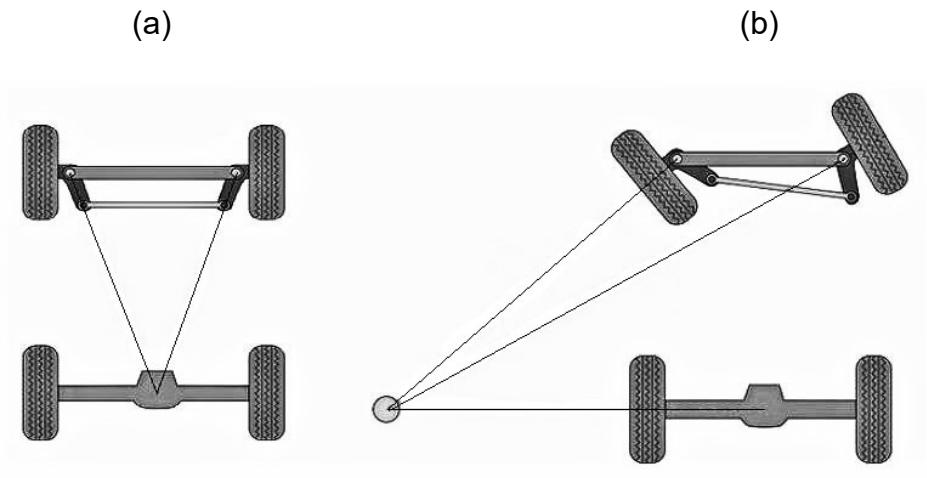


Fonte: Adaptado de NICOLAZZI (2012)

Em um estudo comparativo realizado por Nicolazzi (2012) entre as geometrias mencionadas, observa-se que, se um veículo que esterça as quatro rodas possui a mesma capacidade máxima de esterçamento das rodas dianteiras que um veículo que esterça apenas as rodas dianteiras, o raio de curva para o veículo com esterçamento nas quatro rodas é menor.

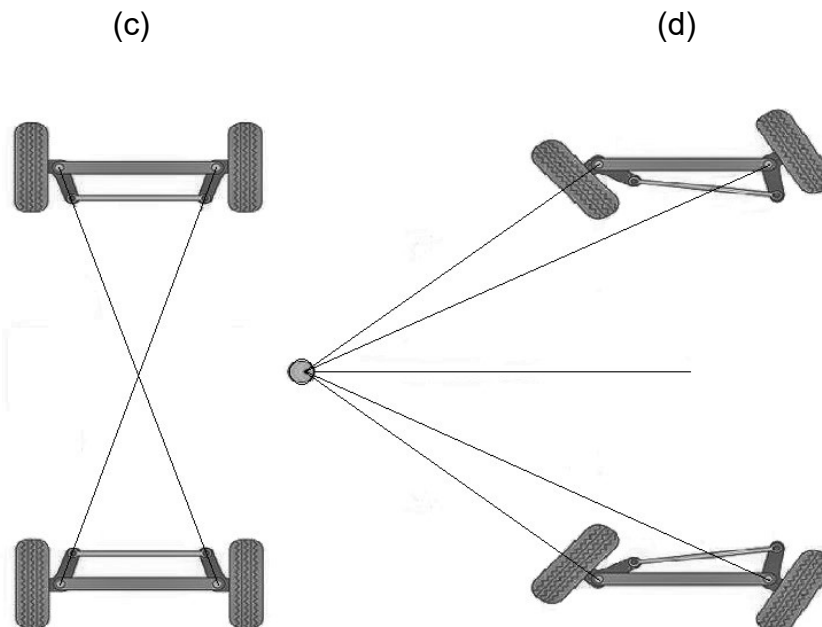
2.2 Geometria de Ackermann

A geometria de Ackermann, que foi inicialmente utilizada no final do século XIX no projeto de carruagens, define os pontos de articulação das rodas que esterçam. Ao aplicar esse padrão de geometria no projeto de um veículo, todas as suas rodas circulam ao redor do mesmo centro de curva durante uma curva, evitando qualquer discordância entre as trajetórias das rodas e garantindo a estabilidade do veículo. A configuração dos pontos de articulação é ilustrada pela letra (a) na Figura 3, enquanto a letra (b) demonstra como ocorre o esterçamento das rodas dianteiras usando essa configuração.

Figura 3 – Princípio de Ackermann

Fonte: Adaptado de RESEARCHGATE (2023)

A Figura 4 ilustra a aplicação do princípio de Ackermann no caso em que o veículo esterça tanto as rodas dianteiras quanto as traseiras simultaneamente, representado pelas partes (c) e (d) da figura.

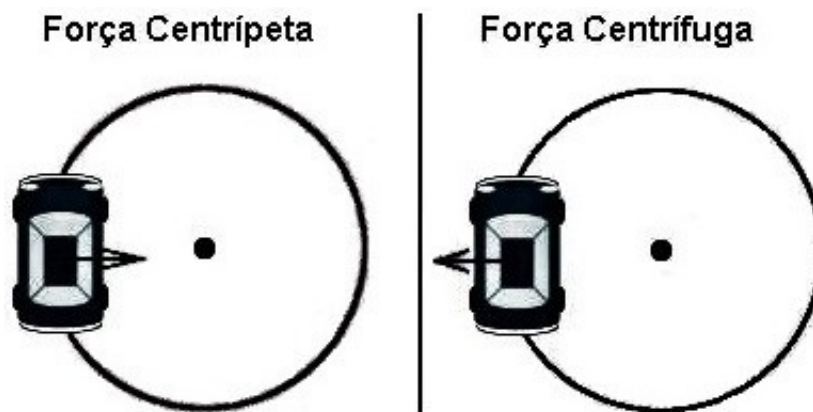
Figura 4 – Princípio de Ackermann com esterçamento das quatro rodas

Fonte: Adaptado de RESEARCHGATE (2023)

2.3 Rolagem de carroceria

A Figura 5 ilustra um veículo em movimento ao longo de uma curva, onde a força exercida pelo solo nos pneus é uma força centrípeta que o mantém na trajetória da curva. Em resposta a essa força, surge uma força centrífuga, conhecida como força lateral, conforme descrito por Nicolazzi (2012).

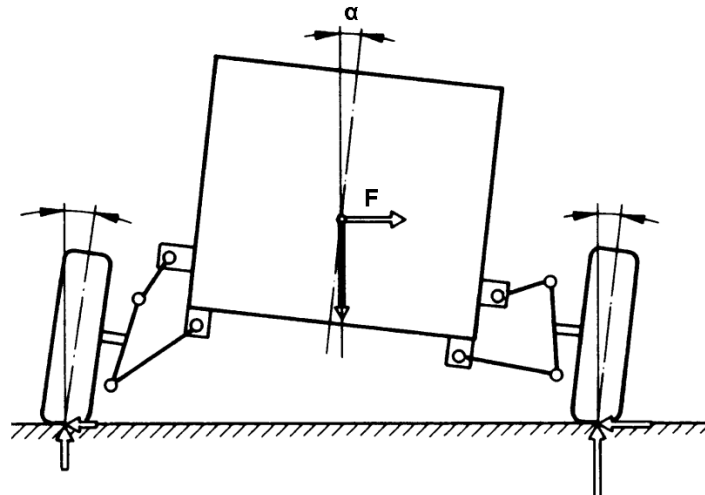
Figura 5 – Força centrípeta e força centrífuga



Fonte: Adaptado de QWORA (2023)

A rolagem de carroceria é caracterizada pela rotação da estrutura do veículo ao longo de seu eixo longitudinal. Essa rotação é definida pelo ângulo de deslocamento angular da estrutura do veículo (α) em relação ao seu eixo longitudinal, resultante da aplicação da força lateral (F) no centro de gravidade do veículo, como ilustrado na Figura 6.

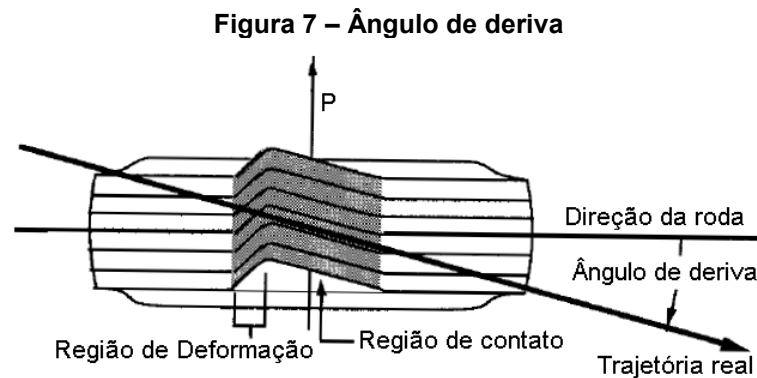
Figura 6 – Rolagem de carroceria



Fonte: Adaptado de REIMPELL (2001)

2.4 Ângulo de deriva

Considerando que os pneus são feitos de um material elástico, ao transitar por uma curva, a força centrípeta exercida pelo solo no pneu resulta em um deslocamento angular na banda de rodagem, conhecido como ângulo de deriva, conforme ilustrado na Figura 7.



Fonte: Adaptado de GILLESPIE (1992)

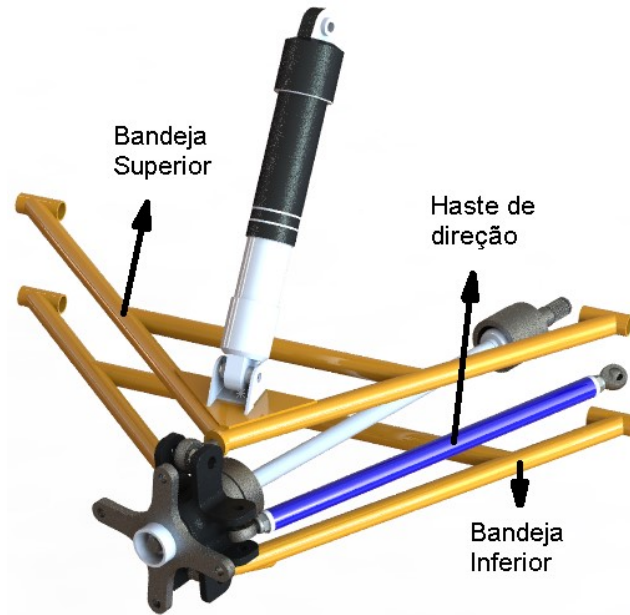
2.5 Suspensão duplo A

Ao contrário dos sistemas de freios e direção, o sistema de suspensão de um veículo de quatro rodas não possui uma única função. A suspensão tem a responsabilidade de fornecer conforto ao motorista ao conduzir o veículo em terrenos irregulares, além de promover a estabilidade.

A função principal da suspensão é manter a maior área de contato entre os pneus e o solo em várias condições, conforme projetado, o que afeta diretamente as capacidades de frenagem e curvas, permitindo um deslocamento mais rápido.

No presente estudo, foi escolhido o tipo de suspensão denominado "duplo A", conforme ilustrado na Figura 8. Essa escolha foi feita devido à sua construção relativamente simples, composta principalmente pelos seguintes componentes: bandeja superior, bandeja inferior e haste de direção.

Figura 8 – Suspensão duplo A



Fonte: Autoria própria (2023)

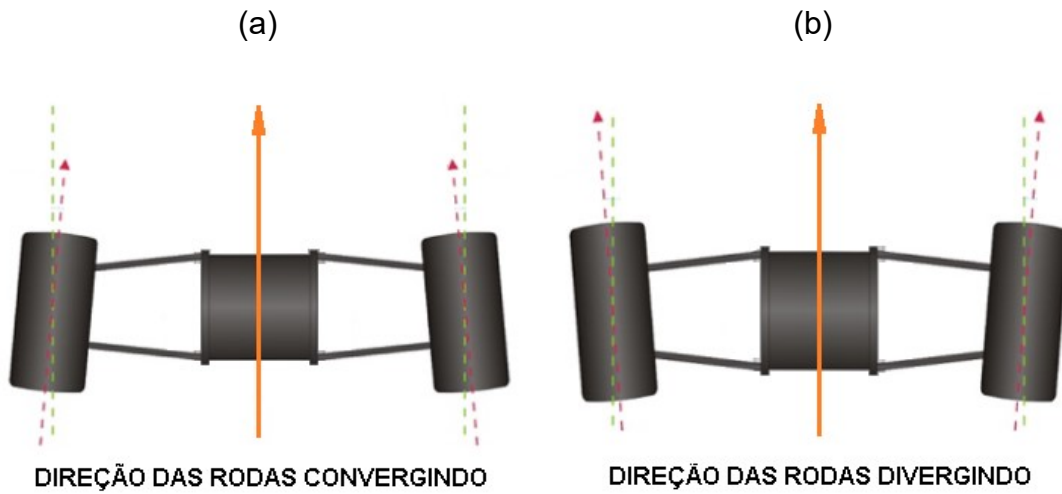
2.6 Direção da roda em função do curso vertical da suspensão

Durante o deslocamento de um veículo, o contato entre os pneus e uma superfície irregular provoca o deslocamento das rodas em relação à estrutura do veículo por meio do sistema de suspensão, que possui um limite máximo e mínimo de deslocamento vertical.

O deslocamento vertical da suspensão em relação à estrutura pode alterar a direção das rodas, e esse comportamento está relacionado à posição geométrica das articulações das bandejas de suspensão e da haste de direção.

A Figura 9 ilustra a vista superior de um veículo no momento em que a suspensão é comprimida simetricamente em relação aos lados esquerdo e direito. No caso (a), a compressão da suspensão faz com que as rodas apontem para direções convergentes em relação ao deslocamento do veículo, representado pela seta laranja. Já no caso (b), ocorre o oposto, onde as rodas assumem direções divergentes em relação ao deslocamento do veículo.

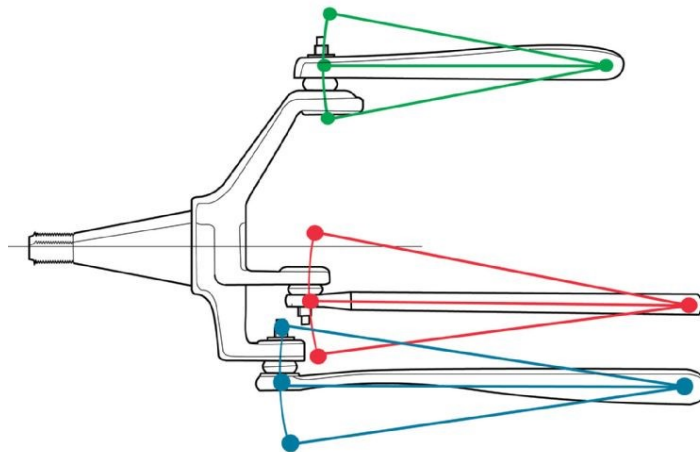
Figura 9 – Rodas em direções convergentes e divergentes



Fonte: Adaptada de PECAHOJE (2023)

Essa variação nas direções das rodas está diretamente relacionada às posições de fixação dos centros de rotação das bandejas e das hastes de direção na estrutura do veículo, como ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Curso angular das bandejas e links de suspensão

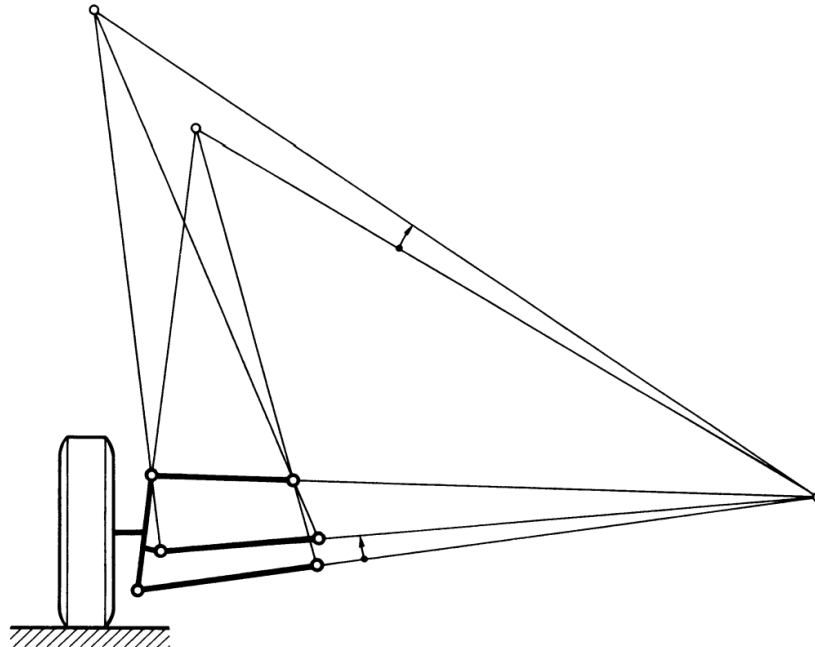


Fonte – RESEARCHGATE (2023)

Para evitar variações nas direções das rodas durante o curso vertical da suspensão, Reimpell (2001) propõe um modelo geométrico que relaciona todos os pontos de articulação dos componentes de suspensão. Dessa forma, a Figura 11 ilustra a projeção dos elementos de direção inseridos na geometria que define o

posicionamento dos componentes de suspensão, garantindo que ao longo de todo o curso vertical da suspensão, as direções das rodas permaneçam voltadas para frente.

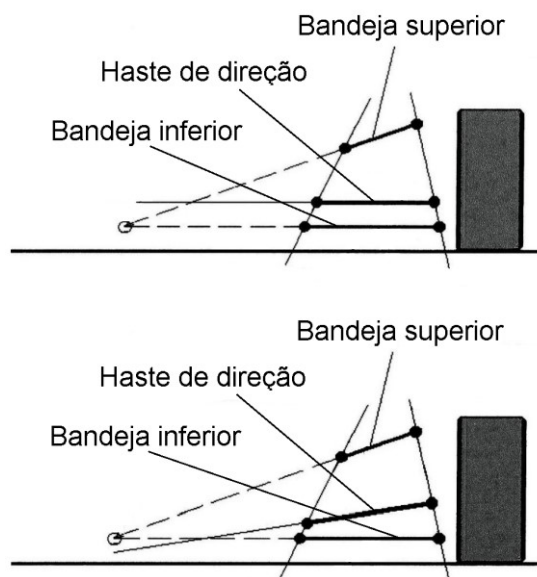
Figura 11 – Geometria de REIMPELL (2001)



Fonte: REIMPELL (2001)

A Figura 12 demonstra dois padrões geométricos distintos que resultam em uma variação nas direções das rodas conforme a projeção geométrica da haste de direção para cada posição ao longo do curso vertical da suspensão.

Figura 12 – Geometrias fora do padrão de REIMPELL (2001)



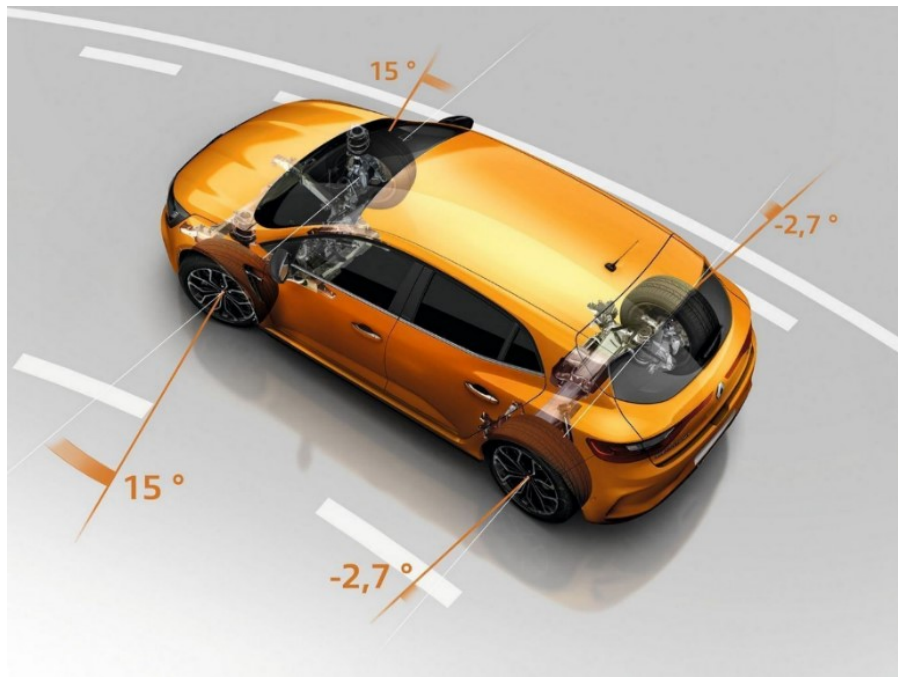
Fonte: Circle Track Magazine (2022)

2.7 Esterçamento das rodas traseiras com a rolagem de carroceria

Ao analisar as geometrias de suspensão que resultam em variação das direções das rodas ao longo do curso vertical de suspensão, conclui-se que quando a suspensão é comprimida, a roda aponta para uma direção divergente, por exemplo, enquanto ao ser estendida, a roda aponta para uma direção convergente em relação ao eixo longitudinal do veículo.

Uma vez que a rolagem de carroceria ocorre exclusivamente durante curvas, e durante essa rolagem, o lado externo da suspensão é comprimido enquanto o lado interno se estende, Nicolazzi (2012) demonstra que os modelos que apresentam essa variação nas direções das rodas ao longo do curso vertical da suspensão fazem com que as rodas girem para a mesma direção durante a realização de curvas, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13 – Esterçamento do eixo traseiro



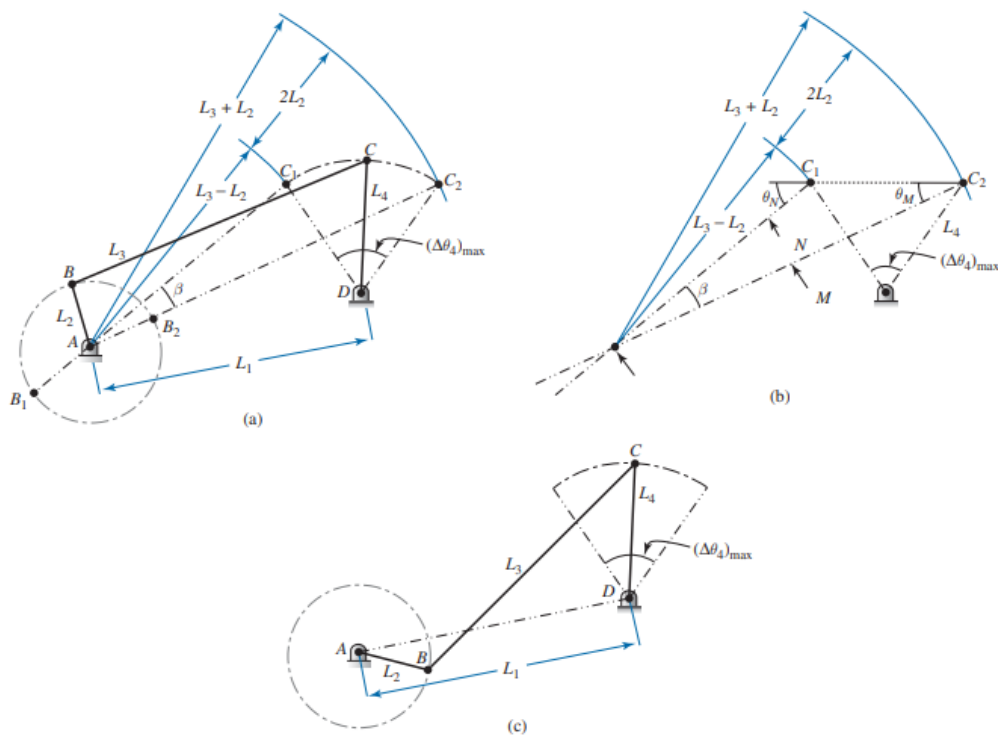
Fonte: WEBMOTORS (2023)

No entanto, o modelo que apresenta esse comportamento pode ser amplamente utilizado, de acordo com as necessidades do projeto, porém com a consequência de provocar variações nas direções das rodas ao percorrer trajetórias retas em terrenos irregulares.

2.8 Mecanismo de quatro barras

Descrito por Myszka (1998), o mecanismo de quatro barras é composto por quatro elementos rígidos: um elemento fixo e duas hastes que se movimentam apenas em rotação em torno de suas articulações, enquanto o elemento ligado a essas hastes realiza um deslocamento plano geral, envolvendo tanto translação quanto rotação. Essa configuração é ilustrada na Figura 14.

Figura 14 – Mecanismo de quatro barras



Fonte: Adaptado de MYSZKA (1998)

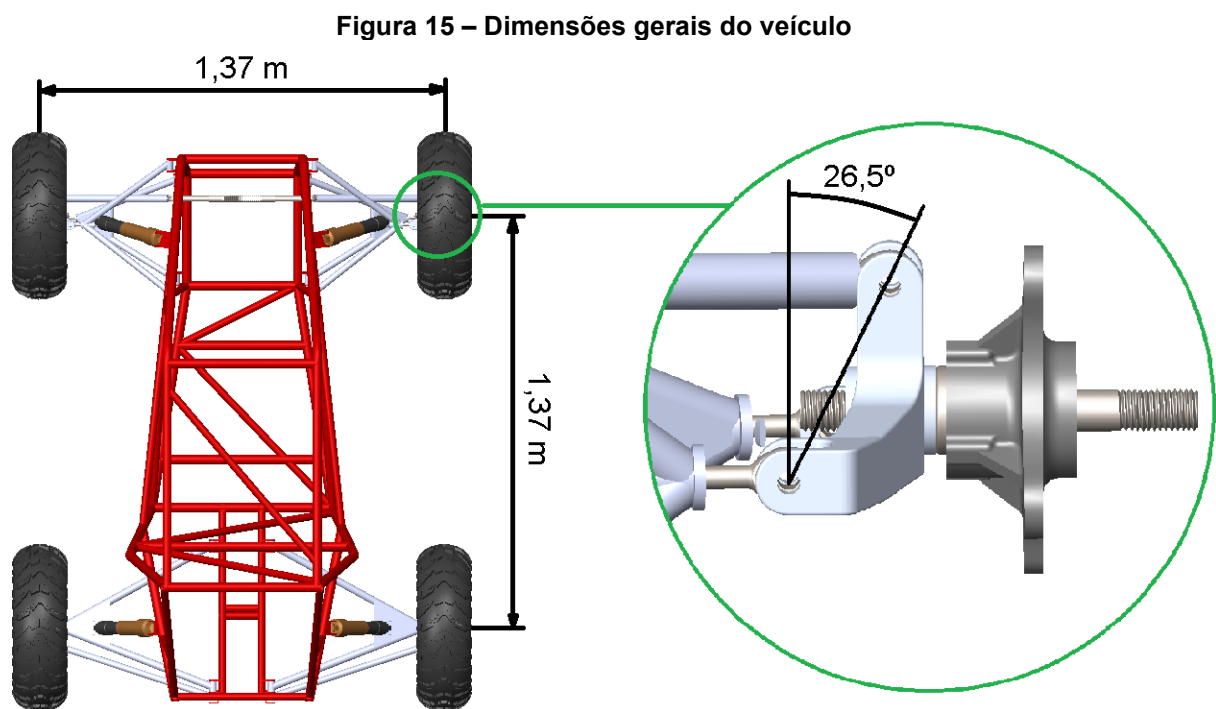
O sistema é demonstrado nas posições (a), (b) e (c), onde L_1 representa um parâmetro do sistema, sendo um valor necessário para o cálculo dos demais elementos, conforme deduzido por Myszka (1998).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Configuração do veículo utilizado no estudo

Para a realização do estudo, foi utilizado um modelo CAD da estrutura de um veículo Baja SAE. A maioria dos componentes utilizados foram desenvolvidos para o protótipo de 2018 pela equipe Pato Baja, da UTFPR do campus Pato Branco. A equipe concedeu autorização para o uso de sua propriedade intelectual na publicação do estudo.

A modelagem dos componentes foi realizada em etapas utilizando o software *Solidworks*. Inicialmente, foram definidas as dimensões gerais do veículo com valores coerentes com os encontrados nos protótipos reais, conforme esboçado na figura 15. O protótipo possui uma distância entre eixos de 1,37 metro e uma largura de eixos de 1,37 metro, tanto na parte dianteira quanto na traseira.

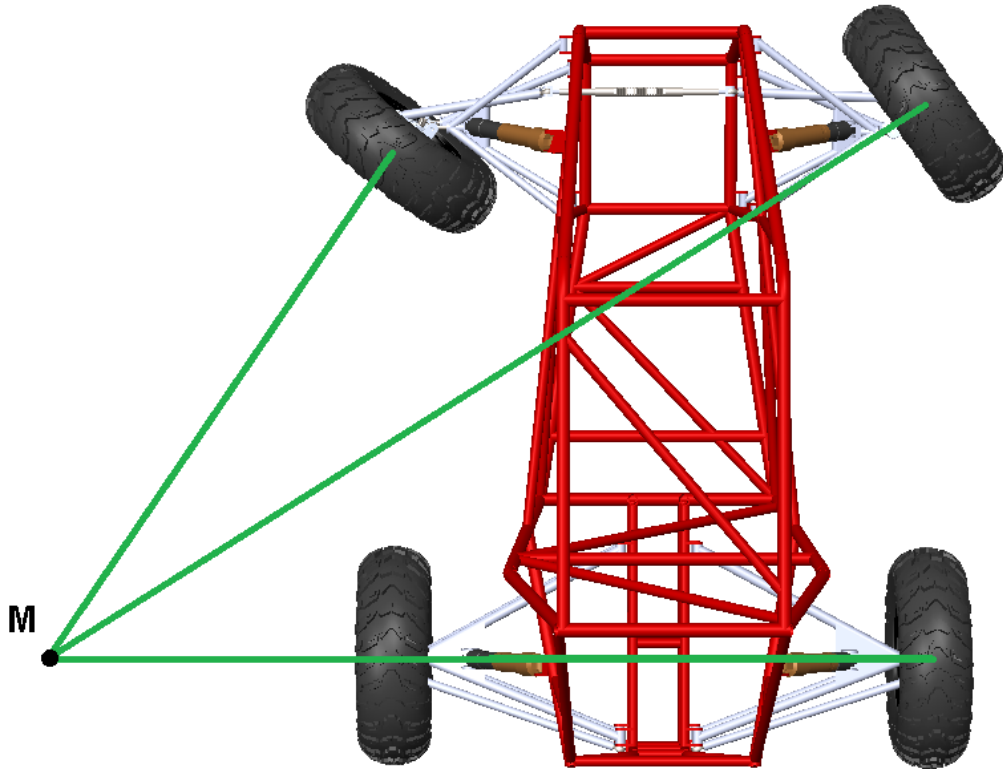


Fonte: Autoria própria (2023)

Embora o foco do estudo não seja a suspensão dianteira, foi dimensionado o ângulo de Ackermann da fixação das mangas de eixo à haste de direção para garantir um alto nível de realidade de projeto. Foi estabelecido um ângulo de inclinação de $26,5^\circ$, resultando no valor necessário para que, independentemente do raio da curva,

todas as rodas circulem ao redor do mesmo centro de curva M, conforme ilustrado na Figura 16.

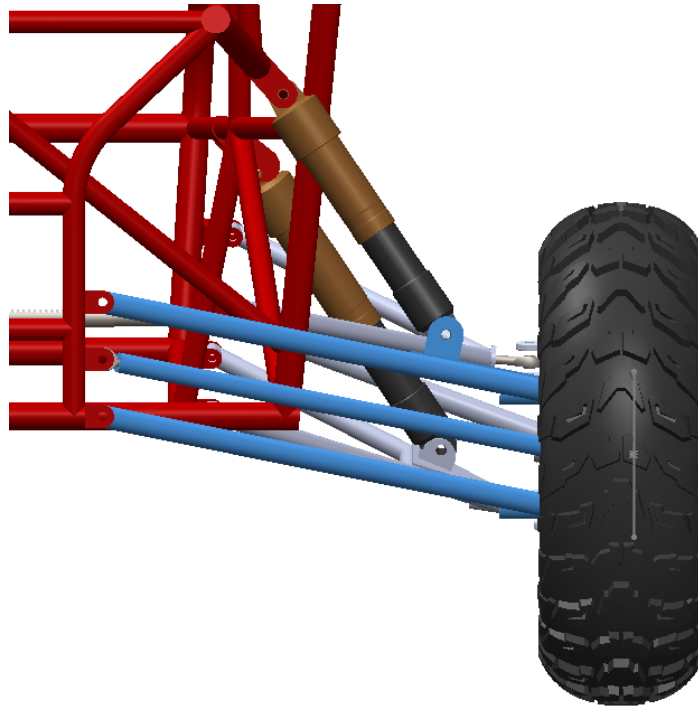
Figura 16 – Centro de Curva



Fonte: Autoria Própria (2023)

Para a realização do estudo, foi necessário que a suspensão traseira assumisse três configurações distintas para a realização de quatro ensaios diferentes. No primeiro ensaio, os elementos da suspensão traseira foram dimensionados e posicionados de acordo com a geometria proposta por Reimpell (2001), conforme ilustrado na Figura 17. Nessa configuração, os comprimentos da bandeja superior, da bandeja inferior e da haste de direção são iguais, e todos esses elementos são posicionados de forma paralela.

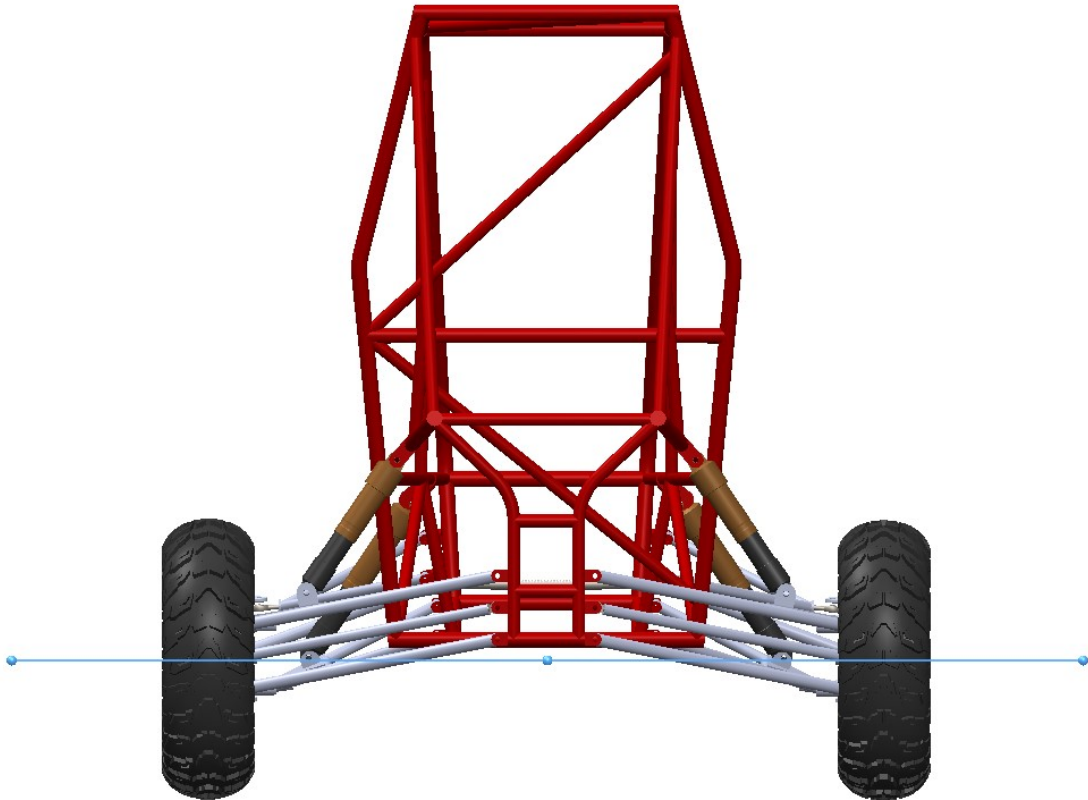
Figura 17 – Posição dos elementos da suspensão traseira do primeiro ensaio



Fonte: Autoria própria (2023)

3.2 Primeiro ensaio

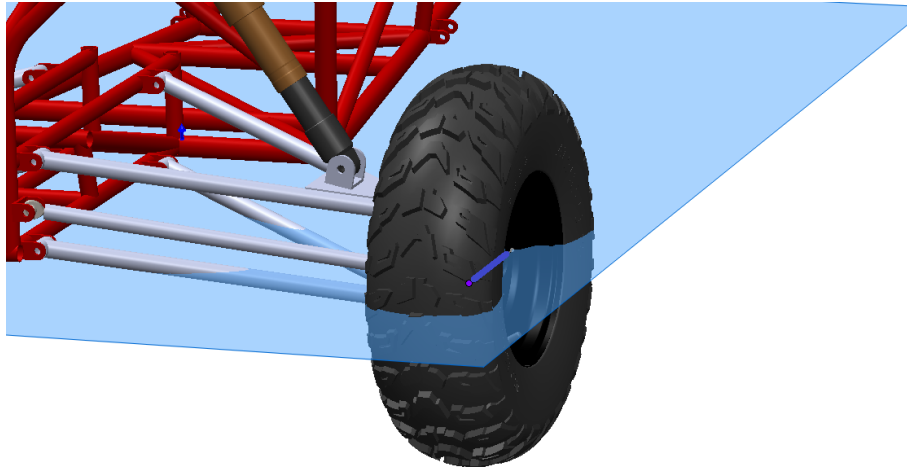
O primeiro ensaio foi realizado da seguinte maneira: considerando que na modelagem o veículo estava em repouso, com a pré-carga resultante do peso do carro já aplicada aos amortecedores, foi criado um plano horizontal que intersecta o centro da roda e define a posição zero do curso vertical da suspensão, como mostrado na Figura 18.

Figura 18 – Plano zero

Fonte: Autoria própria (2023)

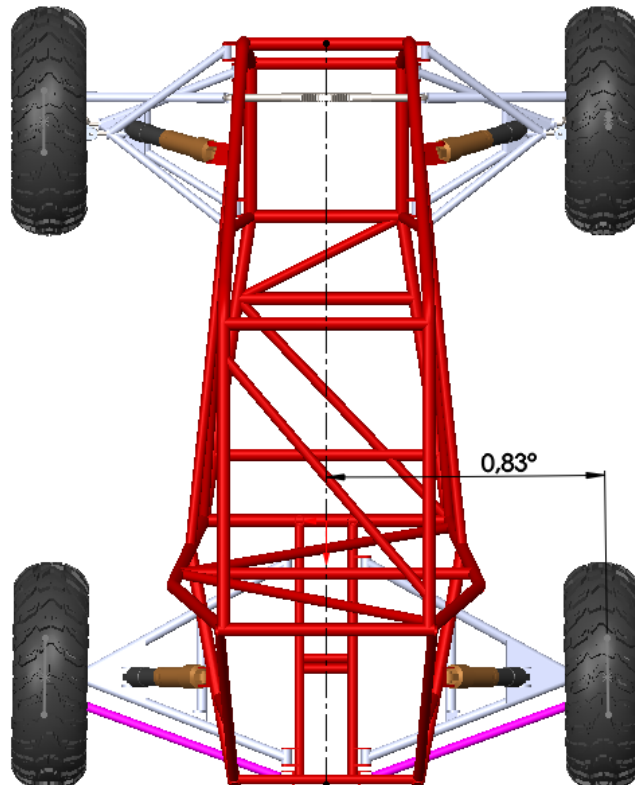
Dessa forma, quando o conjunto de suspensão está acima desse plano, a suspensão encontra-se em estado de compressão (representado por valores positivos), e quando está abaixo, encontra-se em estado de extensão (indicado por valores negativos).

No ensaio, uma linha de esboço foi criada na face interna da roda para representar a direção em que a roda aponta. Em seguida, como ilustrado na Figura 19, essa linha foi posicionada coincidentemente com um novo plano horizontal, chamado de plano de comparação.

Figura 19 – Plano de comparação

Fonte: Autoria própria (2023)

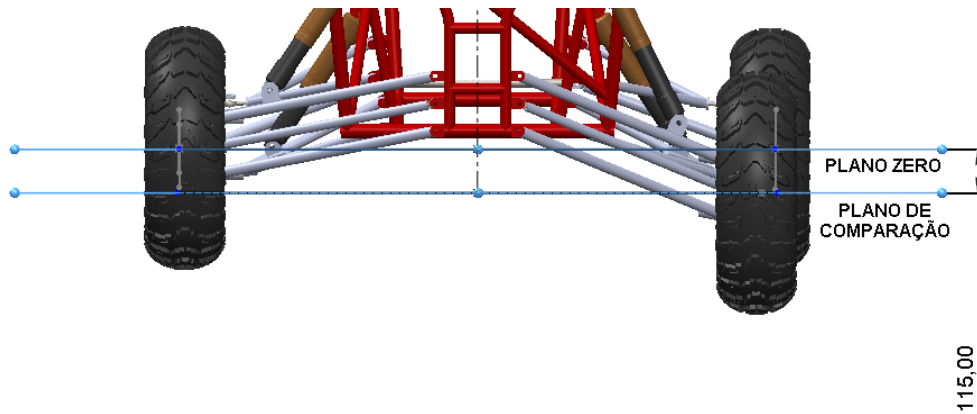
Para medir o ângulo entre a direção da trajetória da roda e o eixo longitudinal do veículo ao longo de todo o curso vertical da roda, foi criado outro esboço no plano zero, contendo uma linha ao longo do eixo longitudinal. Em seguida, foi medida a inclinação entre o eixo longitudinal do veículo e a linha esboçada na direção da trajetória da roda, conforme indicado na Figura 20.

Figura 20 – Medida de ângulo durante a compressão total da suspensão

Fonte: Autoria própria (2023)

O ensaio foi realizado posicionando o plano de comparação no ponto de maior extensão da suspensão, que no software foi referenciado como a superfície de contato entre os batentes da parte superior e inferior do amortecedor, na posição de -115 milímetros em relação ao plano zero, conforme esboçado na Figura 21. Nessa posição, a direção da trajetória da roda é paralela ao eixo longitudinal do veículo, representando a posição de repouso.

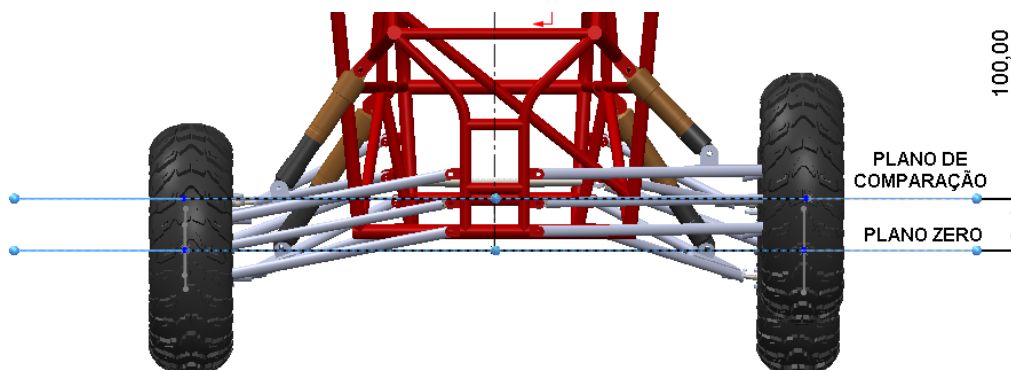
Figura 21 – Curso máximo em extensão



Fonte: Autoria própria (2023)

Em seguida, foi realizada uma nova medição do ângulo para a posição de -75 milímetros, seguida por medições subsequentes em intervalos de 25 milímetros ao longo do curso vertical da suspensão, até alcançar o limite máximo de compressão. Esse limite máximo é atingido quando há uma diferença de 100 milímetros em relação à posição vertical máxima da suspensão em relação ao estado de repouso do veículo, conforme ilustrado na Figura 22.

Figura 22 – Curso máximo em compressão

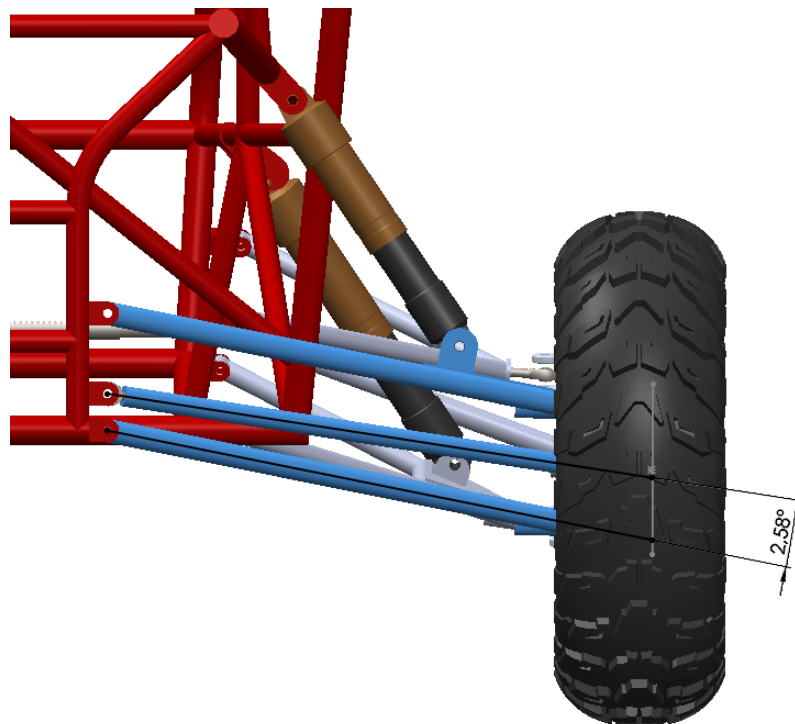


Fonte: Autoria própria (2023)

3.3 Segundo ensaio

Para a realização do segundo ensaio, foram feitas alterações na montagem, onde a fixação da haste de direção na estrutura foi movida 40 mm para baixo. Isso resultou em uma alteração no ângulo entre as hastes de direção e as bandejas, que anteriormente eram elementos paralelos, agora formando um ângulo de $2,58^\circ$, como ilustrado na Figura 23.

Figura 23 – Posição dos elementos da suspensão traseira do segundo ensaio



Fonte: Autoria própria (2023)

Após realizar essas alterações, os procedimentos do primeiro ensaio foram rigorosamente repetidos para o segundo ensaio, e os valores da posição vertical da roda e do ângulo entre a direção da roda e o eixo longitudinal do veículo foram aferidos.

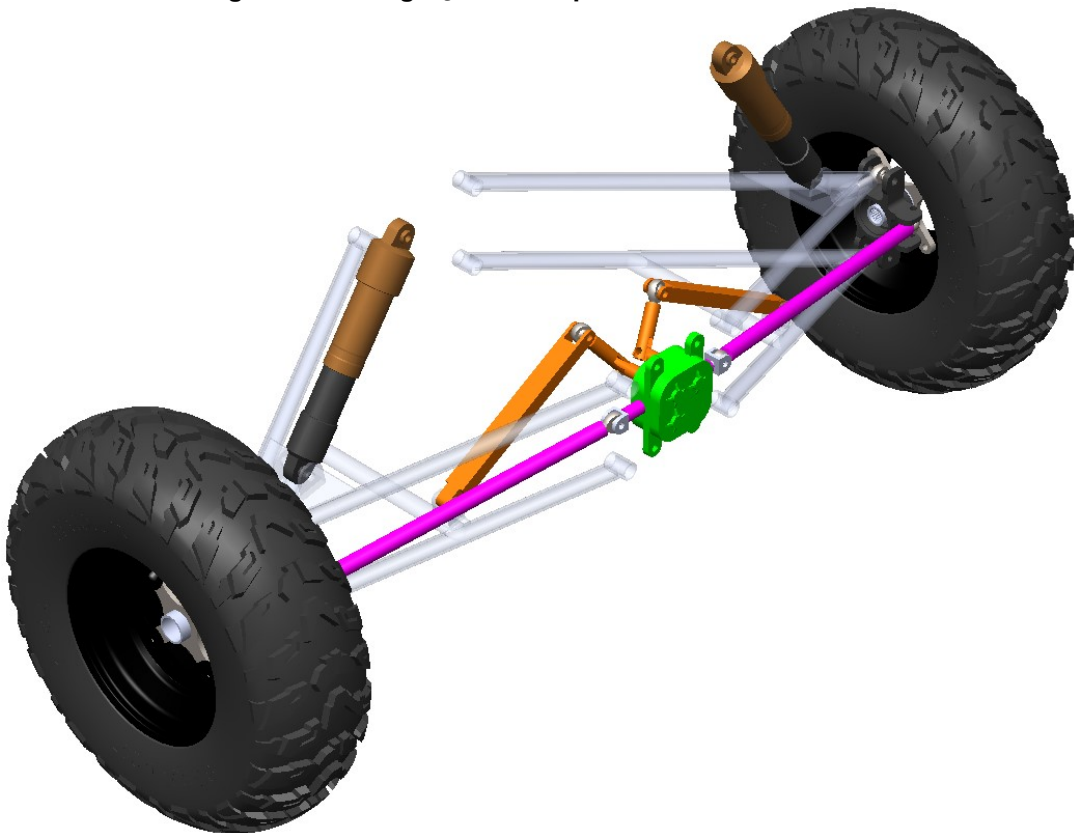
3.4 Concepção de um novo mecanismo de esterçamento

O sistema consiste em um conjunto de peças que formam um mecanismo semelhante a uma caixa de direção convencional, geralmente localizada no eixo dianteiro de um veículo e acionada por um volante operado pelo motorista. No entanto, neste caso, a semelhança termina quando o acionamento do mecanismo não é

realizado pelo motorista, mas sim pelas posições das bandejas de suspensão do eixo traseiro.

Na Figura 24, o invólucro estrutural do dispositivo é representado pela cor verde e é fixado na estrutura principal do veículo, que está oculta para uma melhor visualização do dispositivo. Os elementos de acionamento do dispositivo são mostrados em laranja, enquanto os elementos que controlam o movimento de direção das rodas são destacados em cor rosa.

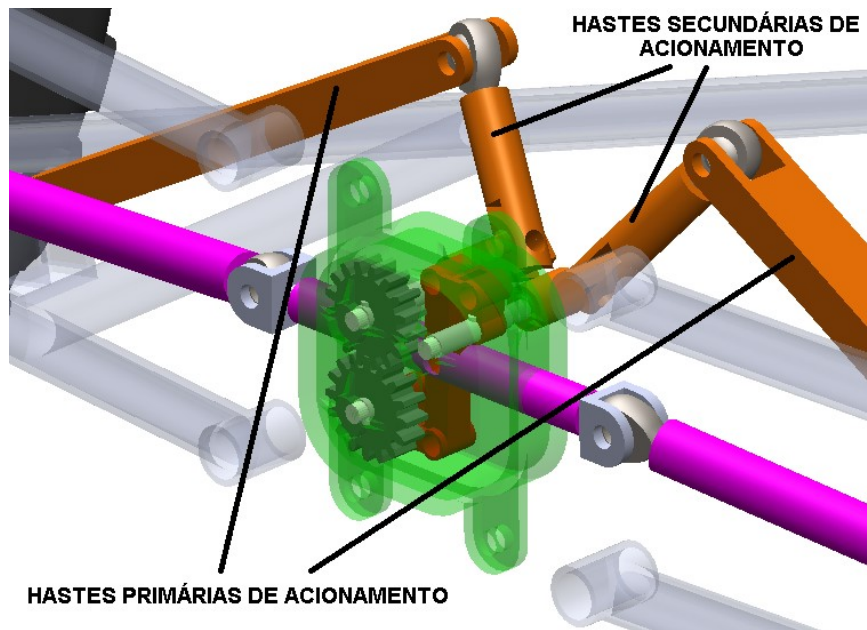
Figura 24 – Integração do dispositivo ao eixo traseiro



Fonte: Autoria própria (2023)

O dispositivo representado na Figura 25 possui todos os elementos responsáveis por transformar os movimentos provenientes do trabalho das bandejas de suspensão traseiras em um movimento na haste, que é equivalente à cremalheira utilizada nos sistemas convencionais de direção dianteira. Essa haste é conectada às hastes de direção das rodas e determina suas direções.

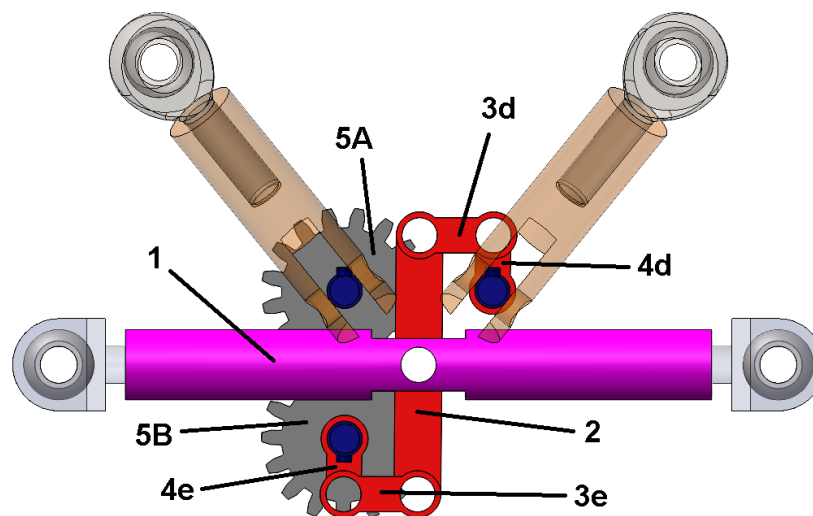
Figura 25 – Acoplamento do dispositivo



Fonte: Autoria própria (2023)

Na Figura 26, são apresentados todos os componentes internos do mecanismo, enquanto os elementos transparentes representam os elementos externos que interagem com ele. Os componentes são denominados da seguinte forma: 1 - cremalheira, 2 - haste diretora principal, 3e - haste horizontal esquerda, 3d - haste horizontal direita, 4e - haste vertical esquerda, 4d - haste vertical direita, 5A - engrenagem superior e 5B - engrenagem inferior.

Figura 26 – Componentes internos



Fonte: Autoria própria (2023)

A relação mecânica entre as hastes internas verticais (4e e 4d) e a haste diretora principal (2) é considerada um mecanismo de quatro barras, assim como a relação entre as hastes primárias de acionamento e as hastes secundárias de acionamento, mencionada por Myszka (1998).

O esterçamento total do eixo traseiro durante a rolagem da carroceria pode ser alcançado utilizando essas relações, permitindo o dimensionamento do esterçamento total por meio da razão entre o comprimento das hastes verticais e o comprimento da haste diretora principal (comprimento do elemento 4 / comprimento do elemento 2) ou da razão entre o comprimento das hastes de acionamento primárias e secundárias (comprimento das hastes primárias de acionamento / comprimento das hastes secundárias de acionamento).

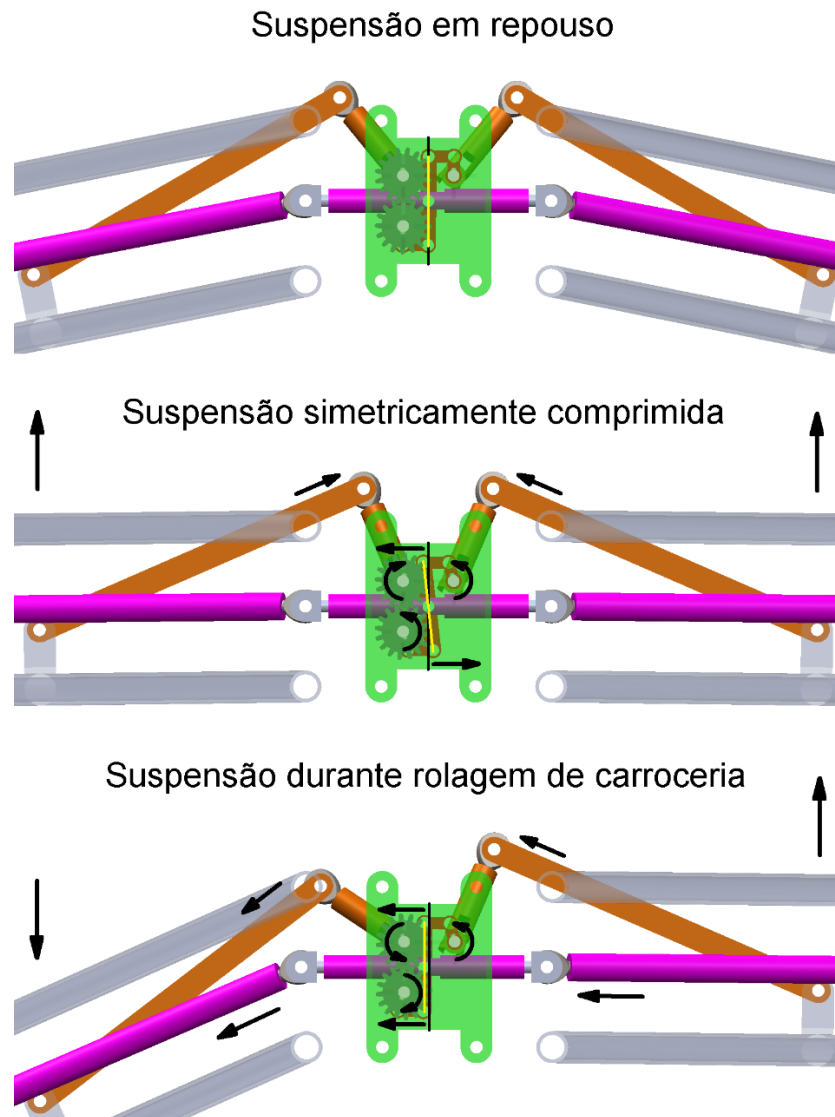
Devido às limitações de espaço na estrutura do veículo, as dimensões dos componentes internos foram arbitrariamente dimensionadas para que se encaixassem dentro do invólucro estrutural acoplado à estrutura principal. Portanto, optou-se por dimensionar o esterçamento por meio dos comprimentos dos elementos acionadores externos. Esse dimensionamento foi realizado por um processo de iteração, atribuindo comprimentos aleatórios a esses elementos e realizando ensaios de rolagem da carroceria, variando a razão entre os comprimentos das hastes de acionamento, até que o esterçamento máximo alcançado pela roda externa à direção da curva atingisse aproximadamente 4° de inclinação, assim como o valor máximo alcançado pelo mecanismo utilizado no segundo ensaio.

O acionamento do sistema funciona de duas maneiras: em uma situação em que o veículo ultrapassa um desnível simétrico nos lados esquerdo e direito do eixo traseiro, as bandejas de suspensão giram simetricamente em sentidos opostos, conduzindo as hastes primárias de acionamento em um movimento plano geral.

Em seguida, as hastes primárias de acionamento conduzem as hastes secundárias de acionamento em uma rotação ao redor de seus eixos de fixação com a caixa. O eixo direito transmite a rotação para a haste vertical direita (4d), que transfere o movimento para a haste horizontal direita (3d), deslocando a ponta superior da haste diretora principal (2) para o lado esquerdo, como demonstrado na Figura 27 no regime de compressão. Por outro lado, o eixo esquerdo está conectado a uma engrenagem (5A) que inverte a rotação da haste vertical esquerda por meio da engrenagem inferior (5B), levando a haste horizontal esquerda (3e) em um movimento plano geral que desloca a ponta inferior da haste diretora principal (2) para a direita.

A soma de todos esses movimentos resulta na rotação da haste diretora principal (2) ao redor do eixo central que a conecta à cremalheira (1), impedindo que ela se desloque para qualquer lado e mantendo a direção das rodas paralela ao eixo longitudinal do veículo.

Figura 27 – Princípio de funcionamento



Fonte: Autoria própria (2023)

A outra situação possível ocorre durante a rolagem da carroceria, na qual um lado da suspensão é comprimido enquanto o outro é estendido. Nesse caso, o mecanismo se comporta da seguinte maneira: suponha que o veículo esteja realizando uma curva para a esquerda. Durante a compressão do lado direito da suspensão, a bandeja direita gira no sentido anti-horário, deslocando a haste de

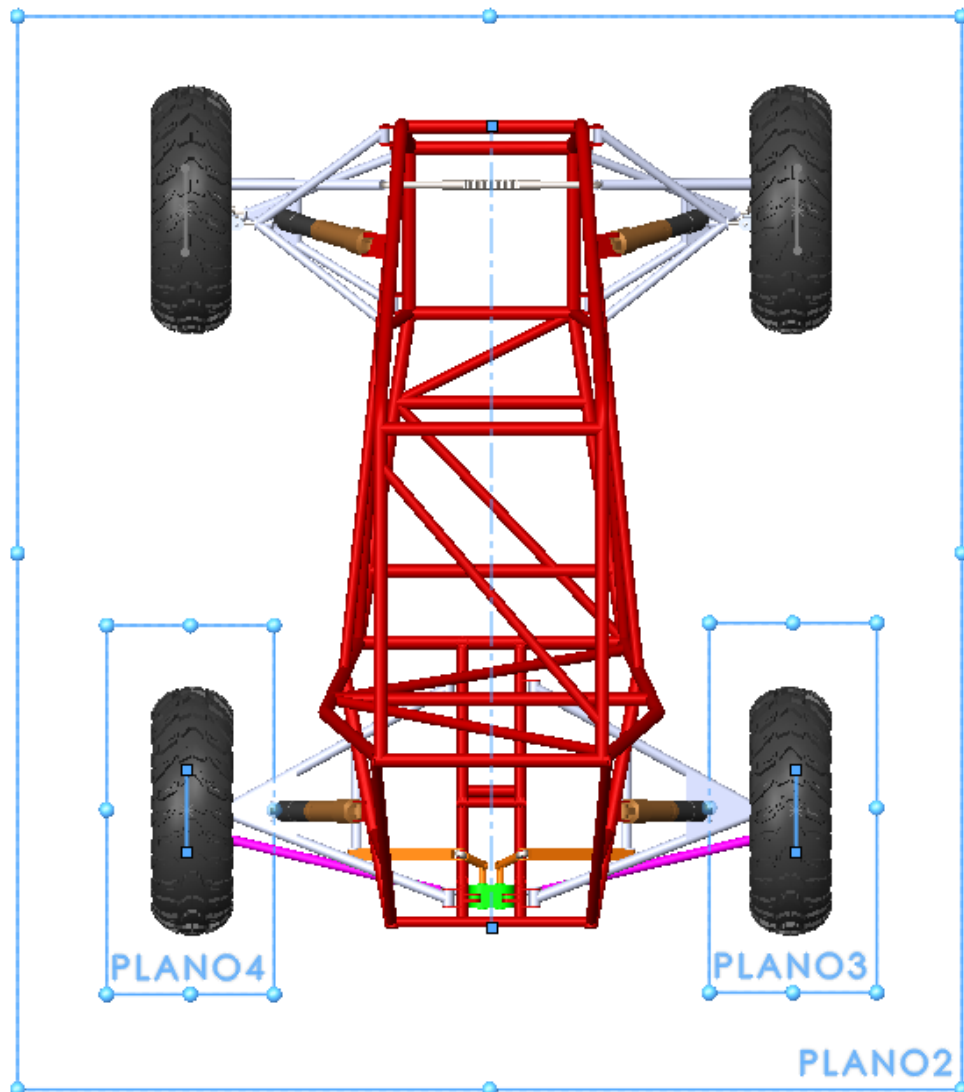
acionamento primário direita, que por sua vez gira a haste secundária direita de acionamento também no sentido anti-horário. Isso faz com que o mecanismo interno do lado direito desloque a ponta da haste diretora principal (2) para a esquerda, da mesma forma que ocorre no caso anterior.

Enquanto isso, o lado esquerdo da suspensão, que está em estado de extensão, gira a bandeja também no sentido anti-horário, o que resulta na rotação da haste secundária esquerda de acionamento no mesmo sentido (anti-horário). Através do conjunto de engrenagens, essa rotação é invertida, levando a haste vertical esquerda (4e) a girar no sentido horário, o que, por sua vez, guia a ponta inferior da haste diretora principal (2) para a esquerda, utilizando a haste horizontal esquerda (3e). A soma de todos os movimentos das pontas superior e inferior da haste diretora principal (2) direciona a haste para o lado esquerdo, movendo também a cremalheira (1) para o lado esquerdo. Esse movimento faz com que ambas as rodas rotacionem na direção oposta à da curva.

3.5 Ensaio de compressão simétrica da suspensão traseira

Para realizar este ensaio, foram criados três planos: o plano de repouso, que consiste em um plano horizontal que intercepta exatamente o centro das rodas quando o veículo está em condição de repouso. Ele é representado como plano 2 na Figura 28 e foi fixado em relação à estrutura para evitar qualquer deslocamento entre eles. O plano 3, também horizontal, foi fixado com a roda direita do veículo, impedindo qualquer movimento relativo entre eles. O mesmo foi repetido para o plano 4, com a roda esquerda.

Figura 28 – Planos de referência

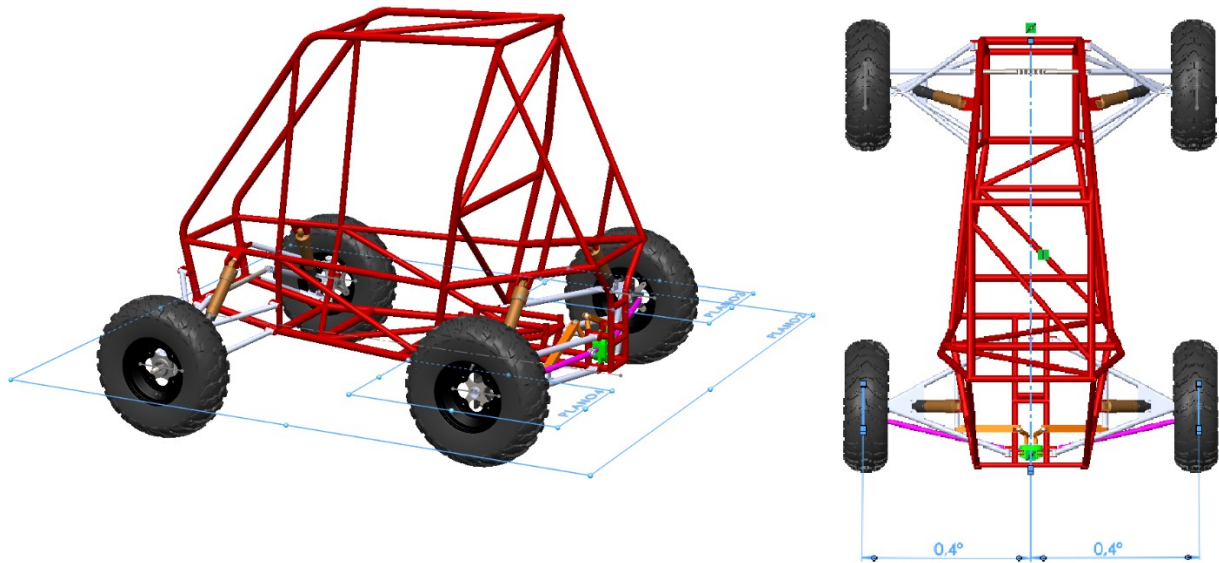


Fonte: Autorial própria (2023)

Os planos 3 e 4 foram posicionados de forma coincidente, evitando que as rodas direita e esquerda assumissem diferentes posições verticais. No entanto, o ensaio teve início com os planos 3 e 4 posicionados 115 mm abaixo do plano 2, simulando o curso máximo de extensão da suspensão. Em seguida, foram registrados os valores dos ângulos formados entre as linhas de direção das rodas e o eixo longitudinal do veículo.

Após essa etapa, os planos 3 e 4 foram posicionados 100 mm abaixo do plano 2, e novamente foram registrados os valores dos ângulos entre as direções das rodas e o plano longitudinal do veículo. Em seguida, o método foi repetido em intervalos de 25 mm até que os planos 3 e 4 alcançassem uma posição 100 mm acima do plano 2, conforme mostrado na Figura 29.

Figura 29 – Ensaio de compressão simétrica



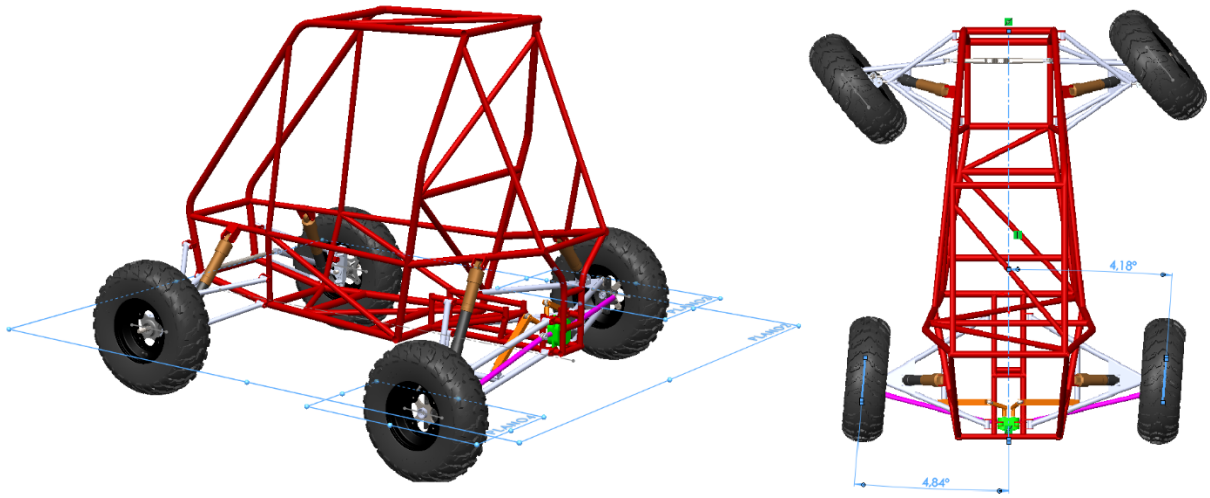
Fonte: Autoria própria (2023)

3.6 Ensaio de rolagem de carroceria

No ensaio 4, utilizando os mesmos planos do ensaio anterior, houve uma diferença significativa. Após registrar os valores dos ângulos para ambos os lados da suspensão com a suspensão em repouso, o lado esquerdo da suspensão foi posicionado, por meio do plano 3, a 25 mm acima do plano 2, enquanto o plano 4 foi posicionado a 25 mm abaixo do plano 2. Nesse ponto, realizou-se a segunda medição dos ângulos das rodas em relação ao eixo longitudinal do veículo.

Esse procedimento foi repetido de forma contínua em intervalos regulares de 25 mm, comprimindo o lado direito até atingir o curso vertical máximo de 100 mm de compressão acima do plano 2, e estendendo o lado esquerdo da suspensão até o seu curso máximo de 115 mm de extensão abaixo do plano 2, como ilustrado na Figura 30.

Figura 30 – Ensaio de rolagem de carroceria



Fonte: Autoria própria (2023)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios realizados evidenciam como o esterçamento das rodas do eixo traseiro em um veículo pode melhorar a capacidade de contornar curvas de menor raio, quando comparado a um veículo que não possui essa capacidade.

O estudo faz uma comparação entre o veículo que esterça as rodas traseiras, utilizando a geometria de suspensão na qual a projeção da haste de direção não segue a proposta de Reimpell (2001), e o modelo desenvolvido neste trabalho.

As tabelas apresentadas contêm colunas que relacionam a posição vertical da suspensão em relação ao estado de repouso, que ocorre na posição de 0 mm, com a inclinação entre a respectiva roda e o eixo longitudinal do veículo.

4.1 Análise do primeiro ensaio

O primeiro ensaio realizado refere-se ao modelo veicular que não possui esterçamento das rodas do eixo traseiro e utiliza uma geometria de suspensão fixa, conectada apenas à estrutura principal.

A Tabela 1 demonstra que ao longo de todo o curso vertical da suspensão, as direções das rodas do eixo traseiro variam em um ângulo entre -0,83 e 0,67 graus, mas é considerado nulo devido à capacidade elástica da borracha do pneu, que compensa a direção da roda por meio da deformação da banda de rodagem.

Tabela 1 – Direção das rodas traseiras no primeiro ensaio

POSIÇÃO VERTICAL DA SUSPENSÃO (mm)	INCLINAÇÃO DA RODA EM RELAÇÃO AO EIXO LONGITUDINAL (°)
100	0,67
75	0,48
50	0,30
25	0,12
00	0,00
-25	-0,22
-50	-0,39
-75	-0,56
-100	-0,73
-115	-0,83

Fonte: Autoria própria (2023)

4.2 Análise do Segundo ensaio

O segundo ensaio utiliza um modelo veicular que adota uma geometria fora do padrão estabelecido por Reimpell (2001), a fim de posicionar as articulações da haste de direção de maneira que a direção das rodas assumam uma divergência durante a compressão da suspensão e uma convergência durante a extensão.

Assume-se, portanto, que durante a rolagem da carroceria, tanto a roda do lado externo da curva quanto a roda do lado interno rotacionam no mesmo sentido e circulam em torno de um mesmo ponto.

Nesse ensaio, as hastes foram reposicionadas de forma a apresentar uma inclinação de 2,58 graus em relação às hastes do veículo do primeiro ensaio, que não apresenta variação na direção das rodas traseiras conforme a posição vertical da roda.

Dado que o sistema é baseado na posição das articulações das hastes de controle de direção das rodas, a análise foi realizada considerando a variação de posição vertical de apenas uma das rodas do eixo traseiro, uma vez que a direção da roda depende exclusivamente da posição vertical em que ela se encontra, independentemente da suspensão do lado oposto.

Considerando que valores positivos de inclinação da roda em relação ao eixo longitudinal do veículo indicam uma divergência na direção da roda, enquanto valores negativos indicam uma convergência, o comportamento pode ser observado na Tabela 2. O sistema demonstra a capacidade de esterçar as rodas traseiras para fora da curva percorrida, por meio da rolagem da carroceria, onde o lado externo da suspensão em relação à curva encontra-se em estado de compressão, representado por valores positivos, enquanto o lado interno encontra-se em estado de extensão, representado por valores negativos.

Tabela 2 – Direção das rodas traseiras no segundo ensaio

POSIÇÃO VERTICAL DA SUSPENSÃO (mm)	INCLINAÇÃO DA RODA EM RELAÇÃO AO EIXO LONGITUDINAL (°)
100	4,07°
75	3,01°
50	1,98°
25	0,98°
00	0,00°
-25	-0,99°
-50	-1,96°
-75	-2,94°
-100	-3,93°
-115	-4,53°

Fonte: Autoria própria (2023)

Isso comprova que o segundo modelo é capaz de contornar curvas de menor raio ao esterçar as rodas do eixo traseiro no sentido oposto à trajetória da curva, utilizando a rolagem da carroceria. No entanto, ao resolver esse problema, o mecanismo acarreta outra questão.

Durante o regime de compressão da suspensão, as rodas assumem direções divergentes, e no regime de extensão, as direções se convergem. Portanto, em uma situação em que o veículo transpõe um desnível simétrico, onde ambos os lados são comprimidos ou estendidos igualmente, pode ocorrer a perda de estabilidade do eixo traseiro. Isso ocorre porque ambas as rodas não apontam na direção do eixo longitudinal do veículo e tendem a seguir cada uma a sua própria direção, competindo entre si.

4.3 Análise do terceiro ensaio

Com a implementação do dispositivo concebido neste trabalho, é necessário analisar o comportamento da direção de ambas as rodas, levando em consideração o funcionamento conjunto da suspensão nos dois lados.

Isso ocorre porque o dispositivo integra todos os componentes de acionamento, trabalho e movimentação, nos quais o mecanismo de esterçamento

depende das posições verticais dos dois lados da suspensão para determinar as direções das rodas.

No entanto, o ensaio de compressão simultânea em ambos os lados, conforme demonstrado na Tabela 3, revela que quando os dois lados da suspensão traseira estão na mesma posição vertical, a cremalheira não se desloca e o esterçamento do eixo traseiro é anulado.

Tabela 3 – Direção das rodas traseiras no terceiro ensaio

POSIÇÃO VERTICAL DA SUSPENSÃO ESQUERDA (mm)	INCLINAÇÃO DA RODA ESQUERDA EM RELAÇÃO AO EIXO LONGITUDINAL (°)	POSIÇÃO VERTICAL DA SUSPENSÃO DIREITA (mm)	INCLINAÇÃO DA RODA DIREITA EM RELAÇÃO AO EIXO LONGITUDINAL (°)
100	0,39°	100	0,39°
75	0,25°	75	0,25°
50	0,13°	50	0,13°
25	0,05°	25	0,05°
00	0,00°	00	0,00°
-25	-0,01°	-25	-0,01°
-50	-0,01°	-50	-0,01°
-75	-0,08°	-75	-0,08°
-100	-0,19°	-100	-0,19°
-115	-0,28°	-115	-0,28°

Fonte: Autoria própria (2023)

Nesse caso, o dispositivo comprova sua capacidade de manter as trajetórias das rodas paralelas à direção do eixo longitudinal do veículo durante a transposição de desníveis simétricos em ambas as rodas ao percorrer uma trajetória retilínea.

4.4 Análise do quarto ensaio

O ensaio de rolagem difere significativamente dos demais ensaios realizados, pois nele é necessário analisar as direções das rodas em relação às posições verticais de ambos os lados da suspensão, que operam com posições verticais simultaneamente diferentes.

A Tabela 4 ilustra que os valores negativos da posição vertical do lado esquerdo da suspensão traseira indicam que ele está em estado de extensão,

enquanto o oposto ocorre no lado direito da suspensão, onde os valores positivos indicam que este lado está em estado de compressão.

Os dados de inclinação da roda esquerda em relação ao eixo longitudinal do veículo assumem valores negativos, indicando que a direção da roda esquerda converge em relação ao eixo longitudinal. Por outro lado, ocorre o oposto com os dados de inclinação da roda direita em relação ao eixo longitudinal, em que os valores positivos indicam que a direção da roda direita diverge em relação ao eixo longitudinal.

Tabela 4 – Direção das rodas traseiras no quarto ensaio

POSIÇÃO VERTICAL DA SUSPENSÃO ESQUERDA (mm)	INCLINAÇÃO DA RODA ESQUERDA EM RELAÇÃO AO EIXO LONGITUDINAL (°)	POSIÇÃO VERTICAL DA SUSPENSÃO DIREITA (mm)	INCLINAÇÃO DA RODA DIREITA EM RELAÇÃO AO EIXO LONGITUDINAL (°)
-115	-4,84°	100	-4,18°
-100	-4,46°	100	3,88°
-75	-3,29°	75	2,97°
-50	-2,16°	50	2,02°
-25	-1,06°	25	1,03°
00	0,00°	00	0,00°

Fonte: Autoria própria (2023)

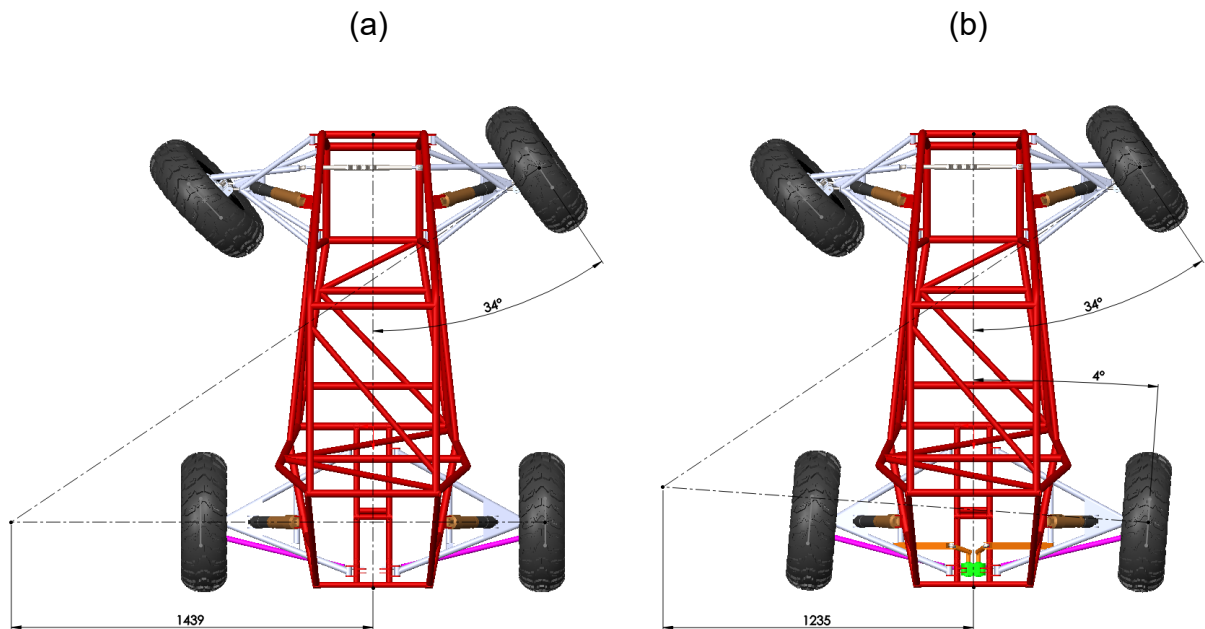
Contudo, o ensaio demonstra que durante a rolagem de carroceria, onde o lado da suspensão externo à curva é comprimido e o lado interno é estendido, ambas as direções das rodas traseiras apontam em direções opostas ao sentido da curva, o que resulta na redução do raio de curva do veículo.

4.5 Comparativo de raio de curva durante a rolagem de carroceria

Assumindo arbitrariamente uma inclinação de 34° entre a roda dianteira externa à trajetória da curva e o eixo longitudinal, para o caso de dois veículos, onde o primeiro não possui capacidade de esterçar as rodas traseiras (a) e o segundo esterça as rodas do eixo traseiro em função da rolagem de carroceria (b), conforme ilustrado na Figura 31, fica evidente a redução do raio de curva do veículo. Isso é demonstrado pelo fato de que o veículo do caso (b) possui um raio de curva aproximadamente 14% menor em comparação ao veículo do caso (a), conforme a

razão 1235 / 1439 que corresponde aos valores do raio de curva de cada veículo em milímetros.

Figura 31 – Comparativo de raio de curva

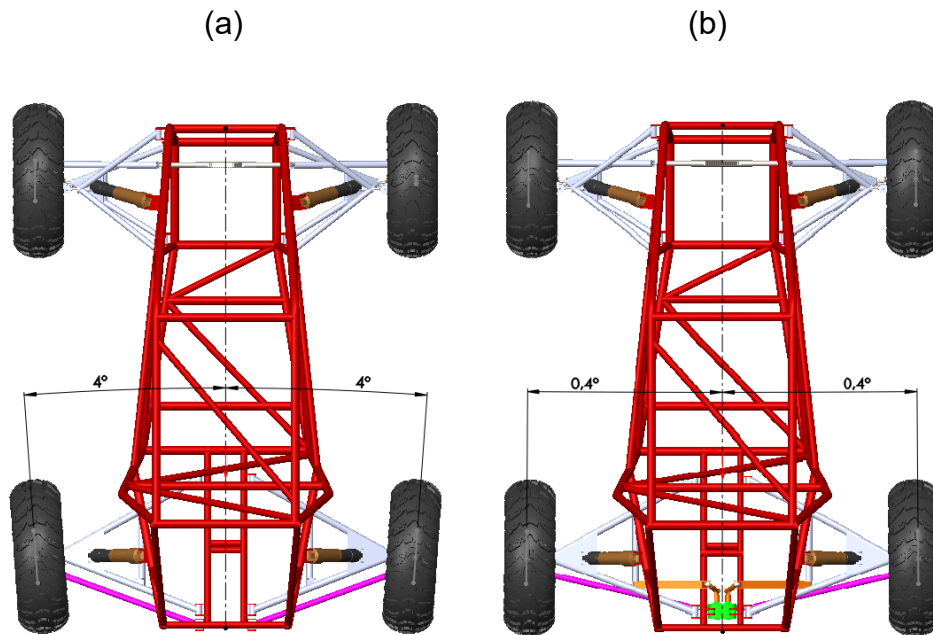


Fonte: Autoria própria (2023)

4.6 Comparativo das direções das rodas traseiras

A Figura 32 compara dois veículos, ambos com capacidade de esterçar as rodas do eixo traseiro. No primeiro caso (a), o veículo esterça as rodas por meio de uma geometria de suspensão do eixo traseiro que não segue as projeções geométricas propostas por Reimpell (2001) para o posicionamento da haste de direção. No segundo caso (b), o veículo esterça as rodas do eixo traseiro por meio do mecanismo concebido neste trabalho.

Ao analisar a situação em que a suspensão traseira é comprimida igualmente nos lados esquerdo e direito, observa-se que no caso (a) as rodas assumem direções convergentes em relação ao eixo longitudinal do veículo. Já no caso (b), as direções das rodas mantêm-se praticamente paralelas ao eixo longitudinal do veículo, uma vez que a deformação da banda de rodagem dos pneus é capaz de compensar esse pequeno deslocamento angular.

Figura 32 – Comparativo de compressão simétrica da suspensão

Fonte: Autoria própria (2023)

O ponto crucial é que em um veículo que esterça as rodas do eixo traseiro utilizando projeções geométricas diferentes daquelas propostas por Reimpell (2001) para dimensionar os elementos de suspensão, haverá sempre uma variação das direções das rodas traseiras em sentidos opostos durante uma compressão ou extensão simétrica em ambos os lados da suspensão. Isso resulta em perda de estabilidade no eixo traseiro ao transpor desníveis nos quais a suspensão é comprimida ou estendida de forma simétrica.

Por outro lado, o veículo equipado com o dispositivo concebido neste trabalho tem a capacidade de eliminar completamente a variação das direções das rodas do eixo traseiro quando os dois lados da suspensão são comprimidos ou estendidos simultaneamente.

5 CONCLUSÕES

O trabalho apresenta a concepção de um mecanismo capaz de esterçar as rodas do eixo traseiro de um veículo de quatro rodas durante a rolagem de carroceria. Além disso, durante o deslocamento em trajetória retilínea, o mecanismo é capaz de manter as direções das rodas traseiras paralelas ao eixo longitudinal do veículo ao transpor obstáculos simétricos em ambos os lados da suspensão traseira, evitando a perda de estabilidade no eixo traseiro.

Os métodos utilizados para demonstrar as características específicas de cada mecanismo ensaiado basearam-se no uso do software *SolidWorks* para realizar análises em diferentes posições ao longo de todo o curso da suspensão traseira.

O mecanismo cumpriu suas propostas ao longo dos ensaios, demonstrando os benefícios de esterçar as rodas do eixo traseiro em curvas e aumentar a capacidade de contornar curvas de menor raio em comparação a um veículo sem essa capacidade.

A concepção do mecanismo abre portas para estudos futuros que visam o dimensionamento estrutural dos componentes diante das cargas resultantes das situações em que o mecanismo é empregado.

Os resultados obtidos neste trabalho contribuem com novos recursos para projetos de automóveis, oferecendo uma nova solução para os problemas relacionados ao contorno de curvas e à variação da convergência das rodas em relação ao eixo longitudinal de um veículo de quatro rodas.

REFERÊNCIAS

BOLLES, Robert. **Bumpsteer tech back to basic**. Circle Track Magazine. 2021.

COSTA NETO, Álvaro. **Dinâmica veicular**. 2006.

DA ROSA, Edison & NICOLAZZI, Lauro. **Uma introdução a modelagem quase estática de automóveis**. 2012.

DIXON, John C. **Suspension geometry**. 2009.

GILLESPIE, Thomas D. **Fundamentals of vehicle dynamics**. 1992.

MILLIKEN, William F.; MILLIKEN, Douglas L. **Race car dynamics**. 1995.

MYSZKA, David H. **Machines & Mechanisms: Applied Kinematic Analysis**. 1998.

REIMPELL, Jornsen. **Automotive chassis engineering principles**. 2001.