



Guilherme Augusto Martens

**PROJETO DE UMA SUSPENSÃO TRASEIRA THREE-LINK COM BARRA
ESTABILIZADORA DESACOPLÁVEL PARA MINI BAJA SAE**

Horizontina - RS

2025

Guilherme Augusto Martens

**PROJETO DE UMA SUSPENSÃO TRASEIRA THREE-LINK COM BARRA
ESTABILIZADORA DESACOPLÁVEL PARA MINI BAJA SAE**

Trabalho Final de Curso apresentado como
requisito parcial para a obtenção do título de
bacharel em Engenharia Mecânica na Faculdade
Horizontina, sob a orientação do professor Dr.
Luís Carlos Wachholz

Horizontina - RS

2025

FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

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

**“Projeto de uma Suspensão Traseira Three-Link com Barra Estabilizadora
Desacoplável para Mini Baja SAE”**

Elaborada por:
Guilherme Augusto Martens

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

Aprovado em: 12/12/2025
Pela Comissão Examinadora

Prof. Dr. Luís Carlos Wachholz
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador

Prof. Dr. Rafael Luciano Dalcin
FAHOR – Faculdade Horizontina

Prof. Dr. Geovane Webler
FAHOR – Faculdade Horizontina

Horizontina - RS
2025

Agradeço, primeiramente, à minha família, pelo apoio incondicional durante toda a minha trajetória acadêmica. À minha mãe, pelo acolhimento, paciência e confiança que me sustentaram nos momentos mais difíceis, e ao meu pai, por sua orientação, ensinamentos e força, que me inspiraram a seguir em frente e ajudaram a formar quem sou hoje.

Expresso também minha gratidão à minha namorada, pela paciência, compreensão e por todo o suporte oferecido ao longo da graduação, sempre presente nos momentos de desafio e conquista.

Dedico uma menção especial ao meu avô. Seus ensinamentos práticos e sua paixão pela construção de soluções despertaram em mim, desde cedo, o interesse pela engenharia, deixando uma marca permanente na minha formação pessoal e profissional.

Agradeço ainda aos professores e colegas que, de diferentes formas, contribuíram para o meu crescimento ao longo da graduação, seja por meio de ensinamentos, incentivos ou parcerias nas jornadas de aprendizado.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, estiveram presentes nesta caminhada, meu sincero obrigado. Cada contribuição foi essencial para que este trabalho pudesse ser realizado.

“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá”.

(Ayrton Senna)

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a validação numérica de um sistema de suspensão traseira do tipo *three-link trailing arm* integrado a uma barra estabilizadora com mecanismo liga–desliga, aplicado ao chassi atualmente utilizado pela equipe Sinuelo FAHOR na competição Baja SAE. A proposta surge da necessidade de ampliar a capacidade de ajuste geométrico, melhorar o controle da rolagem do chassi e aumentar a versatilidade dinâmica do veículo em diferentes condições de terreno, superando limitações observadas em configurações convencionais de suspensão. A metodologia adotada caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, de abordagem quantitativa, baseada em revisão bibliográfica, modelagem tridimensional paramétrica em ambiente CAD e análises estruturais por Elementos Finitos (FEA). O sistema desenvolvido combina a robustez estrutural do braço arrastado com a flexibilidade geométrica do arranjo *three-link*, permitindo ajustes de cambagem, convergência e controle do centro de rolagem, além da integração de uma barra estabilizadora desacoplável, capaz de alterar o comportamento da suspensão conforme a condição de operação. As simulações estruturais consideraram cenários críticos de carregamento típicos do uso *off-road*, possibilitando a avaliação das tensões equivalentes de von Mises e dos coeficientes de segurança dos principais componentes. Os resultados indicaram que a geometria proposta apresenta comportamento estrutural satisfatório, com a maioria dos elementos operando dentro do regime elástico dos materiais selecionados, sendo identificadas apenas concentrações pontuais de tensão, passíveis de correção por ajustes dimensionais. Conclui-se que o sistema desenvolvido é tecnicamente viável, compatível com o chassi existente, ajustável e replicável, constituindo uma solução consistente para aplicações futuras em veículos Baja SAE e servindo como base para estudos experimentais, análises de fadiga e aprimoramentos funcionais do conjunto.

Palavras-chave: Suspensão. Baja SAE. *Three-link*. Barra estabilizadora. Barra estabilizadora liga–desliga. *Dog Clutch*. Dinâmica veicular. Análise por elementos finitos. Veículo *off-road*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Prova de Enduro da Competição Baja Etapa Nacional.....	17
Figura 2: Protótipo da equipe Baja Sinuelo.....	18
Figura 3: Entre-eixos e Bitola.....	19
Figura 4: Cambagem das Rodas (Positiva, Nula e Negativa).....	20
Figura 5: Convergência, Divergência e Paralelismo das Rodas.....	21
Figura 6: Movimento de <i>Bump</i> e <i>Rebound</i>	22
Figura 7: Efeito <i>Jacking</i>	22
Figura 8: Centro de Rolagem e Eixo de Rolagem do Chassis.....	23
Figura 9: Sistema de Suspensão Modelo <i>Three-link</i>	24
Figura 10: Suspensão Modelo <i>Multilink</i>	25
Figura 11: Suspensão Modelo <i>Trailing Arm</i>	26
Figura 12: Barra Estabilizadora Ativa desenvolvida pela Schaeffler.....	28
Figura 13: Barra Estabilizadora.....	28
Figura 14: Diagrama do Sistema <i>Dog Clutch</i>	29
Figura 15: Análise de FEA de um componente.....	32
Figura 16: Fluxograma Simplificado dos Passos Adotados.....	37
Figura 17: Fluxograma Completo dos Passos Adotados.....	38
Figura 18: Componentes Considerados Durante o Projeto.....	41
Figura 19: Vista Isométrica da Suspensão Traseira Direita do Protótipo.....	42
Figura 20: Componentes Projetados Pelo Autor.....	43
Figura 21: Entre-eixos e Bitolas do Protótipo.....	44
Figura 22: Cambagem Padrão em Posição Estática.....	45
Figura 23: Limite de Regulagem do Link de Cambagem.....	46
Figura 24: Divergência Padrão para Posição Estática.....	47
Figura 25: Ângulo Máximo de Ajuste da Convergência.....	48
Figura 26: Ângulo Máximo e Mínimo do Braço Principal em Relação à Posição Estática.....	49
Figura 27: Ângulo Total de Trabalho.....	50
Figura 28: Posição Estática do <i>Roll Center</i> Traseiro.....	50
Figura 29: Braço de Suspensão Estilo Arrastado.....	52
Figura 30: Aplicação do Braço de Suspensão no Projeto.....	53
Figura 31: <i>Camber Link</i> Regulável.....	54
Figura 32: Aplicação do <i>Camber Link</i> Regulável.....	54
Figura 33: Sistema da Barra Estabilizadora Liga-desliga.....	55
Figura 34: Barra Estabilizadora Utilizada no Projeto.....	56
Figura 35: Sentido de Acionamento da Alavanca.....	56
Figura 36: Demonstração do Desacoplamento da Barra.....	57
Figura 37: Sistema de Trava da Alavanca.....	57
Figura 38: Demonstração da Barra Estabilizadora Acoplada.....	58
Figura 39: Condição de Contorno da Orelha do <i>Camber Link</i>	60
Figura 40: Condição de Contorno na Orelha do Braço Principal.....	60
Figura 41: Condição de Contorno no Braço Principal (<i>Trailing Arm</i>).....	61
Figura 42: Condição de Contorno do <i>Camber Link</i>	62

Figura 43: Condição de Contorno da Barra de Estabilizadora.....	62
Figura 44: Condição de Contorno da Manga de Eixo.....	63
Figura 45: Análise da Tensão Aplicada à Orelha de Fixação do <i>Camber Link</i>	64
Figura 46: Análise da Tensão Aplicada à Orelha de Fixação do <i>Trailing Arm</i>	65
Figura 47: Resultado da Análise do Braço Principal (<i>Trailing Arm</i>).....	66
Figura 48: Tensões Encontradas no <i>Trailing Arm</i>	67
Figura 49: Resultado da Análise da Orelha de Fixação do Amortecedor do <i>Trailing Arm</i>	68
Figura 50: Resultado da Análise dos Braços de Cambagem (<i>Camber link</i>).....	69
Figura 51: Tensões Encontradas no <i>Camber Link</i>	69
Figura 52: Resultado da Análise do <i>Dog Clutch</i>	70
Figura 53: Resultado da Análise da Barra do Sistema de Estabilização.....	71
Figura 54: Resultado da Análise da Orelha da Barra Estabilizadora.....	72
Figura 55: Resultado da Segunda Análise da Orelha da Barra Estabilizadora.....	73
Figura 56: Resultado da Análise da Manga de Eixo.....	74

LISTA DE ABREVIATURAS E/OU SIGLAS

AISI – Instituto Americano do Ferro e do Aço

AW – Alumínio Forjado

CAD – Desenho Assistido por Computador

EN – European Norm (Norma Europeia)

FEA – Análise por Elementos Finitos

MEF – Método dos Elementos Finitos

MPa – Megapascal

N – Newton

Nm – Newton Metro

SAE – Sociedade dos Engenheiros Automotivos

SAE BRASIL – Sociedade de Engenheiros da Mobilidade – Brasil

LISTA DE PALAVRAS ESTRANGEIRAS

Bump – Compressão da suspensão

Camber – Cambagem

Caster – Cáster

Design – Projeto / desenhar

Dog Clutch – Acoplamento de dentes

Drop Test – Teste de queda

Fixed – Fixo

Jacking – Efeito de levantamento

Link – Barra / ligação mecânica

Marketing – Comercialização / divulgação

Multi-link – Multibraço / multilink

Off-road – Fora da estrada / todo-terreno

Rebound – Retorno / expansão da suspensão

Roll Center – Centro de rolagem

Setup – Configuração

Software – Programa de computador

Support – Apoio / condição de apoio

Track Width – Bitola

Trailing Arm – Braço arrastado

Wheelbase – Entre-eixos

Wheel-legged Vehicles – Veículo híbrido com rodas e pernas

Yaw-roll – Guinada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 TEMA.....	13
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	13
1.3 PROBLEMA DE PESQUISA.....	13
1.4 JUSTIFICATIVA.....	14
1.5 OBJETIVOS.....	14
1.5.1 Objetivo geral.....	14
1.5.2 Objetivos específicos.....	15
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	16
2.1 BAJA SAE.....	16
2.2 CONCEITOS BÁSICOS E DEFINIÇÕES.....	18
2.2.1 Entre-eixos e bitola.....	19
2.2.2 Cambagem.....	19
2.2.3 Convergência, Paralelismo e Divergência.....	20
2.2.4 Bump e Rebound.....	21
2.2.5 Centro de Rolagem.....	22
2.3 SUSPENSÃO.....	23
2.3.1 Suspensão Modelo Multilink.....	25
2.3.2 Suspensão Modelo <i>Trailing Arm</i>	25
2.3.3 Suspensão <i>Three-link Trailing Arm</i>	26
2.4 BARRA PANHARD OU BARRA ESTABILIZADORA.....	27
2.5 DINÂMICA VEICULAR.....	30
2.5.1 Forças Atuantes no Veículo.....	31
2.5.2 Suspensão e Estabilidade Dinâmica.....	31
2.5.3 Influência do Centro de Rolagem e Distribuição de Peso.....	31
2.5.4 Importância do Estudo da Dinâmica Veicular.....	32
2.6 ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS.....	32
2.6.1 Malha no Método de Elementos Finitos (MEF).....	33
2.6.2 Tensões Admissíveis.....	33
2.6.3 Condições de Contorno.....	34
2.7 FUNDAMENTAÇÃO E DIRECIONAMENTO DO PROJETO.....	34
3 METODOLOGIA.....	36
3.1 TIPOS DE PESQUISA.....	36
3.2 PESQUISA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	36
3.2.1 Levantamento de Requisitos e Definições do Projeto.....	36
3.2.2 Modelagem Tridimensional no <i>SolidWorks</i>	37
3.2.3 Análises Estruturais por Elementos Finitos (FEA).....	38
3.2.4 Aprimoramento e Validação do Modelo Final.....	39
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	40
4.1 MODELO TRIDIMENSIONAL DO SISTEMA DE SUSPENSÃO.....	40
4.2 CONCEITOS BÁSICOS DA SUSPENSÃO APLICADOS AO PROJETO.....	43
4.2.1 Entre-eixos e Bitola do Projeto.....	43

4.2.2 Cambagem do Projeto.....	45
4.2.3 Convergência do Projeto.....	47
4.2.4 Ângulo de Trabalho do Projeto.....	48
4.2.5 Centro de Rolagem do Projeto.....	50
4.3 SISTEMA DE SUSPENSÃO.....	51
4.3.1 Braço de Suspensão Estilo <i>Trailing</i> (<i>Trailing Arm</i>).....	51
4.3.2 Link de Suspensão Regulável (<i>Camber Link</i>).....	53
4.3.3 Barra Estabilizadora Liga-desliga.....	55
4.4 DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	58
4.4.1 Pontos de Fixação no Chassis.....	59
4.4.2 Condição de Contorno do Braço Principal e do <i>Camber Link</i>	61
4.4.3 Condição de Contorno na Barra de Estabilizadora.....	62
4.4.4 Condição de Contorno na Manga de Eixo.....	63
4.5 ANÁLISE DOS COMPONENTES.....	63
4.5.1 Pontos de Fixação no Chassis.....	64
4.5.2 Braço Principal (<i>Trailing Arm</i>).....	66
4.5.3 <i>Camber Link</i>	68
4.5.4 Barra de Estabilizadora.....	70
4.5.5 Manga de Eixo.....	73
4.6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	74
CONCLUSÃO.....	78
REFERÊNCIAS.....	80

1 INTRODUÇÃO

Em veículos *off-road*, como os protótipos desenvolvidos para a competição Baja SAE, o sistema de suspensão exerce papel determinante no desempenho dinâmico, na estabilidade e na segurança do veículo. Durante as provas, os protótipos são submetidos a terrenos severos, obstáculos imprevisíveis e manobras em condições extremas, exigindo que a suspensão mantenha o contato efetivo dos pneus com o solo e controle adequadamente os movimentos da roda e do chassi. Nesse contexto, limitações geométricas ou estruturais da suspensão impactam diretamente a dirigibilidade, a tração e a confiabilidade do conjunto.

A experiência prática da equipe Sinuelo FAHOR evidencia que sistemas de suspensão com geometrias pouco ajustáveis dificultam a adaptação do veículo às diferentes condições de pista enfrentadas nas competições. A ausência de flexibilidade geométrica compromete a possibilidade de otimizar parâmetros como cambagem, convergência e comportamento em rolagem, resultando em soluções que atendem apenas parcialmente às demandas dinâmicas do veículo. Dessa forma, identifica-se uma lacuna técnica relacionada ao desenvolvimento de um sistema de suspensão traseira que seja simultaneamente robusto, ajustável e compatível com um chassi já existente.

Nesse cenário, o modelo *three-link trailing arm* apresenta-se como uma alternativa técnica promissora, ao combinar a robustez estrutural característica do trailing arm com a flexibilidade geométrica dos sistemas multilink. Essa configuração possibilita maior controle sobre parâmetros fundamentais da suspensão, influenciando diretamente a estabilidade, a resposta em curvas e o comportamento do veículo sob aceleração e frenagem (Teza, 2022). No entanto, sua aplicação integrada a mecanismos que permitam variação do comportamento dinâmico ainda é pouco explorada no contexto da Baja SAE.

Adicionalmente, o controle da rolagem do chassi constitui um fator crítico para a estabilidade lateral em veículos *off-road*. A incorporação de uma barra estabilizadora com mecanismo liga-desliga representa uma abordagem conceitualmente inovadora, ao permitir a adaptação do comportamento da suspensão conforme a condição de operação. Diferentemente das barras estabilizadoras convencionais de rigidez fixa, o sistema proposto possibilita maior

estabilidade em curvas quando acoplado e maior articulação das rodas em terrenos irregulares quando desacoplado, sem a necessidade de sistemas ativos complexos.

Diante disso, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de suspensão traseira do tipo *three-link trailing arm* integrado a uma barra estabilizadora liga–desliga, aplicado ao chassi atualmente utilizado pela equipe Sinuelo FAHOR de Baja SAE. A contribuição central do estudo consiste na concepção de uma solução ajustável, robusta e replicável, capaz de suprir uma lacuna técnica existente nos projetos da equipe, utilizando modelagem computacional e simulações estruturais como ferramentas de validação. Acredita-se que os resultados obtidos possam servir como base para futuras implementações práticas e para a evolução técnica dos sistemas de suspensão empregados em veículos Baja SAE.

1.1 TEMA

Desenvolvimento de um sistema de suspensão traseira do tipo *three-link trailing arm* com barra estabilizadora liga-desliga, aplicado ao chassi atual da equipe Sinuelo FAHOR de Baja SAE.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Este trabalho limita-se ao desenvolvimento do projeto de um sistema de suspensão traseira do tipo *three-link trailing arm* integrado a uma barra estabilizadora liga-desliga, aplicado ao chassi atualmente utilizado pela equipe Sinuelo FAHOR de Baja SAE. O projeto foi elaborado com base em geometrias padronizadas e referências estruturais adotadas pela equipe, buscando compatibilidade com futuros protótipos da equipe e facilidade de implementação por outras formações. A proposta abrange análises geométrica, estrutural e funcional do sistema, realizadas por meio de modelagem computacional e simulações numéricas, sem incluir a etapa de fabricação física ou testes práticos em campo.

1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

Como projetar um sistema de suspensão traseira do tipo *three-link*, aplicável a um chassi já existente da equipe Sinuelo FAHOR, que ofereça ampla capacidade de

ajuste geométrico e possa ser facilmente implementado por outras equipes com o mínimo de adaptações estruturais?

1.4 JUSTIFICATIVA

A suspensão exerce papel fundamental no desempenho, na estabilidade e na segurança de veículos *off-road*, especialmente em competições como a Baja SAE, nas quais o protótipo é submetido a terrenos severos e condições dinâmicas extremas. Conforme destacado por Macorin (2006) e Gillespie (2021), a configuração da suspensão influencia diretamente a absorção de impactos, a tração e o comportamento direcional do veículo, tornando seu projeto um fator crítico para o desempenho competitivo.

Nesse contexto, a ausência de mecanismos de ajuste geométrico limita a capacidade de adaptação do veículo às diferentes condições de pista. Assim, este trabalho justifica-se pela proposta de um sistema de suspensão traseira do tipo *three-link*, que combina a robustez do *trailing arm* com a flexibilidade do multilink, permitindo ajustes de parâmetros como cambagem e convergência. A integração de uma barra estabilizadora com mecanismo liga–desliga amplia ainda mais a versatilidade do conjunto, possibilitando maior estabilidade em curvas e maior articulação em terrenos irregulares (Souza et al., 2019).

Além disso, o desenvolvimento do sistema aplicado a um chassi já existente exige atenção à integração com subsistemas como a transmissão e ao controle da rolagem do veículo, aspectos fundamentais para a estabilidade e segurança em uso *off-road* (Santana e Vallibor, 2017; Jazar, 2017). Dessa forma, o projeto proposto busca uma solução ajustável, robusta e compatível com o contexto real da equipe, contribuindo para a evolução técnica dos protótipos Baja SAE.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo geral

Desenvolver o projeto de um sistema de suspensão traseira do tipo *three-link trailing arm* com barra estabilizadora liga-desliga, aplicável a um chassi já existente, por meio de modelagem computacional e simulações estruturais, visando desempenho dinâmico, confiabilidade estrutural e viabilidade de replicação em novos chassis.

1.5.2 Objetivos específicos

- a. Projetar a geometria do sistema *three-link trailing arm*, garantindo possibilidade de ajuste de cambagem e convergência.
- b. Modelar o conjunto tridimensional no *software* CAD, incluindo braços, orelhas, *camber link* e barra estabilizadora.
- c. Realizar simulações em FEA para avaliar tensões e pontos críticos, assegurando que os componentes operem abaixo do limite do material.
- d. Verificar interferências com outros subsistemas do veículo e propor soluções que garantam compatibilidade e viabilidade de montagem.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Esta seção apresenta os principais conceitos envolvidos no projeto, abordando desde a competição Baja SAE até parâmetros como entre-eixos, bitola, cambagem e centro de rolagem, fundamentais para garantir a estabilidade e a dirigibilidade do veículo.

Além disso, são analisados diferentes modelos de suspensão, como multilink, *trailing arm*, e *three-link trailing arm*, destacando a escolha deste último devido à sua flexibilidade e controle da geometria. A revisão também explora a interação da suspensão com a dinâmica do veículo, fornecendo a base técnica para as decisões adotadas no projeto.

2.1 BAJA SAE

A Baja SAE é uma competição de engenharia promovida internacionalmente pela SAE (*Society of Automotive Engineers*), na qual equipes universitárias projetam, constroem e validam veículos *off-road* monolugares, simulando desafios reais enfrentados pela indústria automotiva.

No Brasil, a competição é organizada pela SAE Brasil e conta com etapas regionais e uma etapa nacional, reunindo instituições de ensino de todo o país. Durante os eventos, os protótipos são avaliados por meio de provas estáticas e dinâmicas que contemplam critérios como qualidade do projeto, segurança, inovação, desempenho mecânico e resistência estrutural.

As provas dinâmicas incluem percursos com obstáculos, terrenos irregulares, aceleração, manobrabilidade e resistência, submetendo os veículos a condições severas de carregamento. A Figura 1 apresenta um exemplo da prova de enduro da etapa nacional, na qual os protótipos percorrem um trajeto projetado para impor elevadas solicitações mecânicas ao conjunto durante um período prolongado, de quatro horas. Essa prova permite avaliar de forma abrangente a robustez, a confiabilidade e a viabilidade de produção dos veículos em ambiente competitivo (SAE Brasil, 2025).

Figura 1: Prova de Enduro da Competição Baja Etapa Nacional



Fonte: SAE Brasil (2025)

O evento proporciona aos estudantes a oportunidade de aplicar conhecimentos teóricos em situações práticas, estimulando o desenvolvimento de competências técnicas e gerenciais. A construção do protótipo envolve a integração de diversas áreas da engenharia, com destaque para a suspensão, que desempenha papel central na estabilidade e na performance do veículo em terrenos irregulares. Mais do que uma competição, a Baja SAE funciona como uma iniciativa acadêmica que simula, em ambiente universitário, todas as etapas do desenvolvimento de um produto automotivo, desde a concepção até a fase de fabricação.

Nessa proposta, os estudantes de engenharia são desafiados a projetar e desenvolver um veículo *off-road* de pequeno porte, considerando aspectos como viabilidade de produção em massa, regulamentações técnicas, segurança e desempenho dinâmico. As equipes participantes são compostas por acadêmicos voluntários, que se organizam em núcleos técnico e de negócios, atuando em áreas como gerenciamento de projeto, planejamento orçamentário, *marketing*, *design*, análise estrutural e validação numérica. Essa divisão de funções proporciona uma vivência prática da realidade da indústria automotiva, incentivando o trabalho em equipe, a liderança e a inovação tecnológica.

Nesse contexto, destaca-se a Equipe Sinuelo, fundada em 2006 na FAHOR, que ao longo de sua trajetória tem possibilitado a formação prática de diversos engenheiros, participando de competições nacionais e contribuindo para o avanço

de soluções aplicadas ao desenvolvimento de veículos *off-road* (EQUIPE SINUELO, 2025). A Figura 2 apresenta um protótipo típico utilizado nas competições Baja SAE.

Figura 2: Protótipo da equipe Baja Sinuelo



Fonte: Equipe Sinuelo (2025)

2.2 CONCEITOS BÁSICOS E DEFINIÇÕES

A suspensão de um veículo é um dos subsistemas mais críticos para o desempenho no quesito dinâmica *off-road*, influenciando diretamente sua estabilidade, dirigibilidade e conforto. Para compreender seu funcionamento, é essencial definir alguns parâmetros fundamentais. O entre-eixos e a bitola afetam a distribuição de peso e a estabilidade do veículo, impactando sua capacidade de manobra e resposta dinâmica.

A cambagem refere-se ao ângulo da roda em relação ao plano vertical do veículo, sendo essencial para o controle da aderência dos pneus ao solo. Já a convergência e divergência das rodas determinam o comportamento direcional e influenciam a estabilidade em linha reta e em curvas. Além disso, os movimentos de *bump* e *rebound* descrevem a compressão e o retorno da suspensão, afetando a absorção de impactos e o contato das rodas com o solo. Por fim, o centro de rolagem é um ponto crucial na análise dinâmica, pois define a inclinação do chassi durante curvas e influencia a transferência de carga entre as rodas (Souza, 2021).

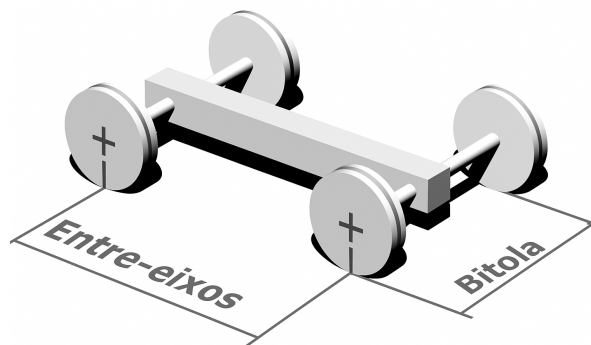
O entendimento desses conceitos é essencial para o desenvolvimento de um sistema de suspensão eficiente, garantindo que o veículo tenha um desempenho adequado em terrenos irregulares e exigentes.

2.2.1 Entre-eixos e bitola

O entre-eixos (*wheelbase*) e a bitola (*track width*) são parâmetros fundamentais para a dinâmica veicular, influenciando diretamente a estabilidade, a dirigibilidade e o comportamento em curvas. O entre-eixos refere-se à distância entre os eixos dianteiro e traseiro do veículo, sendo um fator determinante para sua resposta direcional e distribuição de peso. Segundo Reimpell (2014), veículos com entre-eixos mais curtos tendem a ser mais ágeis e responsivos, enquanto aqueles com entre-eixos mais longos apresentam maior estabilidade em altas velocidades.

A bitola corresponde à distância entre as rodas de um mesmo eixo, afeta a resistência ao rolamento e a capacidade de aderência lateral. Ainda em concordância com o autor, a bitola mais larga reduz a transferência lateral de carga e melhora a estabilidade em curvas, tornando o veículo menos propenso ao capotamento. A Figura 3 ilustra esses conceitos, demonstrando a relação entre essas medidas e sua influência no veículo.

Figura 3: Entre-eixos e Bitola



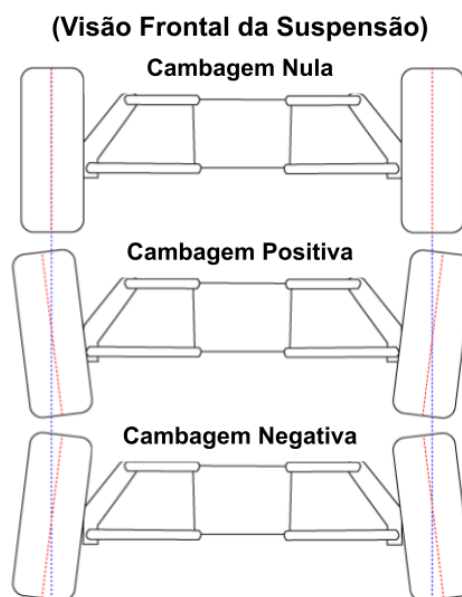
Fonte: Adaptado de Snelgrove (2025)

2.2.2 Cambagem

A cambagem é o ângulo de inclinação da roda em relação ao plano vertical do veículo, sendo um dos principais ajustes que influenciam a distribuição de carga nos pneus e a aderência ao solo. Quando a parte superior da roda inclinar para dentro, tem-se a cambagem negativa, que melhora a estabilidade em curvas ao aumentar a superfície de contato do pneu externo. Já a cambagem positiva, onde a parte superior da roda se inclina para fora, pode comprometer a aderência, tornando o veículo mais instável.

A cambagem varia dinamicamente conforme a compressão e o retorno da suspensão, sendo um fator determinante na distribuição das forças laterais e na resposta do veículo em manobras acentuadas (Jazar, 2017). A Figura 4 ilustra as variações de cambagem e sua influência no contato do pneu com o solo em diferentes condições de rodagem.

Figura 4: Cambagem das Rodas (Positiva, Nula e Negativa)



Fonte: Adaptado de Town Fair Tire (2025)

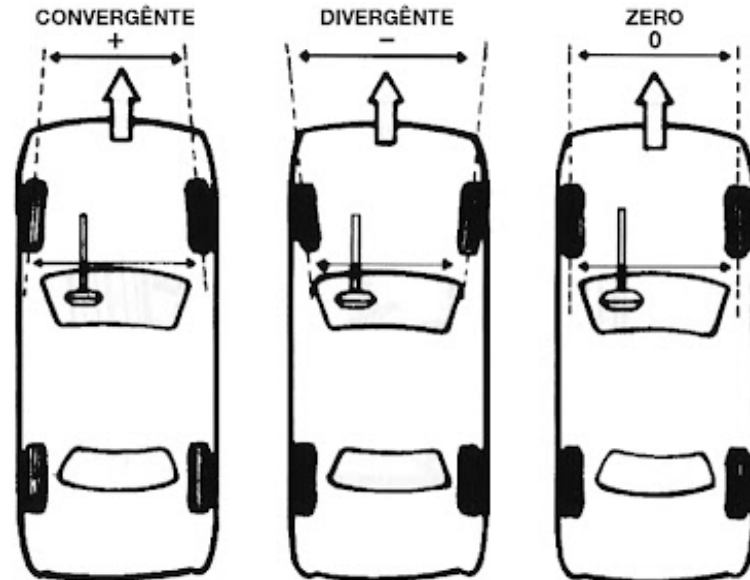
2.2.3 Convergência, Paralelismo e Divergência

A convergência, divergência e paralelismo das rodas referem-se ao alinhamento das rodas no plano horizontal e têm impacto direto na estabilidade direcional e na resposta da direção. A convergência ocorre quando as rodas estão ligeiramente voltadas para dentro, reduzindo oscilações na direção e proporcionando maior estabilidade em linha reta. Por outro lado, a divergência, quando as rodas estão apontadas para fora, torna a direção mais responsiva, mas pode comprometer a estabilidade em altas velocidades.

O paralelismo, quando as rodas estão perfeitamente alinhadas, minimiza o desgaste dos pneus e melhora a eficiência da rolagem. Conforme Jazar (2017), o ajuste correto desses ângulos é essencial para equilibrar estabilidade e dirigibilidade, evitando esforços excessivos sobre os pneus e garantindo um desempenho mais previsível do veículo. A Figura 5 demonstra a diferença entre

convergência, divergência e paralelismo, destacando suas aplicações em diferentes configurações de suspensão.

Figura 5: Convergência, Divergência e Paralelismo das Rodas



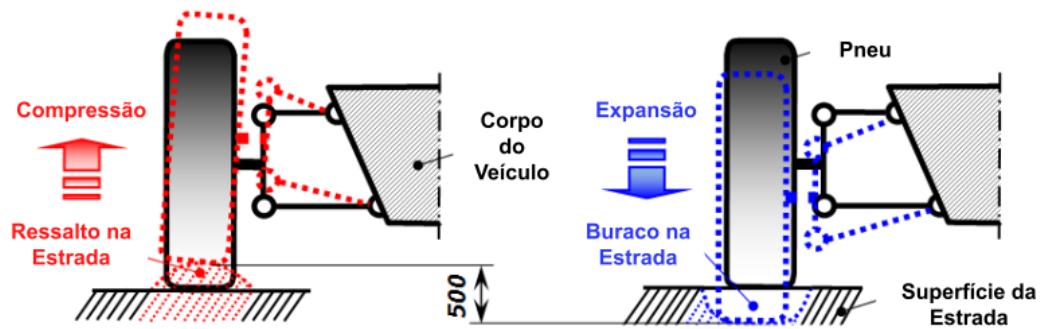
Fonte: Overdrive (2012)

2.2.4 Bump e Rebound

O *bump* (compressão) e o *rebound* (expansão) são movimentos fundamentais no funcionamento de um sistema de suspensão, influenciando diretamente a estabilidade e o controle do veículo. O *bump* ocorre quando a roda se desloca verticalmente para cima ao encontrar uma irregularidade na pista, comprimindo a suspensão e armazenando energia nas molas e amortecedores. Já o *rebound* refere-se ao movimento contrário, quando a roda retorna à sua posição original após a compressão ou atua em curso negativo durante uma depressão na pista, sendo controlado pela taxa de amortecimento para evitar oscilações excessivas.

A relação entre *bump* e *rebound* deve ser cuidadosamente ajustada para evitar problemas como o *jacking*, fenômeno no qual um amortecimento excessivo no retorno impede que a suspensão recupere sua posição de equilíbrio, reduzindo progressivamente o curso útil da suspensão (Milliken; Milliken, 1995). A Figura 6 ilustra a interação entre esses movimentos, demonstrando sua influência no desempenho da suspensão em diferentes condições de rodagem.

Figura 6: Movimento de *Bump* e *Rebound*

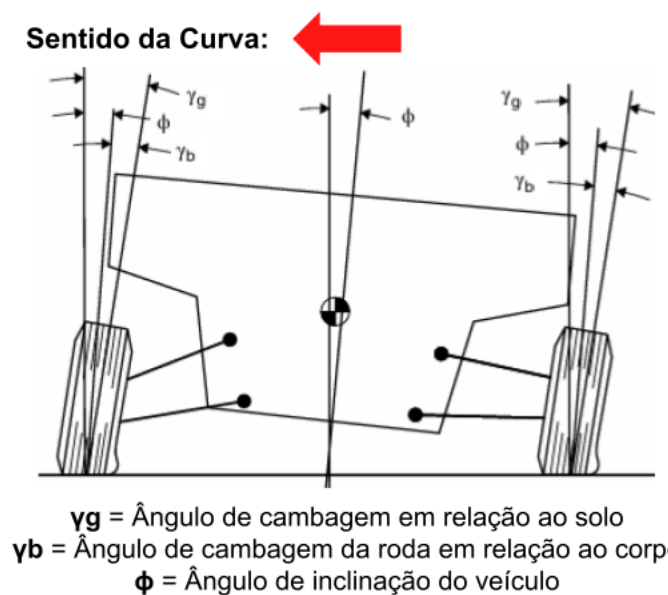


Fonte: Adaptado de Lajqi et al. (2013)

2.2.5 Centro de Rolagem

O centro de rolagem do chassi é um elemento fundamental na dinâmica veicular, pois influencia diretamente a transferência de carga lateral durante curvas. Segundo Gillespie (2021), esse ponto corresponde à interseção das forças laterais aplicadas à suspensão com a estrutura do veículo, afetando sua estabilidade e controle. A altura do centro de rolagem impacta o comportamento da carroceria: quanto mais alto, menor será a inclinação lateral, reduzindo a rolagem. No entanto, uma posição elevada pode causar o efeito *jacking* ou levantamento, exemplificado na Figura 7, que demonstra o veículo torcendo lateralmente no seu centro de gravidade, comprometendo sua aderência ao solo e alterando a distribuição de carga dinâmica.

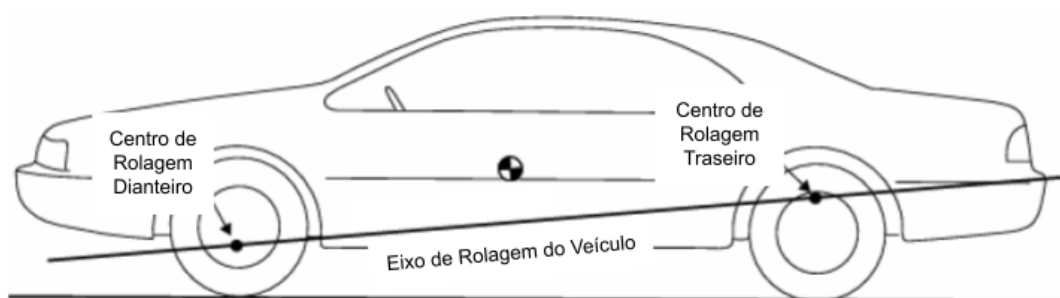
Figura 7: Efeito *Jacking*



Fonte: Adaptado de Gillespie (2021)

Por outro lado, um centro de rolagem muito baixo pode aumentar excessivamente a rolagem do chassi, exigindo maior rigidez da suspensão para minimizar esse efeito (Milliken; Milliken, 1995). Portanto, a configuração ideal deve equilibrar estabilidade e controle, garantindo uma melhor resposta do veículo em curvas e manobras bruscas. A Figura 8 ilustra a posição do centro de rolagem e sua influência na dinâmica do veículo.

Figura 8: Centro de Rolagem e Eixo de Rolagem do Chassis



Fonte: Adaptado de Gillespie (2021)

2.3 SUSPENSÃO

O sistema de suspensão de um veículo não se limita apenas ao conforto, mas também tem um papel essencial na dirigibilidade e na dinâmica veicular. Segundo Nicanor *et al.* (2016) para garantir estabilidade e um melhor desempenho, todos os componentes da suspensão devem ser projetados considerando fatores como a absorção de impactos e a busca de manter o contato das rodas com o solo.

Uma suspensão bem projetada deve atender aos requisitos mínimos de funcionamento. Conforme Nicanor *et al.* (2016), o projeto deve permitir a conformidade vertical das rodas em terrenos irregulares, ou seja, garantir que acompanhem os desníveis da pista, isolando e suavizando os movimentos do chassi. Além disso, a suspensão deve reagir às forças longitudinais geradas pelos pneus durante acelerações e frenagens, bem como às forças laterais em curvas. Também é essencial que proporcione resistência à rolagem do chassi e mantenha os pneus em contato com o solo pelo maior tempo possível, mesmo durante variações de carga (Gillespie, 2021).

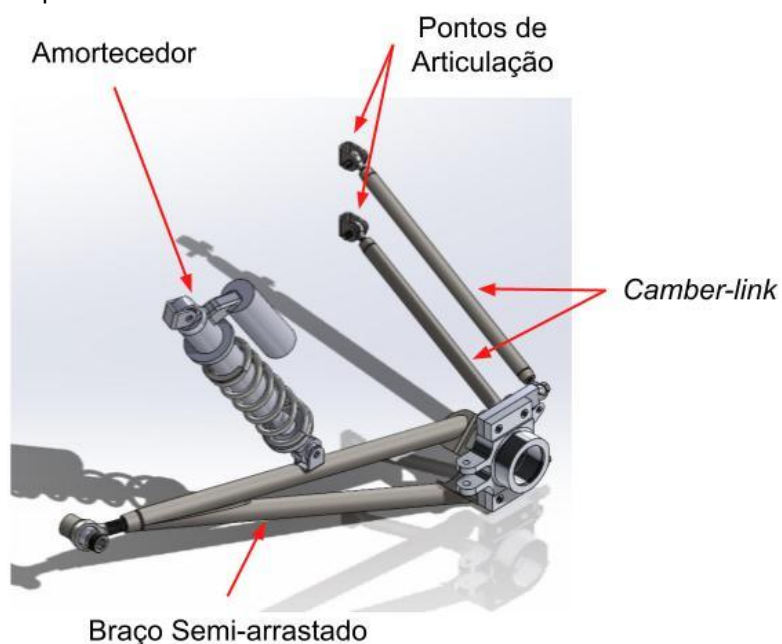
A suspensão de um veículo é composta por diversos elementos essenciais para garantir seu correto funcionamento, estabilidade e segurança durante a condução. No caso do modelo *three-link trailing arm*, esses elementos trabalham em

conjunto para controlar os movimentos da roda, absorver impactos e manter a geometria do veículo dentro dos parâmetros desejados. Os principais componentes que formam esse sistema são:

- a. Braço de suspensão (*three-link*) – Responsável por conectar a roda ao chassi e permitir o movimento controlado da suspensão.
- b. Braços de suspensão (*links*) – Responsáveis por conectar a roda ao chassi permitindo ajustes no sistema.
- c. Pontos de articulação (juntas esféricas e buchas) – Permitem a movimentação dos braços de suspensão, reduzindo atritos e impactos.
- d. Amortecedores – Controlam a dissipação de energia dos impactos, garantindo maior estabilidade e conforto.
- e. Molas – Suportam o peso do veículo e absorvem as irregularidades do terreno.
- f. Barra Panhard ou Barra Estabilizadora – Mantém a posição lateral do eixo traseiro, garantindo estabilidade.
- g. Fixações e suportes (Parafusos, porcas e orelhas de fixação) – Estruturas que conectam os componentes ao chassi e ao conjunto da suspensão.

Esses componentes, ilustrados na Figura 9, atuam em conjunto para aprimorar o controle da tração, estabilidade e dirigibilidade do veículo.

Figura 9: Sistema de Suspensão Modelo *Three-link*

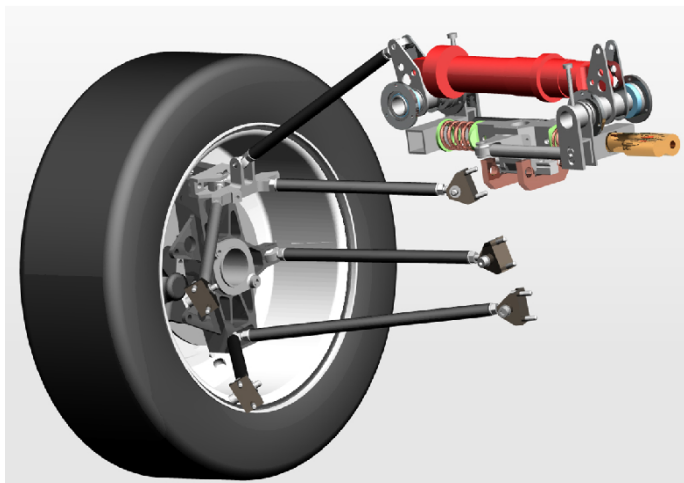


Fonte: Adaptado de Bullock *et al.* (2023)

2.3.1 Suspensão Modelo Multilink

O sistema de suspensão multilink é projetado para oferecer um equilíbrio entre conforto, estabilidade e dirigibilidade. Segundo Kasahara *et al.* (2000), esse tipo de suspensão utiliza múltiplos braços independentes para controlar os movimentos da roda, permitindo melhor ajuste da geometria e maior absorção de impactos. Entre suas vantagens estão a redução do ruído e vibração na transmissão, melhor resposta dinâmica em curvas e maior eficiência no controle da cambagem e da convergência das rodas. A estrutura e os componentes desse sistema podem ser visualizados na Figura 10, ilustrando a complexidade estrutural do modelo. Essas características tornam a suspensão multilink uma escolha ideal para veículos que exigem alto desempenho dinâmico e conforto ao dirigir.

Figura 10: Suspensão Modelo Multilink



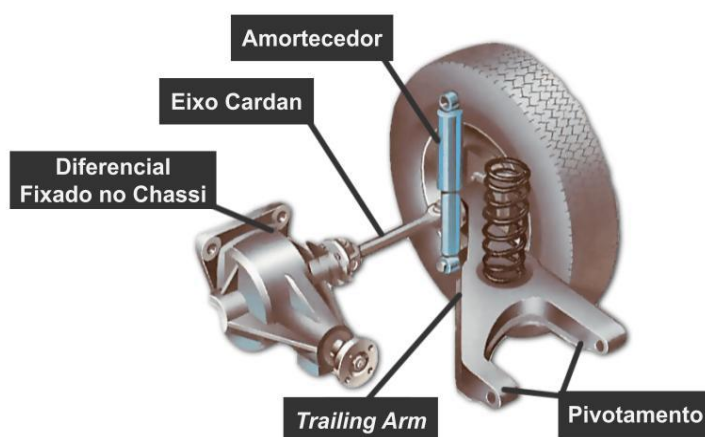
Fonte: Lamers (2008)

2.3.2 Suspensão Modelo *Trailing Arm*

O sistema de suspensão *trailing arm* é amplamente empregado em veículos *off-road* e de passeio, sendo valorizado por sua robustez estrutural, simplicidade de construção e bom desempenho em condições adversas. Segundo Ukamnal *et al.* (2014), esse modelo é composto por braços de controle montados longitudinalmente na direção de deslocamento do veículo e fixados ao chassi por pontos de pivô, permitindo o movimento vertical da roda com mínima alteração nos ângulos de cambagem e convergência. Entre suas vantagens estão a boa resistência a esforços de tração e frenagem, comportamento previsível durante o curso da suspensão e integração simplificada com sistemas de amortecimento.

No entanto, o aumento da massa não suspensa pode comprometer o conforto em alguns casos, exigindo atenção no dimensionamento dos componentes. A estrutura e os principais elementos do sistema *trailing arm* são ilustrados na Figura 11, evidenciando sua geometria funcional e sua aplicação. Essas características tornam o modelo uma escolha adequada para projetos que priorizam durabilidade, controle mecânico e compatibilidade com terrenos irregulares.

Figura 11: Suspensão Modelo *Trailing Arm*



Fonte: How a car works (2025)

2.3.3 Suspensão *Three-link Trailing Arm*

O sistema de suspensão *three-link trailing arm* combina elementos dos modelos multilink e *trailing arm*, proporcionando um equilíbrio entre controle geométrico, resistência estrutural e eficiência dinâmica. De acordo com Kasahara *et al.* (2000), a suspensão multilink permite ajustes mais precisos dos ângulos das rodas, reduzindo esforços nas articulações e otimizando a estabilidade do veículo. Além disso, esse sistema melhora a aderência dos pneus ao solo ao longo do curso da suspensão, garantindo um melhor desempenho em curvas e frenagens.

Segundo Ukamnal *et al.* (2014), a geometria do *trailing arm* oferece boa absorção de impactos e previsibilidade no movimento vertical da roda, ao passo que a adição dos braços laterais amplia o controle sobre os parâmetros de cambagem, convergência e centro de rolagem, aproximando-se das capacidades de ajuste encontradas no sistema multilink.

A combinação das características bases de um sistema *three-link*, segundo Jayakumar *et al.* (2005), melhora a distribuição de forças ao longo da suspensão, garantindo maior controle da tração e melhor dissipação de cargas durante

acelerações e frenagens. Esse modelo também permite um ajuste eficiente da cambagem e convergência das rodas, contribuindo para um comportamento dinâmico mais previsível e reduzindo o desgaste dos componentes.

Com isso, pode-se considerar que a união das características dos sistemas multilink e *trailing arm* resulta em uma configuração de suspensão eficiente, com elevada capacidade de controle geométrico, robustez estrutural e excelente desempenho dinâmico. A representação esquemática do sistema *three-link trailing arm* (a partir deste ponto será referido apenas como *three-link*), onde é possível visualizar a disposição dos braços de controle e sua contribuição para a estabilidade do conjunto. Essa combinação torna o modelo especialmente adequado para aplicações *off-road* que demandam resistência, estabilidade e flexibilidade de ajustes, como é o caso dos veículos Baja SAE.

2.4 BARRA PANHARD OU BARRA ESTABILIZADORA

Em veículos *off-road*, o controle da rolagem desempenha papel fundamental na estabilidade, na distribuição de cargas entre as rodas e na capacidade de contornar curvas em segurança, especialmente em terrenos irregulares e condições de alta severidade. A dinâmica de rolagem está diretamente relacionada ao comportamento lateral do veículo, influenciando tanto a aderência quanto a previsibilidade das manobras. Estudos recentes sobre sistemas de controle ativo de rolagem em veículos de arquitetura não convencional, como os *wheel-legged vehicles* (WLVs), demonstram que a aplicação de momentos adicionais de rolagem contribui significativamente para ampliar a região de estabilidade, reduzir o risco de capotamento e melhorar a resposta direcional em situações de alta velocidade ou mudanças bruscas de trajetória (Liu *et al.*, 2023).

O sistema ilustrado na Figura 12 exemplifica esse princípio, mostrando como soluções de controle ativo utilizam sensores, atuadores e estratégias avançadas de controle para variar a rigidez à rolagem de forma contínua e adaptativa. Apesar de sua complexidade, o conceito fundamental permanece o mesmo: gerenciar o movimento de rolagem do chassi para melhorar segurança, dirigibilidade e tração.

Assim, mesmo quando simplificado para versões puramente mecânicas, como no caso proposto neste trabalho, o objetivo central é o controle eficiente da rolagem, garantindo um comportamento mais estável em curvas e preservando a capacidade de articulação do veículo em obstáculos e terrenos irregulares.

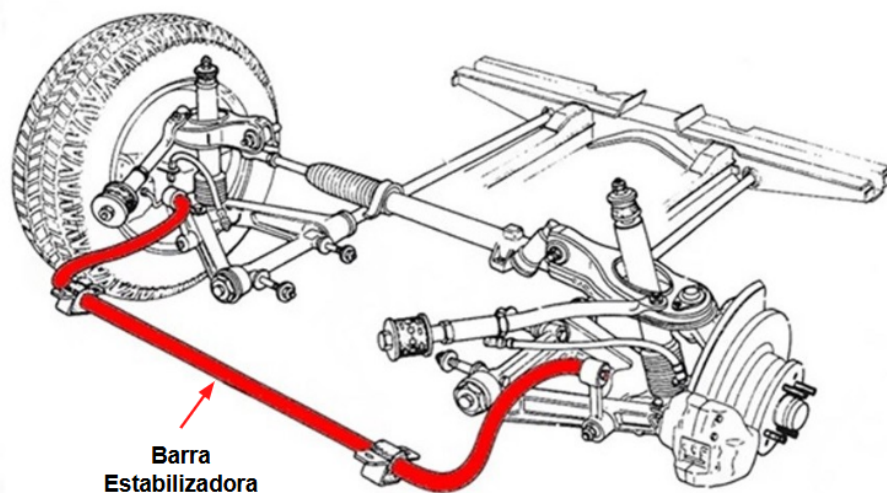
Figura 12: Barra Estabilizadora Ativa desenvolvida pela Schaeffler



Fonte: Schaeffler (2022)

No contexto do Baja SAE, onde simplicidade, robustez e baixo custo são critérios determinantes, optou-se por aplicar esse conceito de maneira mecânica por meio de uma barra estabilizadora liga-desliga, inspirada na lógica dos sistemas de controle de rolagem, porém executada sem eletrônica ou atuadores. A barra estabilizadora, também chamada de barra Panhard ou barra anti-rolagem visível na Figura 13, conecta as rodas de um mesmo eixo, resistindo à diferença de curso entre elas e reduzindo a inclinação lateral do veículo, o que favorece o comportamento sobreesterçante e melhora a dirigibilidade em curvas (Souza *et al.*, 2019).

Figura 13: Barra Estabilizadora



Fonte: Adaptado de Jimenez (2022)

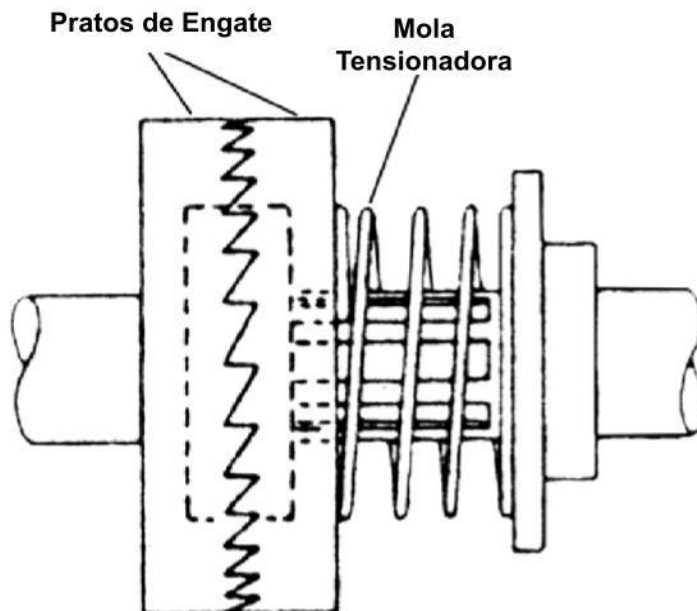
Para possibilitar o controle seletivo da rigidez de rolagem, desenvolveu-se um mecanismo de acoplamento baseado em um *dog clutch*, permitindo alternar entre dois modos de funcionamento:

- a. Modo acoplado, em que o torque é transferido integralmente entre os lados da barra, aumentando a estabilidade lateral;
- b. Modo desacoplado, no qual cada lado se move de forma independente, ampliando a articulação em obstáculos e terrenos irregulares.

O mecanismo visualizado na Figura 14 consiste em duas partes dentadas que se encaixam axialmente, transmitindo torque sem escorregamento, como destacado por Duan (2014), característica desejável em ambientes *off-road* devido à eficiência mecânica e à baixa perda por atrito. O engate é mantido por uma mola helicoidal, garantindo contato seguro durante o funcionamento.

O desacoplamento pode ocorrer por meios mecânicos, ou acionamentos elétricos, que deslocam o conjunto axialmente, separando os dentes e liberando o movimento relativo das metades da barra. Essa solução permite ao piloto adaptar a suspensão conforme o tipo de pista, ativando o modo estabilizado para curvas e o modo articulado para terrenos acidentados.

Figura 14: Diagrama do Sistema *Dog Clutch*



Fonte: Adaptado de Yakimovich (2009)

Ao invés de recorrer a sistemas complexos de controle ativo, como os analisados por Liu et al. (2023), que utilizam modelos de múltiplos graus de

liberdade e algoritmos de controle de guinada, este trabalho adota uma abordagem mais simples, leve e perfeitamente compatível com as limitações do Baja SAE. A solução mecânica proposta mantém o princípio de gerenciamento da rigidez à rolagem discutido na literatura, mas utilizando um sistema direto, de fácil manutenção e alta confiabilidade, adequado para protótipos acadêmicos em ambientes severos.

Assim, a barra estabilizadora liga-desliga com *dog clutch* representa uma alternativa eficiente e simplificada de controle de rolagem, proporcionando ao veículo melhor estabilidade em curvas sem comprometer sua capacidade de articulação em terrenos irregulares, equilibrando desempenho dinâmico, robustez e viabilidade de implementação.

2.5 DINÂMICA VEICULAR

A dinâmica veicular é o estudo do comportamento de um veículo em movimento, considerando os fatores que influenciam sua estabilidade, dirigibilidade, tração e conforto. De acordo com Gillespie (2021), a análise da dinâmica veicular é essencial para o desenvolvimento de sistemas que otimizem a interação entre os pneus e o solo, garantindo maior segurança e desempenho. Esse estudo abrange diversos aspectos, como aceleração, frenagem, resposta em curvas e controle de vibrações, sendo fundamental para o aprimoramento de veículos de competição e *off-road*.

Além disso, Newey (2017) destaca que a configuração da suspensão tem impacto direto no comportamento dinâmico do veículo, afetando a distribuição de forças e a resposta do chassi a diferentes condições de terreno. Ajustes em parâmetros como cambagem, caster e convergência influenciam a estabilidade e a aderência dos pneus, permitindo um melhor controle da trajetória e reduzindo oscilações indesejadas.

Dessa forma, um sistema de suspensão bem projetado não apenas melhora a dirigibilidade, mas também contribui para a eficiência geral do veículo, otimizando seu desempenho em diferentes superfícies e condições operacionais.

2.5.1 Forças Atuantes no Veículo

Durante a movimentação de um veículo, diversas forças atuam sobre sua estrutura. Segundo Milliken e Milliken (1995), as principais forças envolvidas na dinâmica veicular são:

- a. Força longitudinal: relacionada à aceleração e frenagem, influenciada pela aderência dos pneus ao solo.
- b. Força lateral: gerada durante curvas, responsável pelo equilíbrio entre subviragem e sobreviragem.
- c. Força vertical: resultante do peso do veículo e da distribuição de carga dinâmica, afetando a estabilidade e o desempenho da suspensão.

A forma como essas forças são distribuídas e controladas influencia diretamente a dirigibilidade e o comportamento do veículo em diferentes condições de terreno.

2.5.2 Suspensão e Estabilidade Dinâmica

O sistema de suspensão desempenha um papel crucial na estabilidade do veículo, pois atua na absorção de impactos e na manutenção da aderência dos pneus. Uma suspensão bem projetada deve equilibrar conforto e desempenho, reduzindo a transmissão de vibrações e maximizando o contato dos pneus com o solo (Jazar, 2017). Modelos como multilink, *trailing arm* e *three-link* apresentam características distintas que afetam a estabilidade e a resposta dinâmica do veículo em terrenos irregulares.

2.5.3 Influência do Centro de Rolagem e Distribuição de Peso

O comportamento dinâmico do veículo também é influenciado pela altura do centro de gravidade e do centro de rolagem. Segundo Gillespie (2021), quanto maior a altura do centro de gravidade em relação ao centro de rolagem, maior será a tendência de inclinação lateral do veículo em curvas, o que pode comprometer sua estabilidade. Por isso, projetos de suspensão devem considerar esses fatores para minimizar oscilações excessivas e garantir um desempenho otimizado.

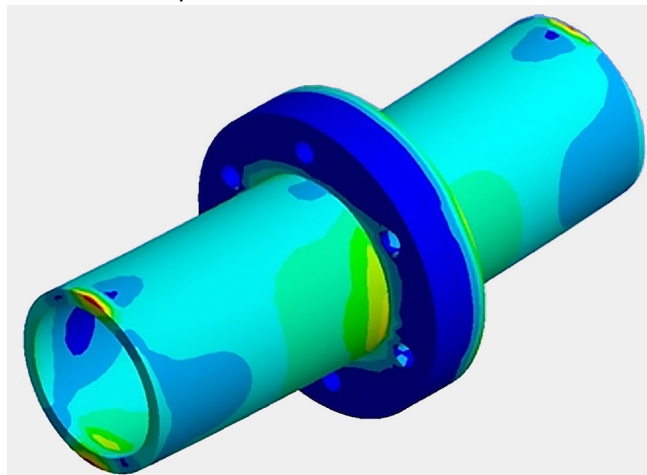
2.5.4 Importância do Estudo da Dinâmica Veicular

O estudo da dinâmica veicular é essencial para o desenvolvimento de veículos eficientes e seguros, especialmente em aplicações *off-road* e de competição. A interação entre forças atuantes, suspensão e distribuição de peso define o comportamento do veículo e sua capacidade de resposta a diferentes condições de pista. A aplicação desses conceitos permite aprimorar o desempenho e a estabilidade dos protótipos Baja SAE, garantindo maior confiabilidade e segurança para os pilotos.

2.6 ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS

O FEA (*Finite Element Analysis*, ou Análise de Elementos Finitos), demonstrado na Figura 15, é um método computacional amplamente utilizado para avaliar o comportamento estrutural de componentes mecânicos. Esse método consiste na subdivisão de uma estrutura em pequenos elementos finitos interconectados, permitindo a análise detalhada das tensões, deformações e deslocamentos sob diferentes condições de carregamento.

Figura 15: Análise de FEA de um componente



Fonte: ESSS (2025)

De acordo com Richmond (2005), essa abordagem é essencial para prever falhas e otimizar o projeto, garantindo maior confiabilidade e eficiência estrutural. No contexto deste trabalho, o FEA foi empregado para avaliar a resistência e o desempenho do sistema de suspensão *three-link trailing arm*, assegurando que os

componentes atendam aos requisitos de segurança e durabilidade exigidos para competição.

2.6.1 Malha no Método de Elementos Finitos (MEF)

A qualidade da análise por elementos finitos está diretamente relacionada à definição da malha, que consiste na discretização do modelo geométrico em pequenos elementos conectados por nós. Essa malha determina como o software representará matematicamente o comportamento estrutural do componente.

No Método dos Elementos Finitos (MEF), a malha corresponde à discretização do modelo contínuo em pequenos elementos, usualmente tetraédricos ou hexaédricos, permitindo a solução numérica das equações diferenciais que descrevem o comportamento mecânico do sistema. Segundo Teza (2022), a escolha adequada da malha é fundamental para garantir a precisão da simulação, sendo comum a utilização de elementos tetraédricos parabólicos em componentes de geometria complexa, como observado em seu estudo de bandeja de suspensão. Teza (2022) ainda ilustra como a discretização influencia na resolução dos gradientes de tensão em regiões críticas, reforçando que malhas refinadas são necessárias próximo a furos, transições geométricas e interfaces estruturais.

Richmond (2005), ao discutir a aplicação do MEF em análises biomecânicas, também reforça que a criação de uma malha adequada é essencial para capturar corretamente zonas de concentração de tensão e deformação, demonstrando que o refinamento local aumenta a precisão sem prejudicar o custo computacional global.

2.6.2 Tensões Admissíveis

A tensão admissível é definida como o valor máximo de tensão que um material pode suportar sem risco de falha, considerando fatores de segurança apropriados. Em estudos envolvendo componentes estruturais de competição Baja SAE, Teza (2022) destaca que os resultados numéricos de tensão equivalente (von Mises) são comparados diretamente ao limite de escoamento do material, a fim de verificar se o componente opera dentro de condições seguras. Esse procedimento é essencial na avaliação de bandejas, suportes e ligações, que geralmente estão sujeitos a altos carregamentos dinâmicos resultantes de saltos, impactos e irregularidades do terreno.

O conceito de tensão equivalente, utilizado amplamente no MEF, segue o critério de von Mises para materiais dúcteis, como aço 4130 e 1045. Richmond (2005) explica que esse critério permite condensar o estado tridimensional de tensões em um único valor escalar, facilitando a comparação direta com propriedades mecânicas do material.

2.6.3 Condições de Contorno

As condições de contorno definem como o modelo está apoiado e como os carregamentos são aplicados, sendo uma etapa fundamental para representar realisticamente o comportamento do componente. Teza (2022) enfatiza que restrições como *Fixed Support*, *Cylindrical Support* e carregamentos oriundos do *drop test* são essenciais para reproduzir fielmente as condições de operação do veículo. Ao aplicar forças verticais decorrentes do impacto de 1 metro, por exemplo, o autor demonstra como a escolha dos apoios influencia diretamente a distribuição de tensões e deformações na estrutura.

Para Richmond (2005), também é reforçado que a definição correta das condições de contorno é um dos fatores que mais influenciam a precisão da análise, uma vez que representam fisicamente as restrições reais impostas ao componente no mundo físico.

2.7 FUNDAMENTAÇÃO E DIRECIONAMENTO DO PROJETO

A revisão da literatura apresentada permitiu consolidar o embasamento técnico e teórico necessário para o desenvolvimento de um sistema de suspensão *three-link trailing arm* em um veículo Baja SAE. Os conceitos fundamentais de dinâmica veicular, sistemas de suspensão e seus componentes foram explorados para compreender os fatores que influenciam o comportamento dinâmico do veículo em diferentes condições de operação.

A análise dos diversos tipos de suspensão e suas respectivas características demonstrou a importância da escolha adequada de um sistema que equilibre desempenho, resistência estrutural e estabilidade, atendendo aos desafios impostos pelo ambiente *off-road* característico das competições Baja SAE. Além disso, a comparação com estudos e projetos já realizados por outras equipes e pesquisas

acadêmicas possibilitou uma visão abrangente sobre as soluções adotadas e suas implicações na performance do veículo.

Dessa forma, os conceitos discutidos neste referencial teórico fornecem suporte para as decisões de projeto que serão detalhadas nas próximas seções, permitindo que a metodologia adotada seja fundamentada em conhecimentos previamente estabelecidos na engenharia automotiva. Além disso, as informações levantadas contribuem para a identificação de lacunas e oportunidades de melhoria que poderão ser exploradas ao longo do desenvolvimento do sistema de suspensão proposto.

3 METODOLOGIA

3.1 TIPOS DE PESQUISA

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa quantitativa, aplicada, exploratória e de natureza experimental, conforme as classificações propostas por Lakatos (2021). A abordagem quantitativa é empregada por meio da obtenção de dados numéricos oriundos de simulações computacionais por Análise de Elementos Finitos (FEA), possibilitando a avaliação objetiva do comportamento estrutural dos componentes da suspensão sob diferentes condições de carregamento.

A pesquisa aplicada tem como finalidade a solução de um problema prático, voltado à melhoria do desempenho dinâmico e estrutural de um sistema de suspensão traseira para veículos Baja SAE. Já o caráter exploratório se justifica pela investigação de uma configuração de suspensão ajustável integrada a uma barra estabilizadora liga-desliga, ainda pouco difundida em projetos acadêmicos da competição. A abordagem experimental é representada pelas simulações numéricas que reproduzem condições críticas de operação, permitindo validar o comportamento do sistema mesmo sem a fabricação física dos componentes.

3.2 PESQUISA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A etapa inicial do desenvolvimento consistiu na realização de uma pesquisa bibliográfica aprofundada sobre sistemas de suspensão veicular, dinâmica veicular aplicada ao off-road, métodos de modelagem computacional e análises estruturais por Elementos Finitos.

Foram consultados livros técnicos, artigos científicos, normas e publicações da SAE, além dos regulamentos oficiais da competição Baja SAE. Essa etapa permitiu compreender as limitações impostas pela competição, identificar soluções já consolidadas e definir diretrizes para o desenvolvimento de um sistema compatível com o chassi atualmente utilizado pela equipe Sinuelo FAHOR.

3.2.1 Levantamento de Requisitos e Definições do Projeto

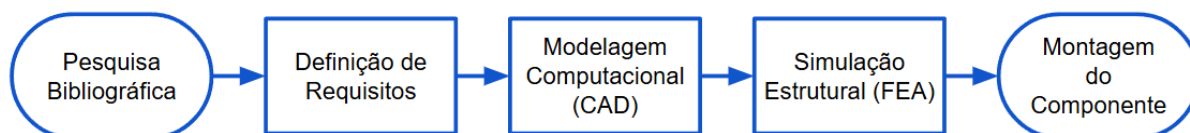
Com base na revisão bibliográfica e nos regulamentos da competição, realizou-se o levantamento dos requisitos funcionais, geométricos e estruturais do sistema de suspensão traseira. Nessa fase, foram analisadas as limitações do

chassi existente, o envelope de movimento das rodas, a compatibilidade com os amortecedores já utilizados pela equipe e a integração com o conjunto de transmissão.

A definição do projeto considerou a adoção de um sistema *three-link trailing arm* integrado a uma barra estabilizadora liga–desliga, buscando oferecer maior controle geométrico, robustez estrutural e versatilidade operacional. Os requisitos definidos nesta etapa serviram de base para todas as fases subsequentes do desenvolvimento.

O fluxo metodológico adotado para o projeto pode ser visualizado de forma simplificada na Figura 16, que apresenta as principais etapas do processo, desde a pesquisa bibliográfica até a validação estrutural e a montagem conceitual dos componentes.

Figura 16: Fluxograma Simplificado dos Passos Adotados



Fonte: O autor (2025)

3.2.2 Modelagem Tridimensional no *SolidWorks*

Com os requisitos estabelecidos, iniciou-se a modelagem tridimensional dos componentes no *software SolidWorks*, adotando uma abordagem paramétrica. Todos os elementos do sistema foram projetados pelo autor, incluindo braço principal (*trailing arm*), *camber link*, manga de eixo, orelhas de fixação, terminais, buchas, barra estabilizadora e o mecanismo de acoplamento do tipo *dog clutch*.

Durante o processo de modelagem, foram realizadas verificações constantes de interferências, alinhamento geométrico, compatibilidade dimensional e comportamento cinemático do conjunto ao longo de todo o curso da suspensão. Essa etapa foi essencial para garantir que o sistema pudesse ser montado corretamente, operasse sem contatos indesejados e mantivesse a geometria adequada em diferentes condições de trabalho.

3.2.3 Análises Estruturais por Elementos Finitos (FEA)

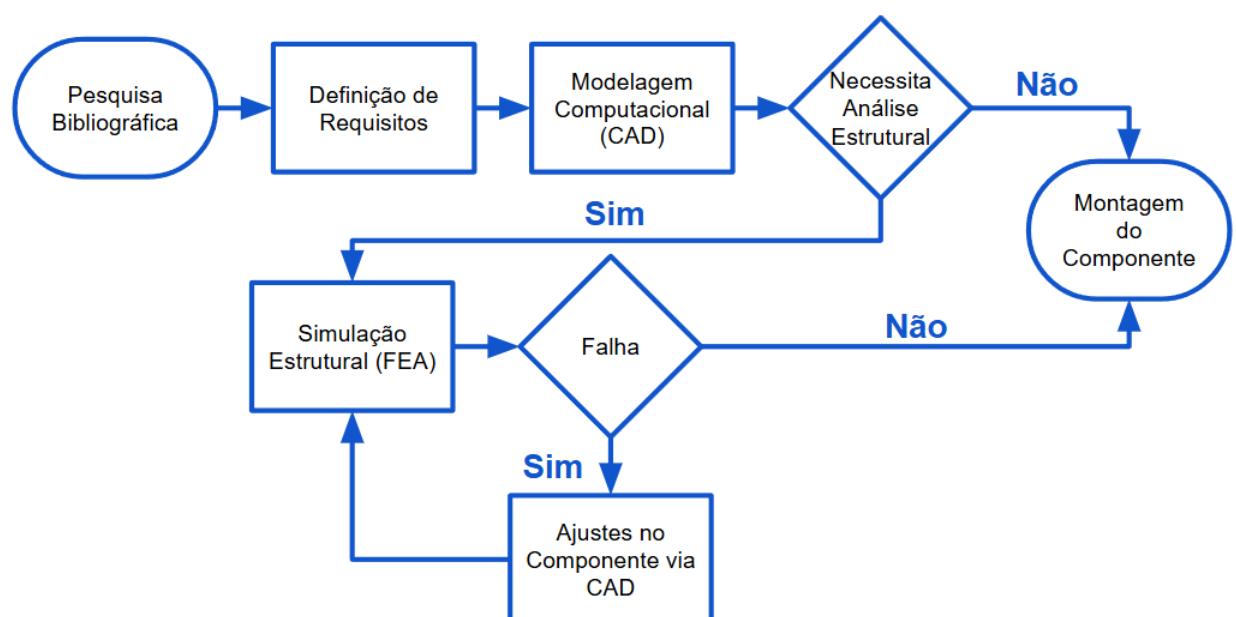
Após a conclusão da modelagem CAD, procedeu-se às análises estruturais por Elementos Finitos utilizando o *software* ANSYS *Structural*. As condições de contorno e carregamento foram definidas com base em cenários críticos de operação, considerando situações severas típicas das provas do Baja SAE, como impactos após saltos e cargas concentradas em apenas uma das rodas traseiras.

As simulações tiveram como objetivo verificar se as tensões desenvolvidas nos componentes permaneceriam abaixo dos limites admissíveis dos materiais selecionados, como aço SAE 1020, SAE 1045 trefilado e AISI 4130. As malhas foram refinadas especialmente nas regiões de maior complexidade geométrica, como bordas de furos, transições de espessura, áreas de solda e interfaces de acoplamento.

A análise concentrou-se na avaliação das tensões equivalentes de von Mises, permitindo identificar zonas críticas, avaliar o risco de escoamento e fundamentar decisões de reforço estrutural quando necessário.

O processo iterativo entre modelagem e simulação estrutural é apresentado de forma detalhada na Figura 17, que ilustra o fluxograma completo da metodologia adotada, evidenciando as etapas de simulação, verificação de falha, ajustes geométricos e nova validação.

Figura 17: Fluxograma Completo dos Passos Adotados



Fonte: O autor (2025)

3.2.4 Aprimoramento e Validação do Modelo Final

A partir da interpretação dos resultados das simulações, foram realizados ajustes pontuais nas geometrias dos componentes que apresentaram concentrações elevadas de tensão. As principais melhorias envolveram o aumento de espessura de paredes de orelhas específicas, bem como a suavização de transições geométricas por meio de filetes, visando reduzir concentrações de tensão e aumentar a segurança estrutural do conjunto.

Após as modificações, novas simulações foram conduzidas para confirmar a efetividade das alterações implementadas. Esse processo iterativo foi repetido até que os componentes apresentassem comportamento estrutural satisfatório, operando dentro dos limites admissíveis dos materiais.

O modelo final resultante representa uma solução estruturalmente validada, geometricamente ajustável e compatível com o chassi atual da equipe Sinuelo FAHOR, estando apto para futuras etapas de fabricação e testes experimentais em pista.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados apresentados nesta seção correspondem às etapas de modelagem tridimensional e de análise estrutural do sistema de suspensão traseira *three-link trailing arm*, desenvolvido para aplicação no chassi atualmente utilizado pela equipe Sinuelo FAHOR e adotado como padrão nos veículos Baja SAE. Como o trabalho não contempla a fabricação física do protótipo, as validações foram conduzidas exclusivamente por meio de modelagem CAD e simulações computacionais, com o objetivo de verificar a viabilidade estrutural e funcional da solução proposta.

4.1 MODELO TRIDIMENSIONAL DO SISTEMA DE SUSPENSÃO

O modelo tridimensional do sistema de suspensão traseira *three-link trailing arm* foi desenvolvido utilizando *software* de modelagem assistida por computador (CAD), tomando como referência as geometrias comumente adotadas em chassis empregados nas competições Baja SAE. Esse cuidado garantiu que o projeto permanecesse compatível com o chassi atual da equipe Sinuelo FAHOR, preservando a padronização dimensional utilizada pela equipe e facilitando a futura implementação do conjunto.

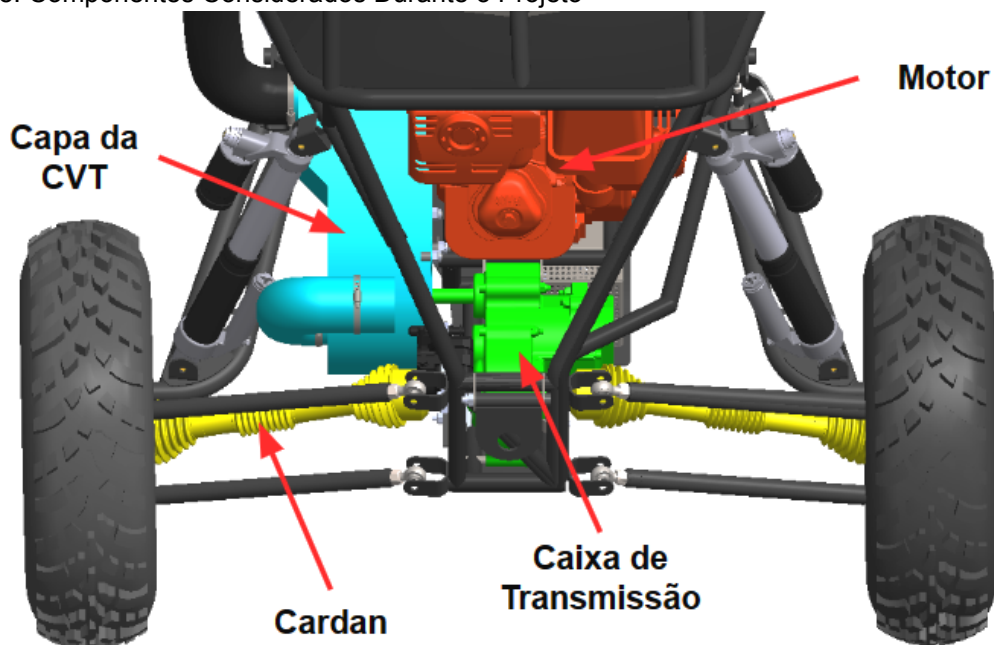
O sistema projetado é composto por um braço longitudinal principal, responsável por resistir aos esforços de tração, frenagem e impactos verticais, além de sustentar a maior parte das cargas transmitidas pela roda. Complementando essa estrutura, dois braços laterais (*links*) controlam o deslocamento lateral do conjunto e proporcionam ajustes geométricos fundamentais, como cambagem, convergência e a posição do centro de rolagem. A combinação desses elementos permite integrar a robustez típica do *trailing arm* com a flexibilidade ajustável de um sistema *multilink*, resultando em um conjunto mais versátil, capaz de se adaptar a diferentes condições de uso e características de pista.

Durante o processo de modelagem tridimensional, buscou-se não apenas definir a geometria funcional da suspensão, mas também otimizar sua integração ao veículo como um todo. Foram avaliadas interferências com o chassi, transmissão, cardan e demais subsistemas, garantindo que a disposição espacial dos componentes permanecesse adequada para montagem, manutenção e operação. A Figura 18 apresenta essa organização espacial, destacando as regiões ocupadas

pela suspensão, especialmente próximas ao conjunto motriz, onde o espaço é limitado e requer atenção especial para evitar colisões e permitir amplo curso de trabalho da suspensão.

Além disso, a modelagem considerou aspectos como acessibilidade para ajustes, facilidade de desmontagem, posicionamento estratégico dos pontos de fixação e o comportamento cinemático do sistema ao longo do curso total da suspensão. Esses cuidados asseguram que o projeto não apenas atenda aos requisitos geométricos e estruturais, mas também seja funcional no uso real, contribuindo para o desempenho e a durabilidade do protótipo.

Figura 18: Componentes Considerados Durante o Projeto



Fonte: O autor (2025)

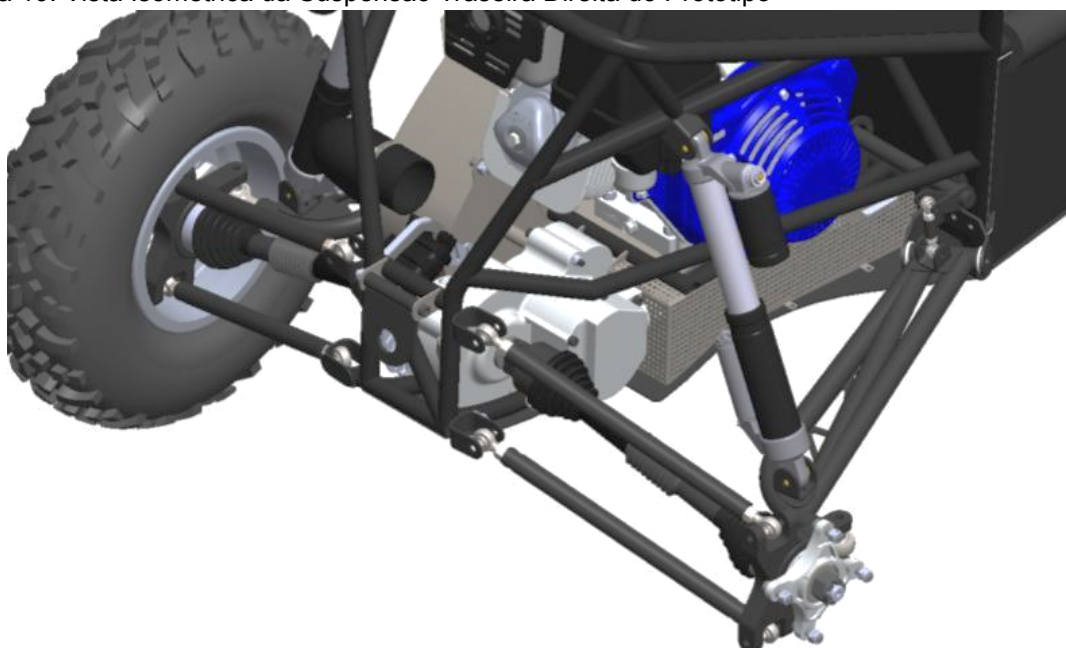
Foram definidos pontos de fixação no chassi que favorecem a distribuição equilibrada dos esforços e reduzem concentrações excessivas de tensão, contribuindo para a durabilidade do conjunto.

A combinação das características estruturais do *trailing arm* com as capacidades de ajuste do multilink representa um avanço significativo no desempenho e na adaptabilidade da suspensão. Enquanto o *trailing arm* garante simplicidade construtiva, resistência mecânica e boa absorção de impactos, o multilink oferece ajustes precisos que otimizam a estabilidade, a tração e o comportamento dinâmico do veículo. Essa união permite um controle mais eficiente da geometria das rodas ao longo do curso da suspensão, assegurando maior

previsibilidade em manobras e melhor aproveitamento da aderência dos pneus em diferentes tipos de terreno.

A vista isométrica do modelo, apresentada na Figura 19, ilustra a disposição dos componentes e os principais elementos estruturais que compõem o sistema. Essa representação permite compreender a integração do conjunto ao chassi e a lógica de funcionamento da suspensão proposta.

Figura 19: Vista Isométrica da Suspensão Traseira Direita do Protótipo



Fonte: O autor (2025)

As peças utilizadas no sistema de suspensão traseira, tais como o *trailing arm*, a barra estabilizadora, os braços *camber links*, o *dog clutch*, as orelhas de fixação e a manga de eixo, foram integralmente modeladas e adaptadas pelo autor ao longo do desenvolvimento do projeto, a disposição dos itens pode ser visualizada na Figura 20. Cada componente passou por um processo criterioso de concepção, dimensionamento e validação geométrica, assegurando compatibilidade com o chassi, com os demais elementos mecânicos e com os requisitos de desempenho estabelecidos para o veículo Baja SAE. A modelagem paramétrica permitiu ajustes iterativos de espessuras, ângulos, folgas e interfaces de montagem, resultando em um conjunto estrutural coerente, funcional e tecnicamente fundamentado. Dessa forma, o projeto consolida não apenas a integração dos componentes, mas também o domínio técnico adquirido pelo autor na concepção de sistemas mecânicos complexos.

Figura 20: Componentes Projetados Pelo Autor



Fonte: O autor (2025)

4.2 CONCEITOS BÁSICOS DA SUSPENSÃO APLICADOS AO PROJETO

O desempenho e a eficiência do sistema de suspensão projetado dependem diretamente da compreensão e correta aplicação dos principais parâmetros geométricos que governam o comportamento dinâmico de um veículo *off-road*. Por isso, antes da apresentação dos resultados, faz-se necessária a retomada dos conceitos fundamentais que influenciam a estabilidade, a dirigibilidade e a transferência de cargas no conjunto traseiro.

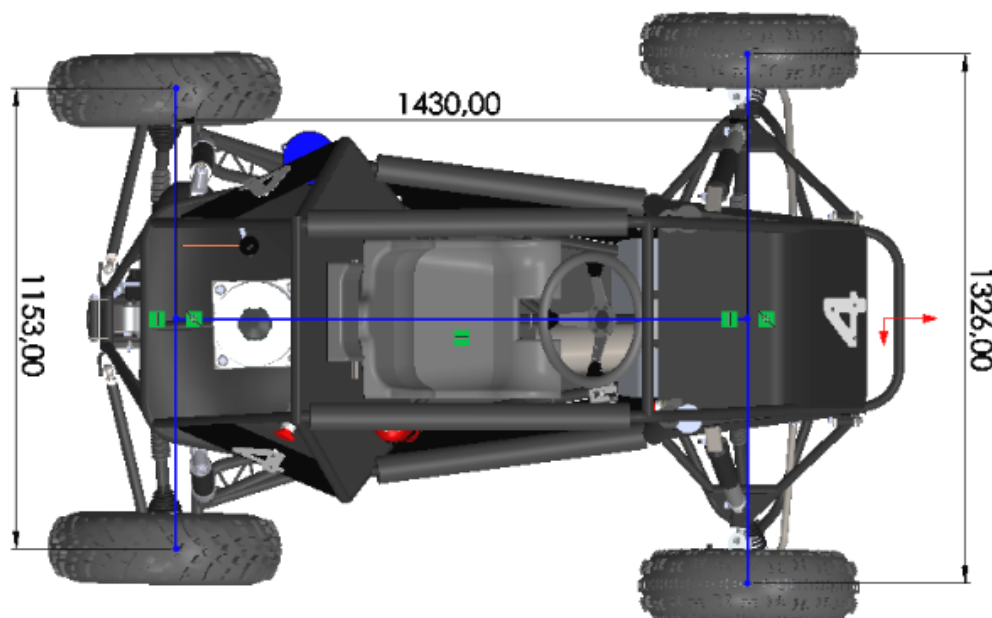
Elementos como entre-eixos, bitola, cambagem, convergência, centro de rolagem e ângulos de trabalho definem a forma como o veículo reage às irregularidades do terreno, às acelerações e às manobras em curvas, sendo determinantes para o equilíbrio entre robustez estrutural e desempenho dinâmico. Assim, este tópico reúne e contextualiza esses conceitos aplicados especificamente à geometria do sistema *three-link trailing arm* desenvolvido, permitindo compreender de forma clara como cada parâmetro foi considerado e otimizado dentro do projeto.

4.2.1 Entre-eixos e Bitola do Projeto

As reduções discretas no entre-eixos e na bitola traseira não geram alterações significativas no comportamento dinâmico do veículo, uma vez que permanecem dentro da margem habitual utilizada nos projetos da equipe, as

dimensões adotadas podem ser visualizadas na Figura 21. Ajustes dessa ordem mantêm praticamente inalterados aspectos como estabilidade lateral, distribuição de cargas e resposta em manobras de baixa e alta velocidade.

Figura 21: Entre-eixos e Bitolas do Protótipo



Fonte: O autor (2025)

A decisão de preservar dimensões próximas ao padrão já consolidado pela equipe Sinuelo justifica-se pela necessidade de garantir compatibilidade com o chassi atual, facilitar a integração do novo sistema de suspensão e manter referências geométricas que já demonstraram bom desempenho em competições anteriores.

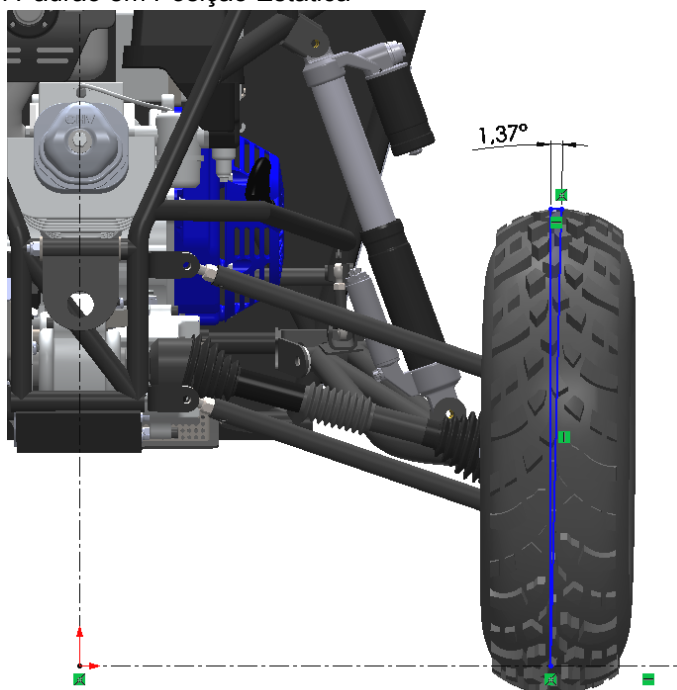
Essa uniformidade dimensional também contribui para reduzir o número de adaptações estruturais necessárias, preservando interfaces críticas, como pontos de fixação, alinhamento do trem de força e espaçamento para componentes da transmissão. Além disso, manter proporções semelhantes minimiza riscos de comportamento inesperado do veículo, especialmente em parâmetros sensíveis como centro de rolagem, distribuição de cargas e cinemática das rodas.

Assim, a adoção dessa abordagem assegura uma evolução do projeto de forma segura e progressiva, fortalecendo a confiabilidade do sistema e mantendo a continuidade do conhecimento técnico acumulado pela equipe ao longo das temporadas de Baja SAE.

4.2.2 Cambagem do Projeto

A análise da geometria da suspensão traseira indica que o veículo apresenta uma cambagem padrão levemente positiva com aproximadamente 1° , condição observada na Figura 22. Esse valor reduzido de cambagem positiva não compromete a estabilidade lateral e favorece a distribuição de cargas em terrenos irregulares, característica típica de aplicações *off-road*.

Figura 22: Cambagem Padrão em Posição Estática



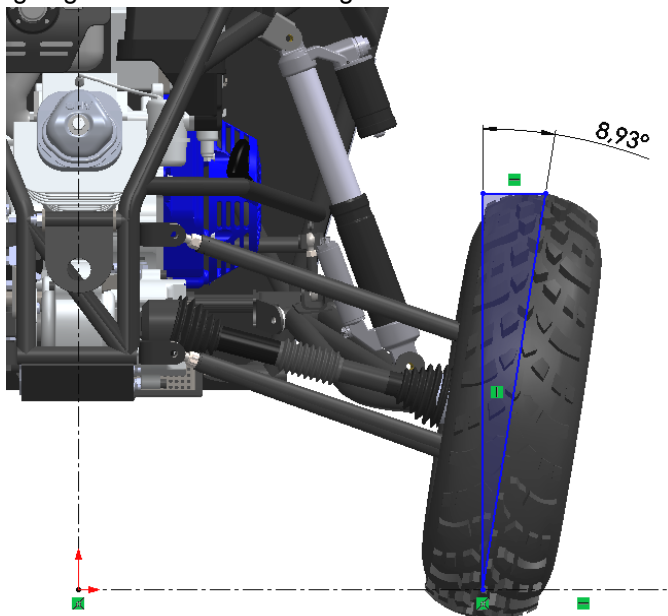
Fonte: O autor (2025)

Embora o projeto tenha sido configurado com esse ajuste inicial, o sistema permite a regulação dos ângulos de cambagem por meio dos pontos de fixação dos *links* de cambagem, possibilitando a adequação do alinhamento conforme a necessidade da equipe ou de diferentes condições de prova. Dessa forma, a suspensão oferece flexibilidade para ajustes finos sem alterar a estrutura principal do conjunto.

A possibilidade de ajuste da cambagem no sistema de suspensão traseira permite alterar o ângulo da roda em relação ao solo conforme a necessidade do veículo. A Figura 23 apresenta uma condição de cambagem positiva, obtida a partir da regulação dos pontos de fixação dos *links* responsáveis pelo controle desse ângulo no sistema *three-link*. Essa configuração exemplifica o limite máximo de ajuste disponível, utilizado apenas para demonstrar a amplitude de variação que o

sistema permite. A capacidade de alcançar valores significativamente positivos sem alterar a estrutura principal da suspensão evidencia a flexibilidade do conjunto, possibilitando que a equipe selecione a cambagem estática mais adequada às condições de prova ou aos objetivos de desempenho.

Figura 23: Limite de Regulagem do *Link* de Cambagem



Fonte: O autor (2025)

Essa variação é alcançada sem modificar a estrutura principal da suspensão, demonstrando que o projeto oferece ampla margem para ajustes geométricos. A adoção de cambagem positiva pode ser necessária em situações em que se deseja compensar efeitos de deformação dos componentes ou acomodar variações do curso da suspensão em terrenos acidentados, garantindo alinhamento adequado durante a operação. Dessa forma, o sistema permite configurar diferentes valores de cambagem estática de acordo com a estratégia de uso e as características da prova, mantendo a versatilidade sem comprometer a integridade estrutural do conjunto.

A adoção exclusiva de cambagem positiva na suspensão traseira justifica-se pelas características operacionais do veículo Baja SAE e pela geometria do sistema *three-link trailing arm*. Em aplicações *off-road*, a roda traseira está sujeita a ciclos intensos de tração e compressão, além de deformações laterais do pneu ao transpor obstáculos irregulares.

Nessas condições, a cambagem positiva estática compensa a tendência natural da roda inclinar-se negativamente durante o curso da suspensão e sob cargas laterais, preservando uma área de contato mais adequada com o solo. Além

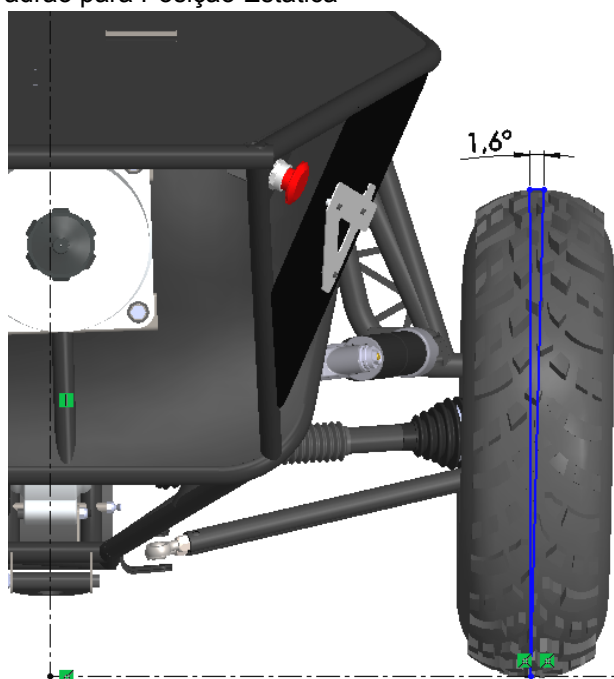
disso, a orientação positiva reduz o risco de interferência entre o pneu e os componentes estruturais, como braços, cubos e discos, garantindo maior confiabilidade operacional.

O uso de cambagem exclusiva nesse sentido também simplifica o processo de alinhamento e evita configurações negativas que, em veículos de tração traseira com elevado curso de suspensão, podem resultar em perda de tração, desgaste irregular dos pneus e comportamento imprevisível da traseira. Dessa forma, a opção por trabalhar apenas com cambagem positiva harmoniza o desempenho, a durabilidade dos componentes e a estabilidade do veículo, alinhando-se às necessidades específicas do contexto off-road.

4.2.3 Convergência do Projeto

A geometria da suspensão traseira permite ajustar o ângulo de convergência das rodas, possibilitando configurar tanto a condição estática quanto o limite superior de regulagem. A Figura 24 apresenta uma condição próxima ao neutro, que corresponde ao ajuste adotado como posição padrão do sistema em repouso. Esse valor reduzido de convergência garante boa estabilidade direcional e minimiza esforços laterais desnecessários sobre os componentes, favorecendo o comportamento do veículo em terrenos irregulares.

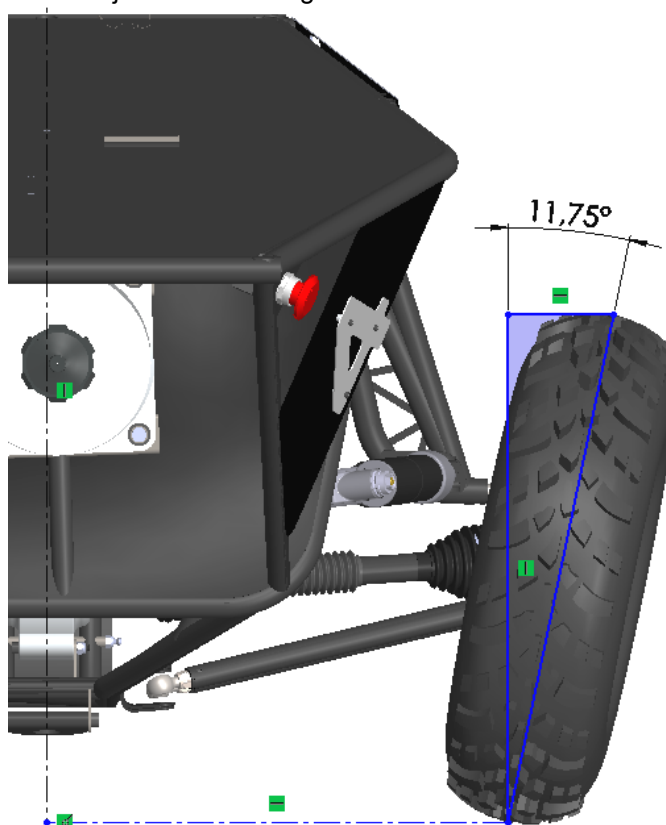
Figura 24: Divergência Padrão para Posição Estática



Fonte: O autor (2025)

Já a condição ilustrada na Figura 25 representa o limite máximo de ajuste, com aproximadamente 11 graus de convergência, utilizada apenas para demonstrar a amplitude de regulagem disponível no sistema. Essa capacidade de variação, obtida sem alterações na estrutura principal da suspensão, permite que o alinhamento traseiro seja adaptado conforme a necessidade da equipe, mantendo flexibilidade operacional sem comprometer a robustez do conjunto.

Figura 25: Ângulo Máximo de Ajuste da Convergência

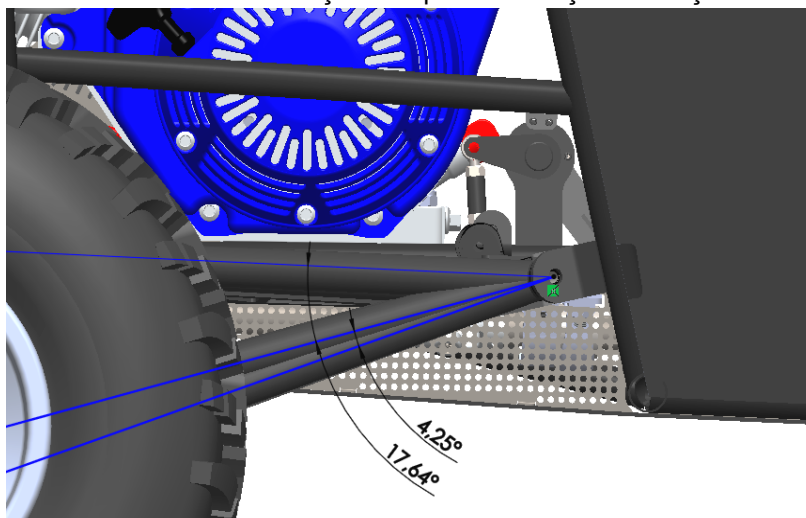


Fonte: O autor (2025)

4.2.4 Ângulo de Trabalho do Projeto

da suspensão ao longo de todo o seu curso. Conforme apresentado na Figura 26, o sistema opera entre 4° e 17°, correspondentes, respectivamente, aos pontos máximos de compressão (bump) e de expansão (rebound). Essa faixa angular indica um funcionamento progressivo e controlado da suspensão, sem variações abruptas que possam comprometer a estabilidade geométrica ou a integridade dos componentes ao longo do curso.

Figura 26: Ângulo Máximo e Mínimo do Braço Principal em Relação à Posição Estática



Fonte: O autor (2025)

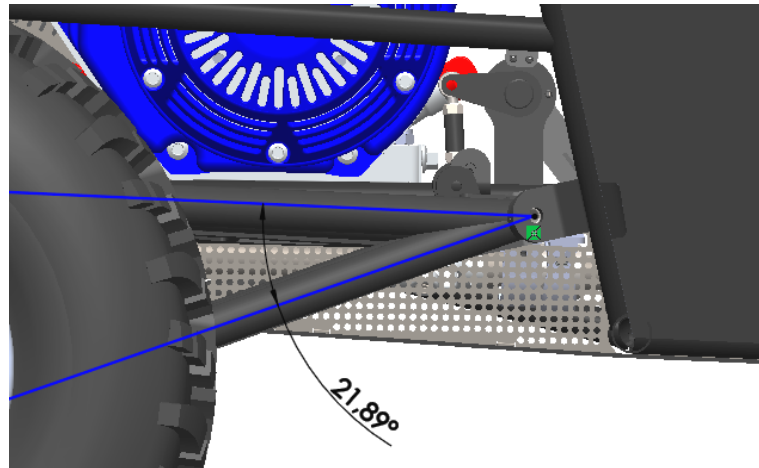
No ponto de máxima expansão, em torno de 4° , o braço arrastado opera em uma condição de maior eficiência cinemática, com menor resistência ao movimento e maior sensibilidade a irregularidades de pequena amplitude. Já em máxima compressão, próximo de 17° , o sistema passa a trabalhar com um ângulo mais acentuado, resultando em maior componente longitudinal das forças transmitidas ao chassi. Esse aumento de ângulo contribui para limitar o deslocamento em situações de *rebound* intenso, proporcionando maior controle do movimento e evitando extensão excessiva da suspensão. A diferença angular entre *bump* e *rebound* caracteriza um curso amplo e adequado à absorção de impactos recorrentes em terrenos *off-road*.

A amplitude angular registrada está alinhada às exigências de veículos Baja SAE, que demandam grande curso de suspensão para manter tração e estabilidade em terrenos irregulares. O comportamento observado demonstra que o sistema opera dentro de uma faixa angular segura, sem exceder limites que comprometam a integridade estrutural do braço ou causem interferências com outros componentes. A variação entre compressão e expansão garante que a roda se mantenha em contato com o solo em determinadas situações, favorecendo desempenho, controle e absorção de impactos, sem comprometer a durabilidade do conjunto.

O valor de $21,89^\circ$ visível na Figura 27, representa a soma dos dois ângulos citados, resultando apenas o total de variação angular entre as duas extremidades do curso, servindo como referência para caracterizar a amplitude de movimento do conjunto. Esses valores descrevem de forma clara o envelope de operação da

suspensão traseira, evidenciando sua capacidade de acomodar grandes deslocamentos verticais, característicos das condições enfrentadas por veículos Baja SAE.

Figura 27: Ângulo Total de Trabalho

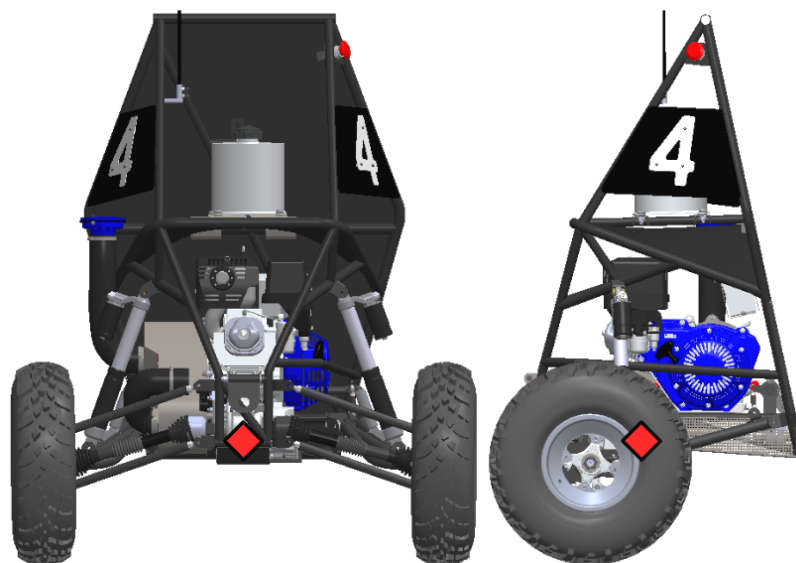


Fonte: O autor (2025)

4.2.5 Centro de Rolagem do Projeto

O *roll center* traseiro do veículo foi identificado a partir da geometria formada pelos dois *links* de cambagem e pelo braço arrastado do sistema *three-link trailing arm*. Conforme ilustrado na Figura 28, o ponto correspondente ao *roll center* situa-se próximo ao plano central do veículo, ligeiramente acima da linha que une as articulações inferiores da suspensão e à frente do conjunto de transmissão.

Figura 28: Posição Estática do *Roll Center* Traseiro



Fonte: O autor (2025)

Essa posição resulta da interseção projetada dos eixos dos *links* superiores quando estendidos no plano lateral, característica típica desse tipo de suspensão. A localização relativamente elevada do *roll center* traseiro contribui para reduzir o momento de rolagem no eixo posterior e aumentar a transferência lateral de carga por componentes elásticos, favorecendo uma resposta mais rápida do veículo em curvas e reforçando a tendência *oversteer* desejada em aplicações *off-road*. A altura do *roll center* traseiro, portanto, desempenha papel relevante no comportamento dinâmico do protótipo e está diretamente associada à configuração geométrica apresentada na imagem.

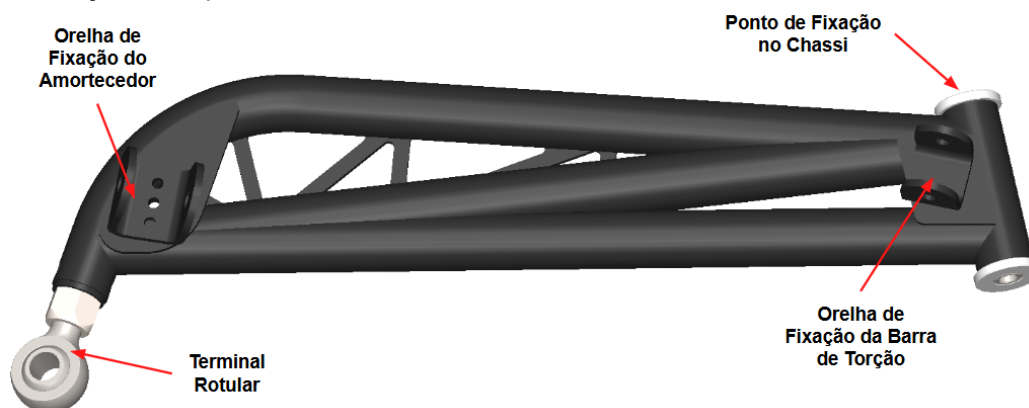
4.3 SISTEMA DE SUSPENSÃO

Esta seção apresenta o sistema de suspensão traseira desenvolvido, descrevendo seus principais componentes e as funções que desempenham no conjunto. O modelo tridimensional foi elaborado visando a integração direta ao chassi atualmente utilizado pela equipe, seguindo a geometria padrão adotada nos projetos de Baja SAE. Essa abordagem garante compatibilidade estrutural, robustez do conjunto e preservação dos ajustes geométricos essenciais ao desempenho do veículo. Além disso, o sistema foi concebido de forma a permitir futuras modificações e ajustes finos sem a necessidade de alterações significativas no chassi, favorecendo a adaptabilidade do projeto a diferentes condições de pista. A organização dos componentes também buscou facilitar a montagem, manutenção e replicação do sistema em futuros protótipos da equipe.

4.3.1 Braço de Suspensão Estilo *Trailing* (*Trailing Arm*)

O braço de suspensão do tipo *trailing arm* constitui o principal elemento estrutural do sistema projetado, sendo responsável por absorver e transmitir ao chassi os esforços verticais, longitudinais e parte das cargas laterais provenientes do contato das rodas com o solo. Na solução desenvolvida, o componente foi concebido com geometria tubular tridimensional, buscando equilibrar rigidez mecânica, baixo peso e facilidade de fabricação, ao mesmo tempo em que garante espaço adequado para os demais subsistemas do veículo. A Figura 29 apresenta a configuração geral do braço, destacando seus principais pontos de fixação e interfaces de funcionamento.

Figura 29: Braço de Suspensão Estilo Arrastado



Fonte: O autor (2025)

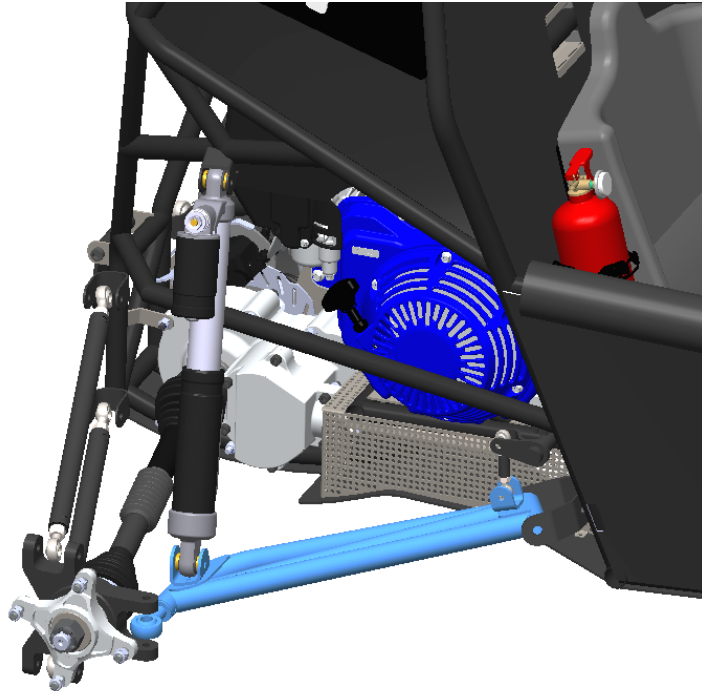
O terminal rotular posicionado na extremidade frontal do braço permite o movimento angular necessário ao deslocamento vertical da suspensão, além de contribuir para a absorção de pequenas variações laterais inerentes ao sistema, juntamente com a possibilidade de ajuste devido à bucha roscada, presente no braço de suspensão. Na região superior do braço encontra-se a orelha destinada à fixação do amortecedor, projetada para posicionar o amortecedor em um ângulo que favorece o curso útil e a eficiência na absorção de impactos. A resistência local dessa orelha é essencial, uma vez que ela concentra parte significativa dos esforços verticais transmitidos pela roda em condições de impacto ou irregularidades do terreno.

Na extremidade traseira, o braço incorpora duas interfaces adicionais: o ponto de fixação ao chassi, responsável pela ancoragem principal do conjunto, e a orelha de acoplamento da barra de torção, utilizada no sistema de barra estabilizadora liga-desliga. Essa integração direta do braço com o mecanismo anti-rolagem permite que a barra de torção atue de forma eficiente quando acoplada, contribuindo para o controle da rolagem do veículo em manobras laterais. Ao mesmo tempo, o uso de orelhas reforçadas e bem posicionadas garante que o braço mantenha rigidez adequada sem comprometer o peso final da suspensão.

A Figura 30 ilustra a aplicação do braço no conjunto da suspensão, evidenciando sua interação com o amortecedor, cubo de roda e semi-eixo. A geometria proposta assegura que o braço opere com liberdade de movimento ao longo de todo o curso da suspensão, evitando interferências e preservando a integridade estrutural mesmo em condições severas de operação. A combinação entre o desenho tubular, as triangulações internas e as posições otimizadas de

fixação resulta em um componente capaz de suportar os esforços característicos de competições *off-road*, mantendo confiabilidade, robustez e bom desempenho dinâmico.

Figura 30: Aplicação do Braço de Suspensão no Projeto



Fonte: O autor (2025)

4.3.2 *Link de Suspensão Regulável (Camber Link)*

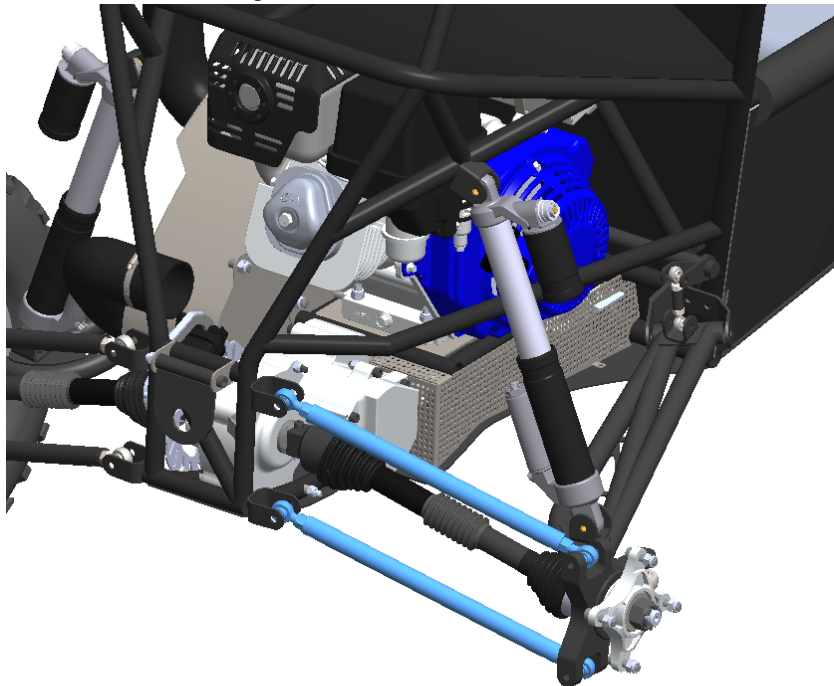
O *camber link* regulável integra o conjunto traseiro do sistema *three-link* e desempenha a função de controlar diretamente o ângulo de cambagem da roda durante a operação do veículo. Sua construção é baseada em um tubo metálico central, unido a terminais rotulares instalados em suas extremidades, os quais garantem liberdade angular e acomodam os deslocamentos induzidos pelo movimento da suspensão. Uma bucha roscada é soldada nas duas extremidades do tubo, permitindo o ajuste de comprimento do componente através da rotação longitudinal do conjunto, mecanismo que viabiliza ajustes finos da geometria sem a necessidade de desmontagem completa do sistema. Elementos como porcas de travamento asseguram a estabilidade da regulagem após definida. A Figura 31 ilustra o *camber link* de forma isolada, destacando seus componentes principais e o mecanismo de regulagem.

Figura 31: *Camber Link* Regulável

Fonte: O autor (2025)

Quando instalado no veículo, como mostrado na Figura 32, o *camber link* se conecta entre a manga de eixo e o chassi, constituindo o braço responsável pela definição da cambagem estática e pela resposta geométrica da roda ao longo do curso da suspensão. Essa solução proporciona ao sistema a capacidade de ajustar o alinhamento de acordo com as necessidades de operação, seja priorizando estabilidade em linha reta, seja aumentando a capacidade de aderência lateral em curvas ou terrenos irregulares.

Além disso, sua configuração articulada permite que a roda mantenha uma orientação mais favorável durante movimentos de compressão e retorno, reduzindo variações indesejadas de ângulo. Dessa forma, o conjunto contribui para maior previsibilidade dinâmica e melhor distribuição de esforços na suspensão.

Figura 32: Aplicação do *Camber Link* Regulável

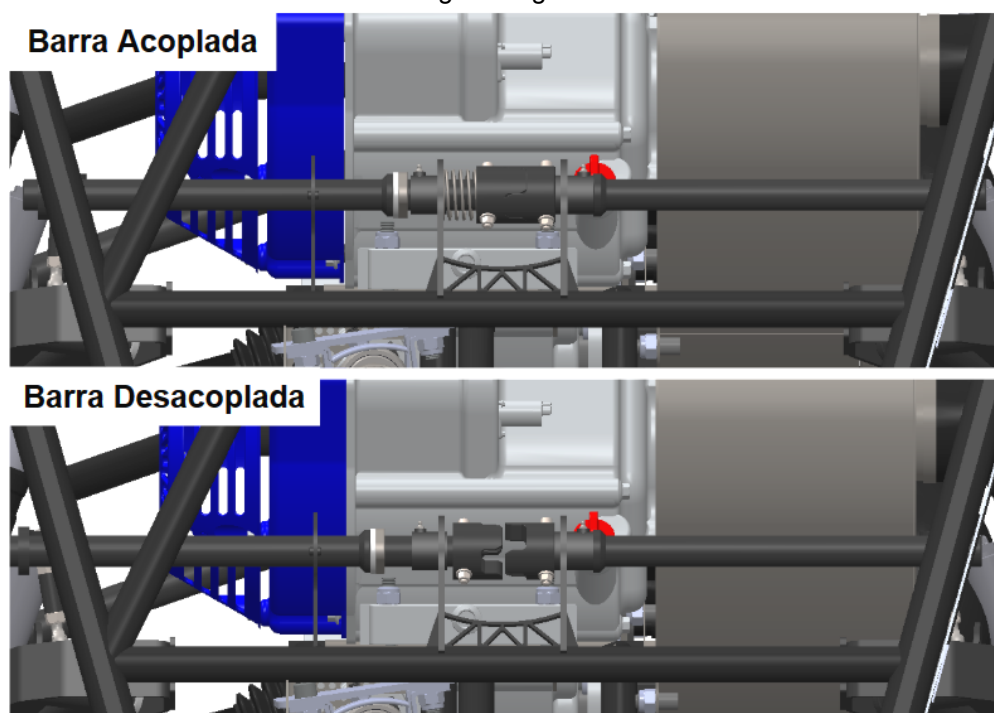
Fonte: O autor (2025)

A variação no comprimento do *camber link* permite compensar diferenças construtivas, corrigir desalinhamentos e explorar estratégias de ajuste específicas para provas *off-road*. Além disso, sua montagem externa e acessível facilita a manutenção e reduz o tempo de *setup* em ambiente de competição, aspecto essencial para equipes como a Sinuelo FAHOR, que operam sob restrições de tempo durante eventos. A combinação de simplicidade mecânica, robustez estrutural e precisão de ajuste torna o *camber link* regulável um elemento fundamental para garantir que a geometria proposta se mantenha estável e eficaz nas diversas condições enfrentadas por um veículo Baja SAE.

4.3.3 Barra Estabilizadora Liga-desliga

A barra estabilizadora traseira desenvolvida para este projeto foi concebida com o objetivo de oferecer ao veículo Baja SAE maior controle sobre o rolamento da carroceria, mantendo a flexibilidade necessária para ajustar o comportamento dinâmico conforme o tipo de obstáculo ou prova, a barra pode ser visualizada na Figura 33. Para isso, adotou-se um sistema do tipo liga–desliga, permitindo ao piloto acoplar ou desacoplar o efeito estabilizador diretamente durante a operação, por meio de um mecanismo simples e de rápida atuação.

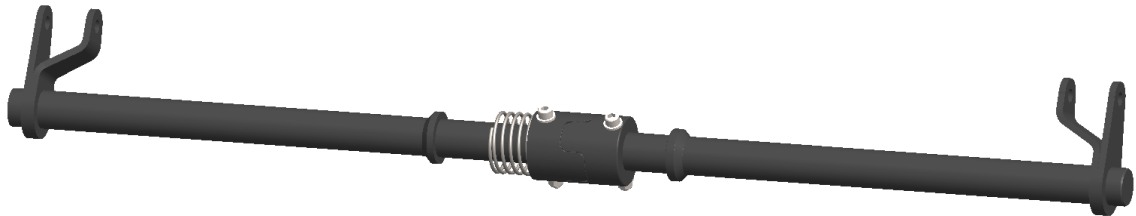
Figura 33: Sistema da Barra Estabilizadora Liga-desliga



Fonte: O autor (2025)

A barra é dividida em duas partes, correspondentes aos lados esquerdo e direito da suspensão, isto é exemplificado na Figura 34. Cada segmento é conectado ao respectivo braço de suspensão por meio de deslocadores com a mesma lógica construtiva dos *camber links* reguláveis, garantindo que o componente possa compensar desalinhamentos, absorver pequenas variações de movimento e facilitar o posicionamento preciso durante a montagem. No centro da barra localiza-se o conjunto de acoplamento baseado em um mecanismo *dog clutch*, responsável por transmitir ou interromper a transferência de torque entre as duas metades da barra estabilizadora.

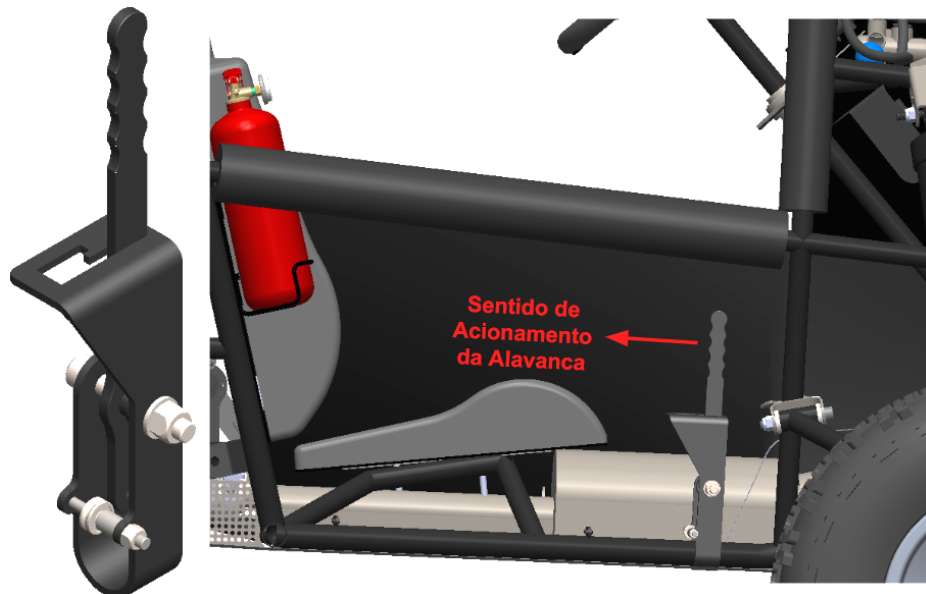
Figura 34: Barra Estabilizadora Utilizada no Projeto



Fonte: O autor (2025)

O acionamento do sistema ocorre por meio de duas espigas ligadas a uma alavanca posicionada próximo ao piloto. Ao puxar a alavanca que pode ser visualizada na Figura 35, o piloto desloca axialmente a metade móvel da barra,

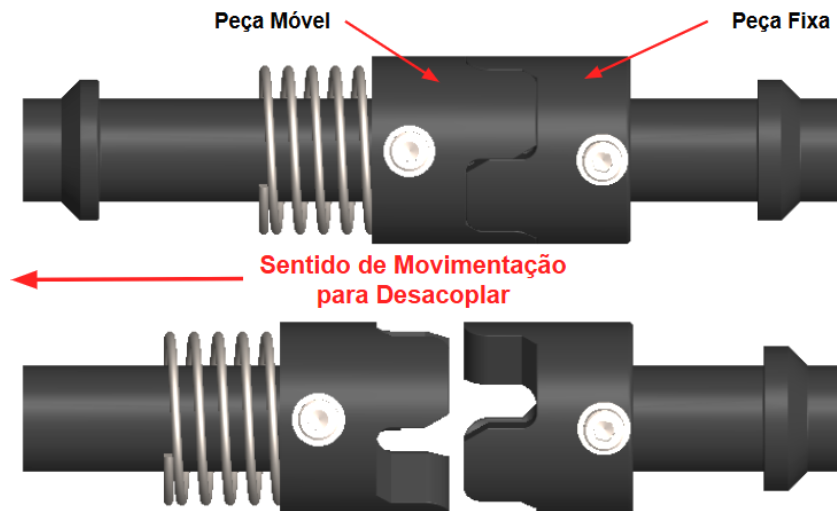
Figura 35: Sentido de Acionamento da Alavanca



Fonte: O autor (2025)

O movimento demonstrado na imagem acima, resulta em uma movimentação axial da parte esquerda da barra, movimento este demonstrado na Figura 36, fazendo com que o *dog clutch* se desacople.

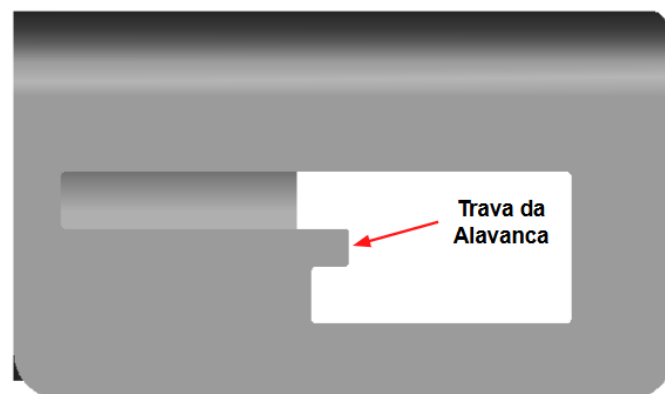
Figura 36: Demonstração do Desacoplamento da Barra



Fonte: O autor (2025)

Uma trava mecânica na alavanca impede o retorno indesejado do conjunto, assegurando que o sistema permaneça na condição selecionada, é possível visualizar a trava na Figura 37. Para acoplar novamente a barra, basta destravar e permitir que a força da mola empurre o mecanismo de acoplamento, encaixando os dentes do *dog clutch* com o auxílio do guia central projetado para orientar o alinhamento das peças. Esse guia é essencial, pois garante que o acoplamento ocorra de forma suave e precisa, mesmo com pequenas diferenças de posição provenientes das irregularidades do terreno.

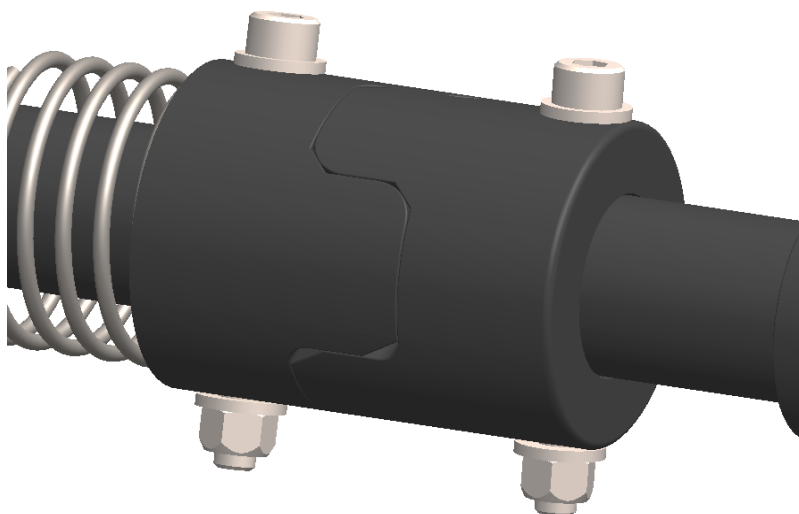
Figura 37: Sistema de Trava da Alavanca



Fonte: O autor (2025)

A presença de parafusos nas placas da barra, visíveis na Figura 38 tem a função de facilitar a manutenção e permitir a desmontagem rápida do conjunto, reduzindo o tempo necessário para intervenções durante a preparação do veículo ou em situações de emergência. Esse enfoque na servicibilidade é particularmente importante em competições Baja SAE, reparos rápidos podem influenciar diretamente o desempenho da equipe.

Figura 38: Demonstração da Barra Estabilizadora Acoplada



Fonte: O autor (2025)

O conjunto final combina robustez estrutural, simplicidade mecânica e alta funcionalidade. O uso do *dog clutch* possibilita um engate firme e confiável, sem escorregamento, assegurando que o efeito da barra estabilizadora seja integral quando acionado. Ao mesmo tempo, o sistema oferece a opção de desacoplamento total, permitindo que o veículo opere como um protótipo de suspensão totalmente independente em situações de obstáculos severos, aumentando a capacidade de articulação e o conforto do piloto. Essa versatilidade confere ao veículo um comportamento dinâmico adaptável, ampliando o desempenho tanto em trechos rápidos quanto em terrenos altamente acidentados.

4.4 DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO

As condições de contorno aplicadas às simulações foram definidas de modo a representar fielmente o comportamento estrutural dos componentes da suspensão em operação real. Para isso, cada peça foi analisada individualmente no ANSYS

Structural, considerando os caminhos de carga característicos do sistema e as restrições físicas impostas pelo chassi, articulações e interfaces mecânicas.

As condições de carregamento adotadas neste estudo foram definidas a partir de uma análise experimental realizada previamente na pista de testes da equipe, utilizando *strain gauges* instalados no modelo atual de suspensão. Esses ensaios permitiram estimar, com boa aproximação, os picos de força efetivamente transmitidos aos componentes durante situações de uso severo. A partir desses valores experimentais, estabeleceu-se o cenário de pior caso para aplicação nas simulações, considerando a condição em que o veículo, após um salto, aterrissa com a carga concentrada sobre apenas uma das rodas traseiras. Esse evento gera um pico elevado de força, que foi utilizado como base para definir os carregamentos aplicados nos modelos do novo sistema de suspensão, garantindo que as análises representassem adequadamente às solicitações reais de operação.

Com base nas forças obtidas nos ensaios com *strain gauges* e no cenário de pior caso definido, estabeleceram-se as condições de contorno necessárias para representar adequadamente o comportamento estrutural de cada componente da suspensão durante as simulações. Dessa forma, foram configurados os seguintes casos de análise, cada um refletindo as particularidades geométricas e funcionais dos elementos que compõem o sistema.

4.4.1 Pontos de Fixação no Chassis

Nas orelhas de fixação do *camber link*, modeladas em aço SAE 1045, aplicou-se uma força concentrada de 5300 N sobre o furo frontal, correspondente aos esforços transmitidos pelos tirantes sob condições críticas de carregamento. A região oposta do componente foi completamente restringida por meio de um *fixed support*, representando o engaste proporcionado pela solda ao chassi do veículo.

Esse cenário, ilustrado na Figura 39, reproduz a condição em que a orelha atua como elemento estrutural responsável por absorver diretamente esforços de tração e compressão provenientes da suspensão. A definição dessas condições de contorno buscou representar de forma realista o comportamento do componente em operação, permitindo avaliar sua integridade estrutural e a distribuição das tensões nas regiões de maior solicitação.

Figura 39: Condição de Contorno da Orelha do *Camber Link*

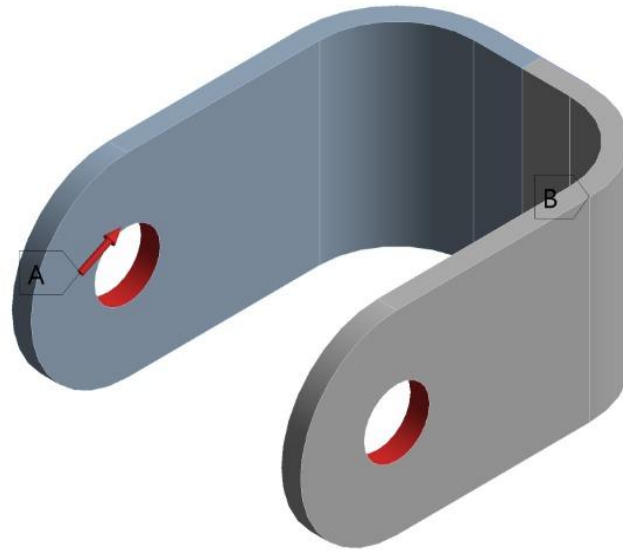
E: Static Structural

Static Structural

Time: 1, s

19/11/2025 20:43

- A** Force: 5300, N
- B** Fixed Support



Fonte: O autor (2025)

Para a orelha de fixação do *trailing arm*, também desenvolvida em aço SAE 1045, aplicou-se uma carga aproximada de 1800 N diretamente no furo destinado ao acoplamento do braço. A extremidade oposta foi totalmente restringida por meio de um *fixed support*, representando a condição de soldagem ao chassi. Esse cenário, ilustrado na Figura 40, reproduz o funcionamento real do componente, no qual a orelha atua como elemento estrutural responsável por transmitir integralmente os esforços provenientes do braço principal da suspensão.

Figura 40: Condição de Contorno na Orelha do Braço Principal

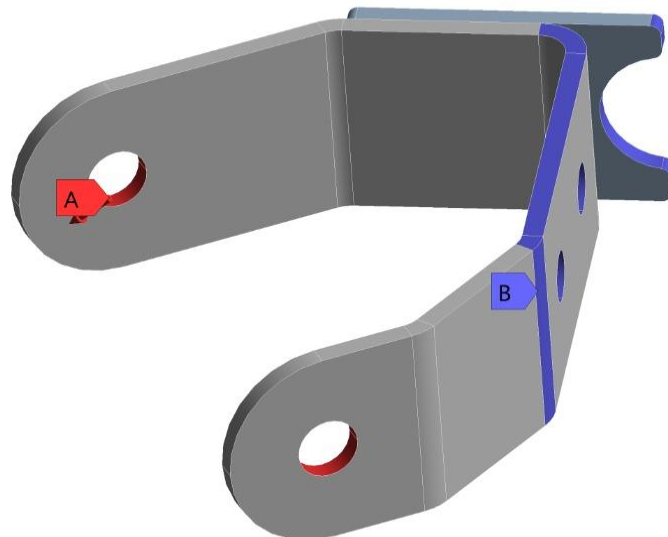
F: Static Structural

Static Structural

Time: 1, s

26/11/2025 20:43

- A** Force: 1802,8 N
- B** Fixed Support



Fonte: O autor (2025)

4.4.2 Condição de Contorno do Braço Principal e do *Camber Link*

No braço principal (*trailing arm*) e no *camber link* (Figura 41 e Figura 42, respectivamente), foram aplicados carregamentos remotos equivalentes aos esforços gerados pela movimentação vertical da roda ao longo do curso da suspensão. Esses carregamentos representam a transferência de forças provenientes do contato pneu–solo, considerando situações críticas de operação, como impactos severos e variações abruptas de carga típicas de uso *off-road*.

A adoção de forças remotas permitiu reproduzir de forma mais realista a atuação dos esforços nos pontos de ligação, distribuindo-os conforme a geometria do conjunto e assegurando que o comportamento estrutural dos componentes fosse avaliado de maneira coerente com as condições reais de funcionamento do sistema.

Figura 41: Condição de Contorno no Braço Principal (*Trailing Arm*)

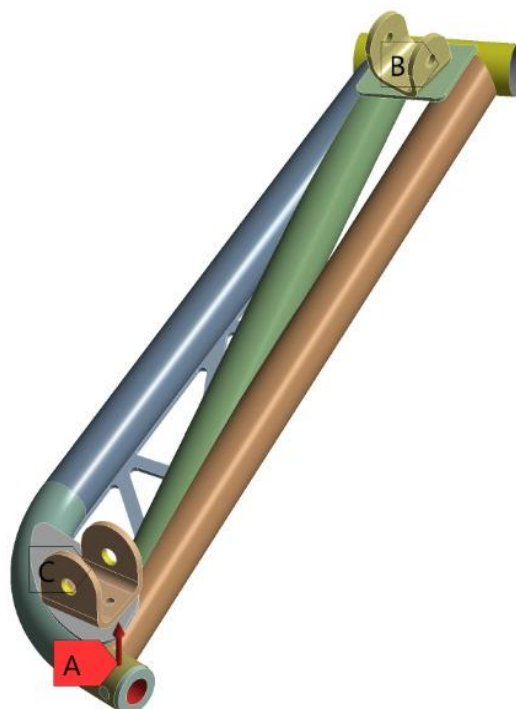
B: Static Structural

Static Structural

Time: 1, s

26/11/2025 19:30

- A** Force: 10251 N
- B** Remote Displacement 2
- C** Remote Displacement



Fonte: O autor (2025)

Para o *camber link*, apenas um dos lados foi submetido à simulação juntamente com o terminal rotular, uma vez que o componente apresenta simetria geométrica e de carregamento. Essa abordagem reduz significativamente o tempo de processamento e o custo computacional das análises, sem comprometer a precisão ou a representatividade física dos resultados.

Dessa forma, os estados de tensão, deformação e concentração de esforços obtidos para o modelo analisado podem ser extrapolados de maneira confiável para o conjunto completo, garantindo a validade da avaliação estrutural do componente.

Figura 42: Condição de Contorno do *Camber Link*

A: Static Structural

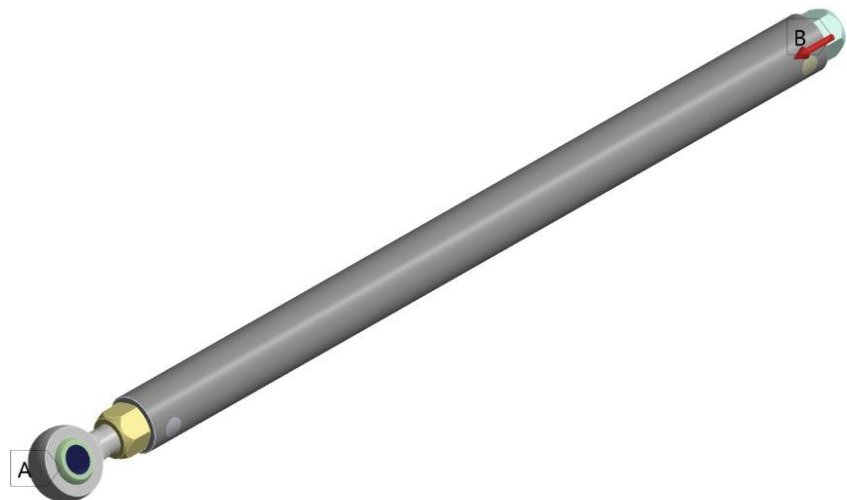
Static Structural

Time: 1, s

26/11/2025 18:56

A Fixed Support

B Force: 5383, N



Fonte: O autor (2025)

4.4.3 Condição de Contorno na Barra de Estabilizadora

Para a barra de torção do sistema estabilizador liga–desliga, o carregamento foi representado pela aplicação de um momento torsor de 1500 Nm na extremidade do *dog clutch*, reproduzindo o torque transmitido durante o funcionamento da barra estabilizadora. A extremidade oposta foi engastada, impedindo qualquer grau de liberdade e simulando o suporte fixo acoplado ao conjunto de suspensão. Esse cenário pode ser visualizado na Figura 43.

Figura 43: Condição de Contorno da Barra de Estabilizadora

D: Static Structural

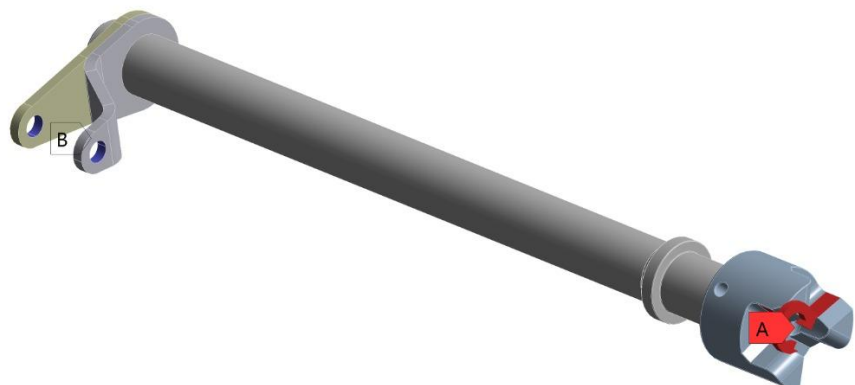
Static Structural

Time: 1, s

19/11/2025 20:14

A Moment: 1,5e+006 N-mm

B Fixed Support

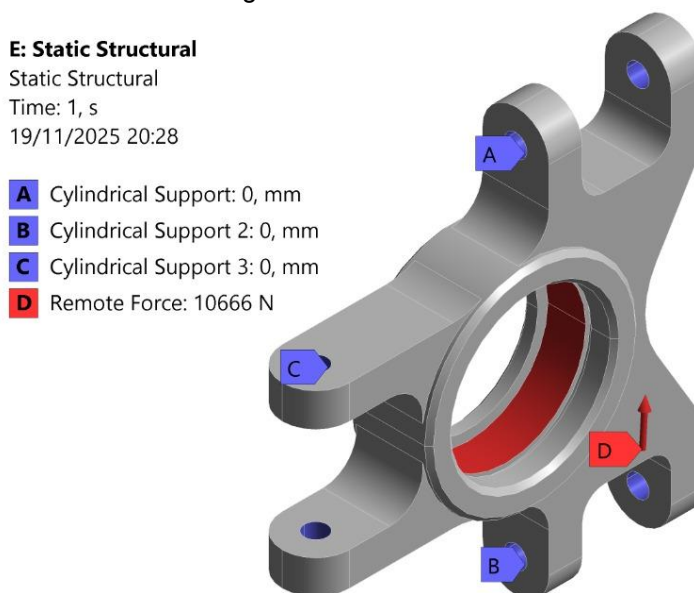


Fonte: O autor (2025)

4.4.4 Condição de Contorno na Manga de Eixo

Para a manga de eixo, empregaram-se três *cylindrical supports* nos alojamentos destinados aos *links* e buchas, restringindo deslocamentos radiais e mantendo apenas o grau de liberdade axial necessário para representar as articulações reais. Sobre o alojamento do rolamento aplicou-se uma força remota de 10.666 N, orientada verticalmente, correspondente à carga transferida pela roda durante impactos, compressões bruscas e irregularidades do terreno. Essa condição pode ser observada na Figura 44.

Figura 44: Condição de Contorno da Manga de Eixo



Fonte: O autor (2025)

Essa definição criteriosa das condições de contorno garantiu que as simulações representassem adequadamente o desempenho real dos componentes, permitindo a análise precisa das tensões, deformações e regiões críticas do sistema de suspensão.

4.5 ANÁLISE DOS COMPONENTES

Para validar a resistência estrutural das peças projetadas, realizou-se uma análise numérica por Elementos Finitos (FEA) com o objetivo exclusivo de verificar se o design desenvolvido suportaria as tensões presentes no veículo Baja SAE. A simulação foi utilizada como ferramenta de apoio para confirmar que as geometrias operam dentro de limites seguros, considerando tanto a forma quanto o

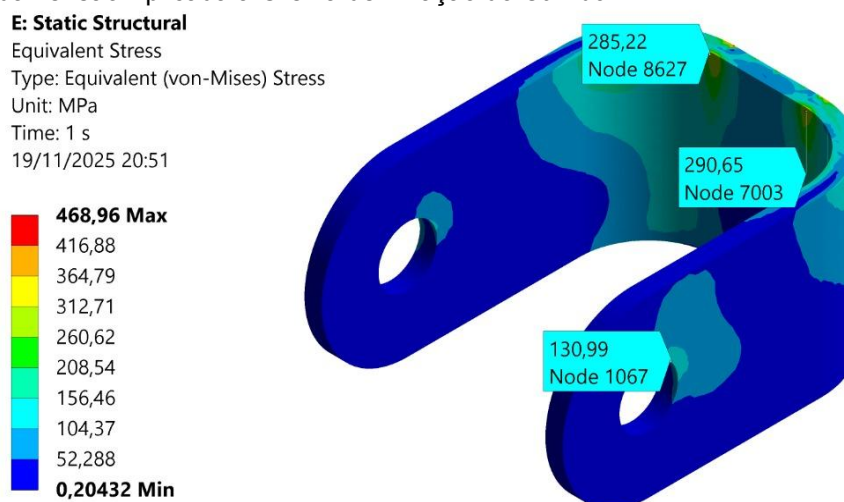
comportamento real das peças em operação. As cargas aplicadas e os pontos de engaste foram definidos de acordo com as condições de tração e compressão às quais os componentes são submetidos na suspensão, garantindo representatividade do cenário real de carregamento.

4.5.1 Pontos de Fixação no Chassis

A análise da orelha de fixação do *camber link*, representada pela distribuição das tensões equivalentes de von Mises, evidenciou um desempenho estrutural adequado para a aplicação proposta. Os resultados indicam que o componente apresenta rigidez compatível com as solicitações do sistema e não exhibe concentrações críticas de tensão que possam representar risco imediato de falha.

O mapa de tensões da figura 45 indica um valor máximo de tensão equivalente de 468,96 MPa, além de tensões auxiliares de aproximadamente 285,22 MPa, 290,65 MPa e 130,99 MPa em regiões de interesse (principalmente nos pontos de fixação e nas superfícies internas de engate). A análise revelou concentração de esforços nas transições geométricas e nos filetes estruturais, motivo pelo qual foi recomendada a ampliação dos raios de concordância e, quando aplicável, o reforço dos filetes de solda. Tais ajustes contribuem diretamente para a redução de picos de tensão e aumento da durabilidade do componente.

Figura 45: Análise da Tensão Aplicada à Orelha de Fixação do *Camber Link*



Fonte: O autor (2025)

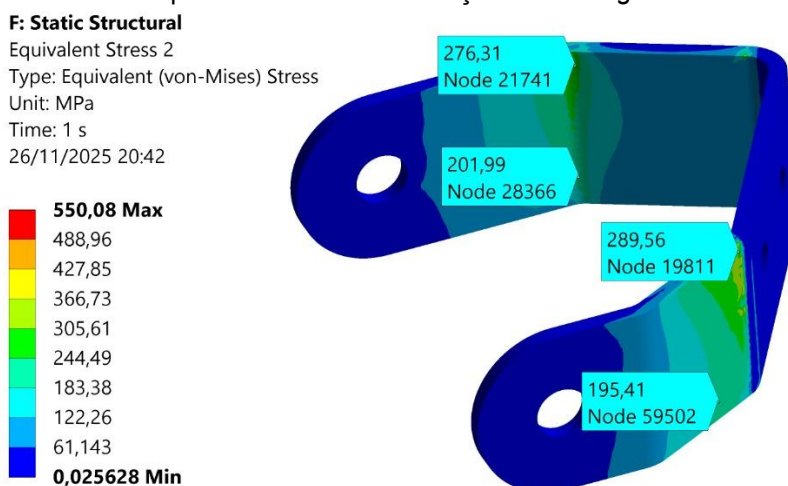
Para complementar a validação estrutural dos pontos de fixação do sistema de suspensão ao chassis, realizou-se também a análise FEA da orelha responsável

pela fixação do *trailing arm*. O objetivo da simulação foi verificar se a geometria projetada é capaz de suportar as tensões impostas durante o funcionamento do veículo, atuando em conjunto com os demais elementos do conjunto *three-link*. Assim como na análise da orelha do *camber link*, as cargas aplicadas e os pontos de engaste foram definidos de acordo com o comportamento real da peça, reproduzindo as solicitações de tração, compressão e momentos resultantes transmitidos pelo braço de suspensão.

A Figura 46 apresenta o componente analisado e a distribuição das tensões equivalentes de von Mises obtidas na simulação. Os resultados demonstram que, mesmo sob condições críticas de carregamento, o comportamento estrutural da peça permanece adequado para sua função no protótipo, preservando a rigidez necessária e garantindo segurança contra falhas prematuras.

Observa-se ainda que as concentrações de tensão se mantêm confinadas às regiões de transição geométrica, sem ultrapassar valores incompatíveis com o aço SAE 1045, indicando boa eficiência no fluxo de esforços. Ademais, a integridade estrutural da orelha confirma que sua espessura e formato são suficientes para suportar esforços repetitivos, contribuindo para a durabilidade do sistema como um todo.

Figura 46: Análise da Tensão Aplicada à Orelha de Fixação do *Trailing Arm*



Fonte: O autor (2025)

O mapa de tensões obtido figura acima indica valores máximos próximos a 290 MPa, com regiões auxiliares apresentando tensões intermediárias, aproximadamente 276 MPa, 201 MPa e 195 MPa, distribuídas principalmente ao redor dos furos de fixação e nas transições entre superfícies curvas e planas. Essas

áreas apresentam tendência natural à concentração de esforços, o que torna fundamental uma geometria bem ajustada. A partir da análise, recomenda-se a suavização das transições e o aumento dos raios de concordância, de modo a reduzir picos localizados de tensão e aumentar a durabilidade do componente.

4.5.2 Braço Principal (*Trailing Arm*)

A avaliação estrutural do *trailing arm* foi realizada por meio de simulação numérica em FEA, com o objetivo de verificar se a geometria proposta suporta as tensões atuantes durante o funcionamento da suspensão. As condições de contorno adotadas, a aplicação de carga na região de montagem com a manga de eixo, engaste no ponto de fixação ao chassi e travamento na orelha do amortecedor, foram definidas para reproduzir de forma fiel o comportamento real do componente em operação, garantindo que o modelo numérico representasse adequadamente o cenário de carregamento do veículo.

A Figura 47 apresenta a distribuição da tensão equivalente de von Mises ao longo do braço, revelando regiões críticas associadas principalmente às transições geométricas e às zonas próximas às soldas e interfaces de fixação. O valor máximo obtido na simulação aproximou-se de 403 MPa, valor que, embora elevado, permanece dentro de limites aceitáveis considerando o material utilizado (AISI 4130).

Figura 47: Resultado da Análise do Braço Principal (*Trailing Arm*)

B: Static Structural

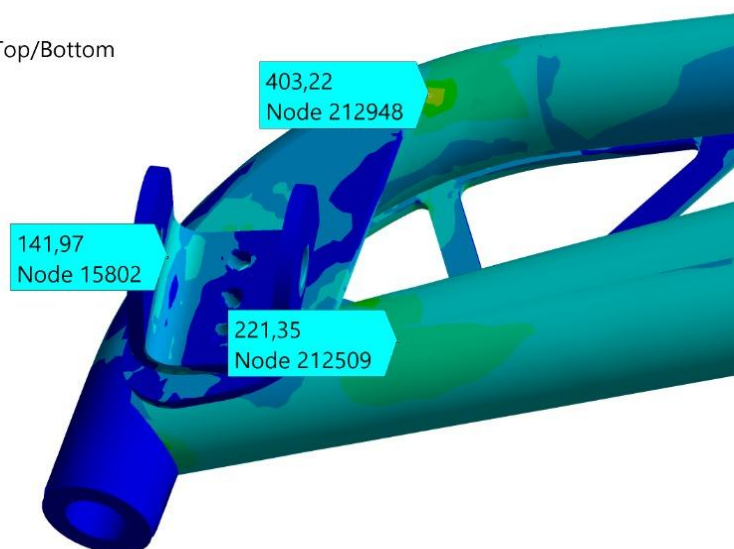
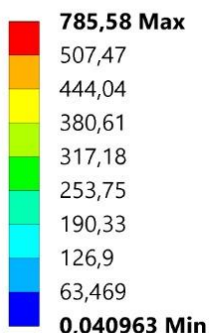
Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom

Unit: MPa

Time: 1 s

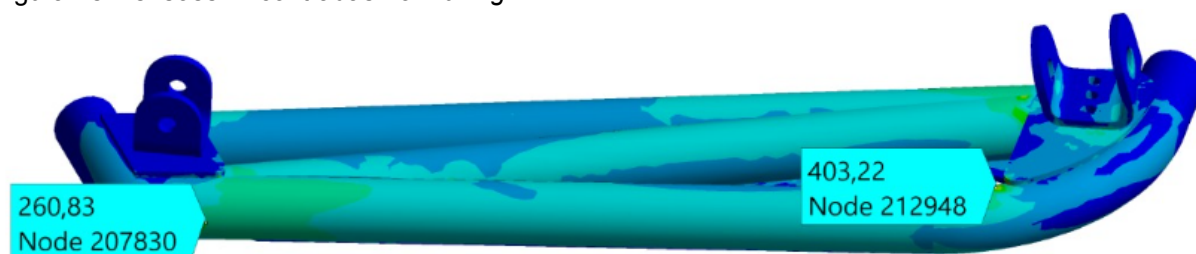
26/11/2025 19:33



Fonte: O autor (2025)

A análise mostrou ainda que a maior parte da estrutura opera em níveis de tensão significativamente inferiores ao valor máximo observado, conforme evidenciado na Figura 48. Essa distribuição indica que as concentrações de tensão permanecem localizadas em regiões específicas de transição geométrica, enquanto o restante do braço principal trabalha em regime estrutural confortável. Esse comportamento demonstra boa rigidez global do componente e uma distribuição eficiente dos esforços ao longo de sua extensão, garantindo capacidade adequada para absorver cargas associadas a impactos da roda, variações bruscas de terreno e irregularidades típicas das condições off-road enfrentadas pelo veículo Baja SAE.

Figura 48: Tensões Encontradas no *Trailing Arm*

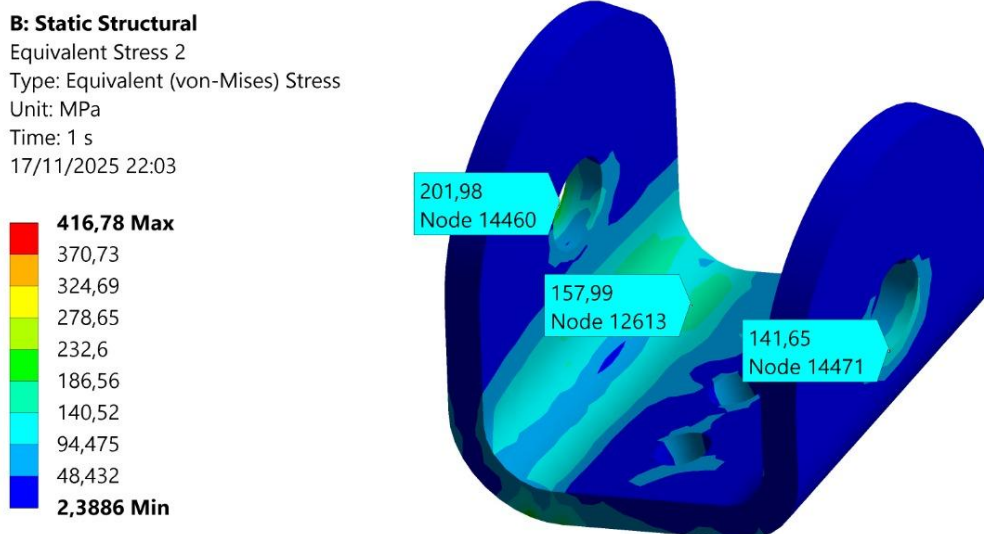


Fonte: O autor (2025)

A orelha responsável pela fixação do amortecedor ao *trailing arm* foi analisada separadamente, devido à sua relevância como ponto concentrador de carga e elemento crítico de interface entre componentes estruturais. A Figura 49 apresenta o mapa de tensões obtido a partir da simulação, considerando a aplicação de carregamento vertical compatível com os esforços transmitidos pelo amortecedor durante impactos e compressões rápidas da suspensão.

Os valores de tensão equivalente permaneceram distribuídos de forma relativamente homogênea ao longo da peça, com picos localizados próximos aos furos de fixação (região naturalmente sujeita a concentrações de tensão). Esses valores, representados por tensões auxiliares entre 140 e 200 MPa, situam-se dentro de uma faixa segura para o material empregado (SAE 1020), garantindo que a orelha possui rigidez suficiente para suportar cargas cíclicas sem apresentar risco de falha por escoamento ou impacto. Além disso, o comportamento observado reforça que o dimensionamento adotado, especialmente na espessura e nas transições geométricas, é adequado para o regime de esforços imposto pelo veículo Baja SAE.

Figura 49: Resultado da Análise da Orelha de Fixação do Amortecedor do *Trailing Arm*



Fonte: O autor (2025)

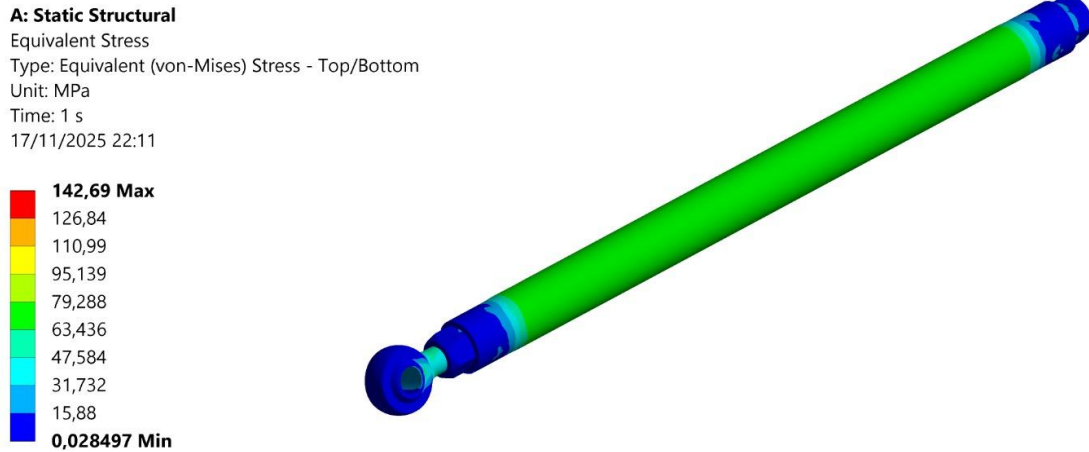
4.5.3 *Camber Link*

A análise estrutural do *camber link* foi conduzida por meio de simulação em FEA com o objetivo de verificar se o componente apresenta rigidez e resistência suficientes para operar sob as cargas de alinhamento e controle lateral aplicadas durante o funcionamento da suspensão traseira. As condições de contorno definidas incluíram o engaste no ponto de fixação ao chassi e a aplicação das cargas na extremidade conectada ao cubo da roda, de forma a reproduzir o comportamento real do sistema durante manobras, transientes de carga e impactos laterais provenientes do terreno.

A Figura 50 apresenta o mapa de tensões equivalentes de von Mises ao longo do corpo tubular do *camber link*. Observa-se que as tensões se concentram principalmente nas regiões próximas às roscas, nos pontos de fixação e nas transições geométricas entre a barra e os terminais articulados.

O valor máximo obtido na simulação aproximou-se de 142,69 MPa, permanecendo significativamente abaixo do limite de escoamento do aço SAE 1020 utilizado no projeto do componente. A maior parte do corpo do *link* permanece submetida a tensões muito inferiores a esse pico, indicando boa distribuição de esforços ao longo do tubo.

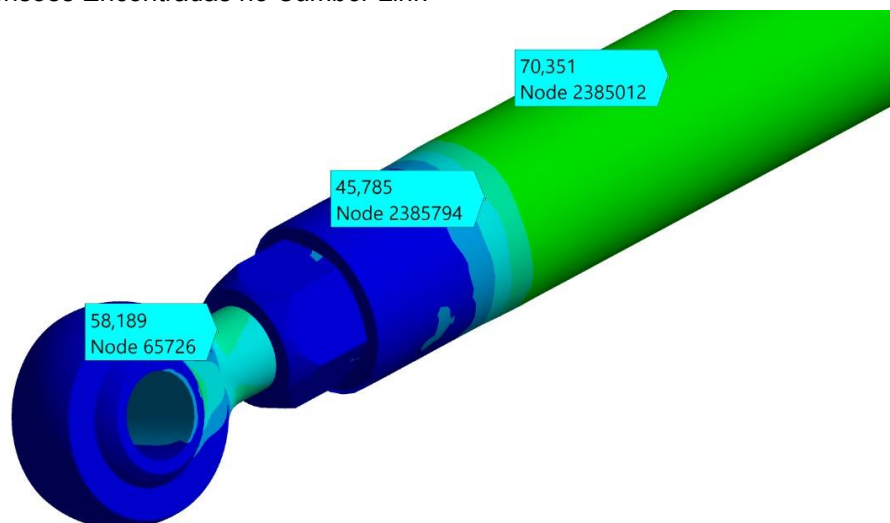
Figura 50: Resultado da Análise dos Braços de Cambagem (*Camber link*)



Fonte: O autor (2025)

A extremidade articulada, mostrada na Figura 51, foi simulada separadamente devido à simetria do conjunto. Como ambos os terminais possuem geometria idêntica, carregamentos equivalentes e funções estruturais iguais, a análise de apenas um deles é suficiente para representar o comportamento de ambos. Essa abordagem reduz significativamente o custo computacional sem comprometer a precisão dos resultados, permitindo concentrar o processamento nas regiões de interesse. Os valores obtidos indicaram tensões máximas da ordem de 70 MPa, com tensões auxiliares próximas a 58 MPa e 45 MPa distribuídas ao redor da interface entre a esfera e a carcaça do terminal. Esses valores permanecem dentro de faixa segura para o material empregado, assegurando resistência adequada sob esforços cíclicos de tração, compressão e cargas laterais.

Figura 51: Tensões Encontradas no *Camber Link*



Fonte: O autor (2025)

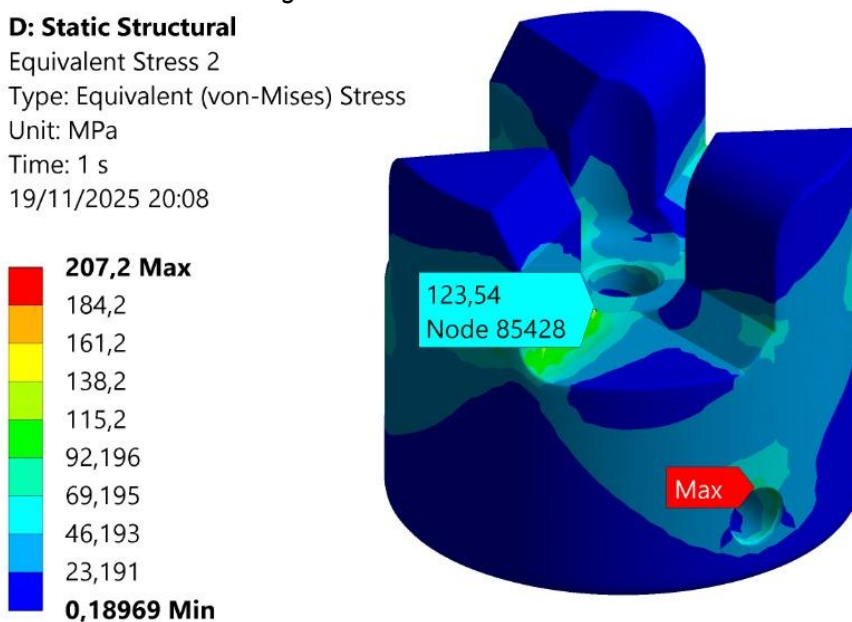
Com base nos resultados obtidos, verifica-se que o *camber link* apresenta comportamento estrutural adequado às necessidades da suspensão. A combinação entre baixa concentração de tensões críticas, rigidez suficiente da barra tubular e desempenho seguro dos terminais articulados demonstra que o dimensionamento adotado é compatível com as exigências do Baja SAE e possui margem satisfatória para absorver esforços severos durante a operação *off-road*.

4.5.4 Barra de Estabilizadora

A barra de torção e seus elementos de conexão foram avaliados por meio de simulação numérica via FEA com o objetivo de verificar se o dimensionamento proposto atende às exigências estruturais impostas pelo sistema de suspensão do veículo. As condições de contorno foram definidas para reproduzir fielmente o comportamento real do conjunto, aplicando-se momento torsor na região do *dog clutch* e engastando a extremidade oposta, garantindo representatividade do cenário de carregamento.

A Figura 52 apresenta a análise do *dog clutch*, componente responsável pela transferência de torque entre a barra de torção e a manga de eixo. O mapa de tensões de von Mises evidencia concentrações significativas nas regiões dos furos e nas superfícies internas de acoplamento.

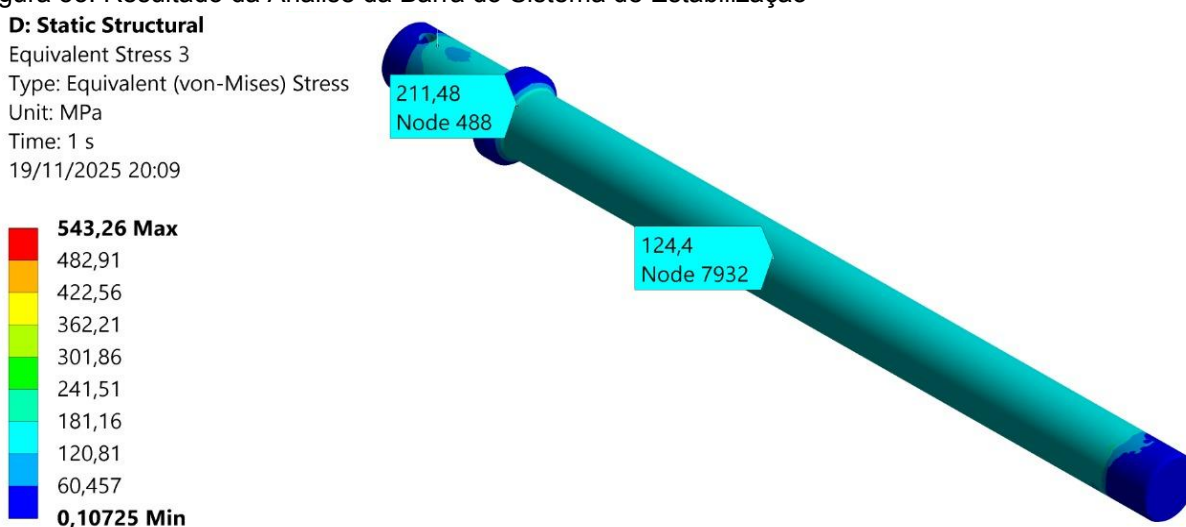
Figura 52: Resultado da Análise do *Dog Clutch*



Fonte: O autor (2025)

A Figura 53 ilustra a distribuição de tensões ao longo da barra de torção, destacando comportamento predominantemente elástico e níveis moderados de solicitação na maior parte de sua extensão. Os picos localizados nas regiões de interface com o acoplamento são coerentes com as discontinuidades geométricas. Os valores de tensão permanecem dentro dos limites admissíveis do material da barra, indicando que a barra apresenta rigidez adequada e resistência suficiente para suportar os esforços de torção impostos nas condições mais severas de operação.

Figura 53: Resultado da Análise da Barra do Sistema de Estabilização



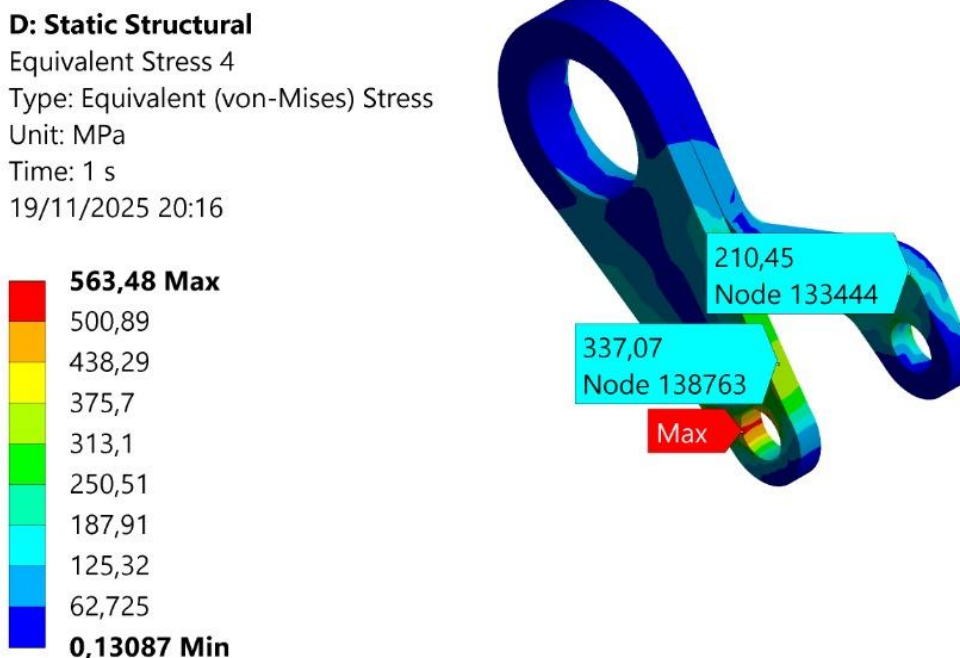
Fonte: O autor (2025)

Por fim, a Figura 54 apresenta a análise das orelhas de fixação associadas ao sistema, que funcionam como pontos críticos de transferência de carga entre componentes estruturais. Nesta região foram identificados os maiores picos de tensão dentre todas as partes analisadas, atingindo valores superiores ao limite de escoamento do SAE 1045 trefilado.

Essa condição reforça a necessidade de intervenção no *design*, sendo recomendada a ampliação da espessura das chapas, o aumento das paredes laterais e a otimização dos filetes de transição. Tais modificações contribuem para reduzir concentrações excessivas e aumentar a segurança estrutural do conjunto. Além disso, o reforço geométrico tende a melhorar a distribuição do fluxo de tensões ao longo da peça, evitando pontos de fragilidade e garantindo maior resistência à impacto. A implementação dessas melhorias aumenta a vida útil do componente e

assegura melhor confiabilidade durante situações de alto carregamento típicas do ambiente *off-road*.

Figura 54: Resultado da Análise da Orelha da Barra Estabilizadora

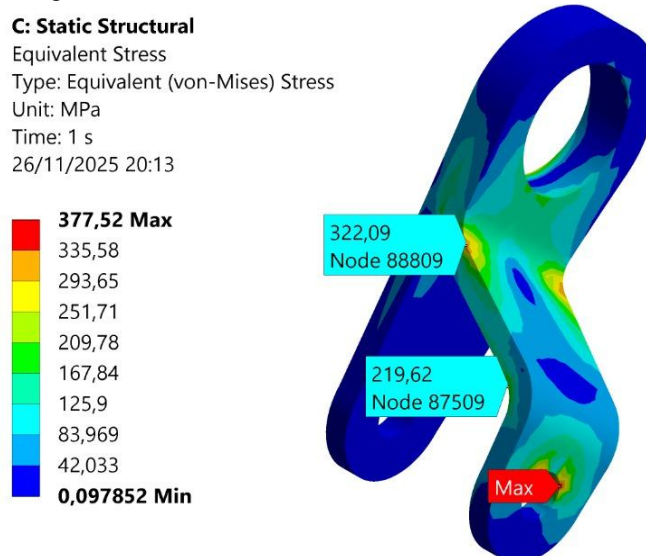


Fonte: O autor (2025)

Os resultados obtidos validam parcialmente o dimensionamento atual: embora a barra de torção e parte do acoplamento apresentem comportamento aceitável, as orelhas de fixação exigem ajustes para que operem integralmente dentro dos limites seguros de tensão. Dessa forma, a análise FEA cumpriu seu papel ao identificar regiões críticas e orientar melhorias fundamentais para a integridade estrutural e a confiabilidade do sistema.

Após a alteração dimensional das orelhas, uma nova simulação numérica foi realizada para avaliar o efeito da mudança no comportamento do componente. A Figura 55 apresenta o modelo atualizado submetido às mesmas condições de carregamento e engaste aplicadas na análise anterior, permitindo comparação direta entre os resultados. A expectativa técnica é que o aumento da espessura distribua melhor os esforços na região crítica, reduzindo o pico de tensão para valores inferiores ao escoamento do material, garantindo maior margem de segurança e maior vida útil sob carregamentos cíclicos típicos do sistema de suspensão.

Figura 55: Resultado da Segunda Análise da Orelha da Barra Estabilizadora



Fonte: O autor (2025)

4.5.5 Manga de Eixo

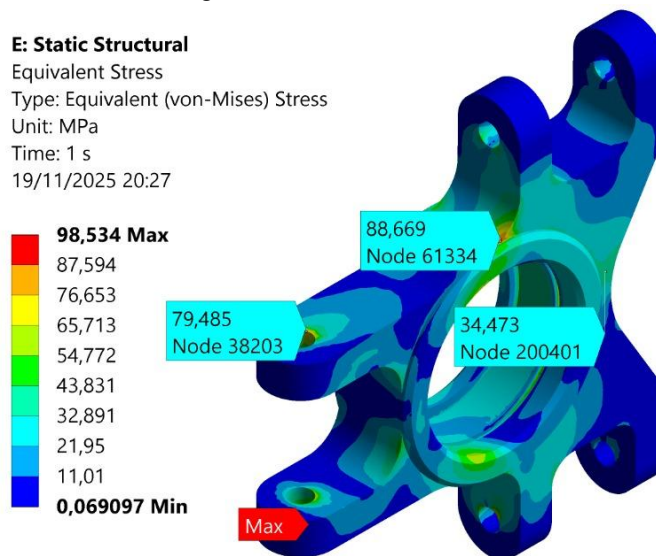
A análise estrutural da manga de eixo foi conduzida com o objetivo de verificar sua capacidade de suportar as cargas provenientes do sistema de suspensão durante o funcionamento do veículo Baja SAE. Por se tratar de um componente responsável por receber diretamente esforços oriundos do conjunto roda-pneu e transmitir essas cargas para os braços de suspensão, sua verificação estrutural é essencial para garantir a integridade global do sistema.

As condições de contorno aplicadas na simulação foram definidas de forma a representar fielmente o comportamento real do componente. Suportes cilíndricos foram utilizados nas regiões onde a manga se conecta aos braços da suspensão, restringindo graus de liberdade compatíveis com a interface de montagem.

A Figura 56 exibe a distribuição da tensão equivalente de von Mises ao longo da manga de eixo. Os resultados indicaram um valor máximo de aproximadamente 98,53 MPa, concentrado na região inferior do componente, próximo aos furos de fixação. Essas concentrações são esperadas, pois representam áreas de transição geométrica e zonas submetidas a esforços combinados de flexão e cisalhamento. Tensões auxiliares de 79,48 MPa, 88,66 MPa e 34,47 MPa foram encontradas em regiões secundárias de interesse estrutural. Todos esses valores permanecem abaixo do limite de escoamento do material empregado, garantindo que a geometria

atual opera de maneira segura e com margem adequada frente aos esforços previstos em operação.

Figura 56: Resultado da Análise da Manga de Eixo



Fonte: O autor (2025)

A análise demonstra que a manga apresenta um comportamento estrutural satisfatório, com boa rigidez e distribuição de tensões coerente com sua função no conjunto de suspensão. A ausência de concentrações severas de tensão e o fato de os picos permanecerem abaixo do limite de escoamento mostram que o componente possui capacidade adequada para suportar tanto cargas estáticas quanto solicitações típicas de impacto e irregularidades do terreno. Dessa forma, o dimensionamento adotado para o componente se mostra adequado para o regime operacional do protótipo.

4.6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A análise dos resultados permitiu avaliar de forma quantitativa a eficiência geométrica e estrutural do sistema de suspensão traseira *three-link trailing arm* desenvolvido. O Quadro 1 sintetiza os principais dados obtidos nas simulações por Elementos Finitos, apresentando para cada componente o material empregado, o limite de escoamento, a tensão máxima registrada e o coeficiente de segurança correspondente. Essa consolidação possibilita comparar diretamente o comportamento mecânico dos diferentes elementos e identificar aqueles que operam com maior margem de segurança ou que demandam ajustes no projeto.

Quadro 1: Coeficiente de Segurança Aplicado aos Itens Desenvolvidos

Item	Material	Limite de Escoamento do Material	Tensão Máxima Atingida	Coeficiente de Segurança
Orelha de Fixação do <i>Camber link</i>	SAE 1045	310 MPa	290 MPa	1,07
Orelha de Fixação do <i>Trailing Arm</i>	SAE 1045	310 MPa	290 MPa	1,07
Braço Principal (<i>Trailing Arm</i>)	AISI 4130	460 MPa	403 MPa	1,14
Orelha de Fixação do Amortecedor	SAE 1045	310 MPa	202 MPa	1,53
Braços Laterais (<i>Camber Link</i>)	SAE 1020	205 MPa	70 MPa	2,93
Acoplamento <i>Dog Clutch</i>	SAE 1045 Trefilado	450 MPa	124 MPa	3,63
Barra de Torção	SAE 1045 Trefilado	450 MPa	211 MPa	2,13
Orelha da Barra de Torção	SAE 1045 Trefilado	450 MPa	377 MPa	1,19
Manga de eixo	EN AW 6061-T6	270 MPa	89 MPa	3,03

Fonte: O Autor (2025)

Quanto ao desempenho estrutural, a maioria dos componentes apresentou coeficientes de segurança superiores a 1,5, indicando operação confortável dentro do regime elástico dos materiais empregados. Elementos como os braços laterais do *camber link*, o acoplamento do *dog clutch*, a barra de torção e a manga de eixo destacaram-se com margens de segurança elevadas, resultado da combinação entre geometria eficiente, distribuição uniforme das tensões e adequação entre material e solicitação mecânica.

O braço principal do *trailing arm*, fabricado em AISI 4130, atingiu tensões próximas a 403 MPa, resultando em um coeficiente de segurança de 1,14. Embora este valor seja inferior ao dos demais componentes, ainda se mantém dentro de limites admissíveis para situações extremas de carregamento, especialmente

considerando que o cenário simulado reflete a condição de pior caso do veículo aterrissando sobre apenas uma das rodas traseiras.

Por outro lado, as orelhas de fixação (tanto do *camber link* quanto do *trailing arm*), produzidas em SAE 1045, foram os únicos elementos que apresentaram coeficiente de segurança próximo de 1,0. Com tensões máximas em torno de 290 MPa para um limite de escoamento de 310 MPa, esses componentes operam muito próximos ao limite elástico, indicando suscetibilidade a deformações permanentes em situações de impacto mais severo. Como essas peças concentram esforços em regiões de furo, onde naturalmente há intensificação das tensões, recomenda-se o aumento da espessura das paredes, bem como ajustes nas transições geométricas. Essa solução tende a reduzir a concentração de esforços e elevar o coeficiente de segurança. Uma nova simulação deverá ser realizada após tais ajustes para validar a eficácia da modificação.

O conjunto mecânico da barra de torção e seus suportes apresentou bom desempenho, com tensões distribuídas e coeficientes de segurança entre 1,40 e 2,16, assegurando seu funcionamento adequado mesmo sob cargas torcionais altas. Já a manga de eixo, desenvolvida em alumínio EN AW 6061-T6, obteve resultados bastante satisfatórios, com tensões significativamente abaixo do limite de escoamento e coeficiente de segurança acima de 3,0, confirmando sua rigidez e leveza como uma solução equilibrada.

De modo geral, os resultados obtidos mostram coerência com as soluções tradicionalmente empregadas por equipes de destaque no cenário do Baja SAE Brasil, nas quais sistemas do tipo *trailing arm* ou variações de multilink traseiro são amplamente adotados devido à sua robustez estrutural e previsibilidade cinemática. Entretanto, diferentemente de muitas configurações convencionais, que apresentam ajustes limitados ou demandam alterações significativas no chassi, a geometria proposta neste trabalho se destaca pela ampla capacidade de ajuste de parâmetros como cambagem e convergência, mantendo compatibilidade com um chassi já existente. Dessa forma, o sistema desenvolvido alinha-se às práticas consolidadas da competição, ao mesmo tempo em que propõe uma evolução funcional ao ampliar a flexibilidade geométrica e a possibilidade de adaptação a diferentes condições de pista.

Embora não tenham sido realizados testes físicos ou validações experimentais em pista, os resultados geométricos e estruturais permitem inferir

impactos positivos do sistema proposto sobre a dirigibilidade do veículo. A possibilidade de ajuste fino da cambagem e da convergência, aliada ao controle da rolagem proporcionado pela barra estabilizadora com mecanismo liga–desliga, tende a resultar em melhor controle direcional, maior estabilidade em curvas e comportamento mais previsível do eixo traseiro. Além disso, a opção pelo desacoplamento da barra em terrenos irregulares favorece a articulação da suspensão, contribuindo para maior tração e contato efetivo dos pneus com o solo, características amplamente desejadas em provas *off-road*.

De forma integrada, a análise estrutural demonstra que a geometria proposta para o sistema *three-link trailing arm* entrega bom desempenho cinemático e resistência adequada para condições severas de operação em Baja SAE. As não conformidades identificadas são pontuais e facilmente solucionáveis por meio de ajustes dimensionais, não comprometendo a viabilidade do projeto. Assim, os resultados confirmam que o desenvolvimento atendeu ao objetivo de propor uma suspensão traseira ajustável, robusta, replicável e compatível com o chassi atual da equipe Sinuelo, contribuindo para a evolução dos futuros protótipos.

CONCLUSÃO

O desenvolvimento do sistema de suspensão traseira three-link trailing arm integrado à barra estabilizadora liga–desliga permitiu consolidar uma solução estrutural e geométrica robusta, ajustável e coerente com as demandas do veículo Baja SAE. A partir da revisão bibliográfica, do estudo da dinâmica veicular e da aplicação de modelagem CAD e simulação FEA, foi possível projetar um conjunto capaz de aliar desempenho dinâmico, confiabilidade estrutural e viabilidade de implementação no chassi atualmente utilizado pela equipe Sinuelo FAHOR.

Os resultados obtidos demonstraram que a geometria proposta atende aos requisitos de ajuste de cambagem, convergência, curso de suspensão e compatibilidade dimensional com o conjunto motriz, mantendo controle adequado da trajetória da roda em todo o seu deslocamento. As análises estruturais revelaram que os principais componentes operam dentro dos limites admissíveis dos materiais selecionados e, nos casos em que ocorreram concentrações de tensão, foram implementadas melhorias construtivas que elevaram a segurança e a durabilidade do sistema.

Além disso, a integração do mecanismo liga–desliga da barra estabilizadora trouxe ao sistema uma camada adicional de versatilidade, permitindo ao piloto selecionar o comportamento mais adequado para cada condição de terreno, seja maior estabilidade em curvas ou maior articulação em trechos irregulares. Essa característica amplia significativamente o potencial competitivo do protótipo, uma vez que adapta o comportamento dinâmico do veículo às exigências específicas das provas.

Embora o trabalho se limite à etapa de projeto e validação numérica, o modelo final apresenta maturidade técnica e construtiva para futura fabricação e testes experimentais. Acredita-se que esta pesquisa contribui diretamente para o avanço técnico da equipe, proporcionando um sistema de suspensão moderno, ajustável, padronizado e replicável em novos chassis, além de servir como referência para projetos futuros na área de dinâmica veicular aplicada ao Baja SAE.

Como continuidade natural deste estudo, recomenda-se a fabricação do sistema projetado, possibilitando a realização de testes experimentais em pista e a comparação direta entre os resultados simulados e o desempenho real do protótipo. Da mesma forma, torna-se relevante a condução de análises de fadiga,

considerando que os componentes da suspensão em veículos *off-road* são submetidos a carregamentos cíclicos severos, exigindo avaliação detalhada de vida útil e resistência a falhas ao longo do tempo.

Outro avanço importante consiste no desenvolvimento de um sistema de acionamento elétrico para o *dog clutch* da barra estabilizadora, permitindo engate e desengate automatizado conforme as condições de condução. Tal aprimoramento pode elevar substancialmente a funcionalidade do mecanismo, integrar o sistema a estratégias ativas de controle de estabilidade e aumentar a segurança, ao dispensar intervenção manual em situações de competição.

Essas etapas complementares fortaleceriam ainda mais a solução apresentada e abririam caminho para futuras pesquisas em tecnologias aplicadas à suspensão veicular no contexto da Baja SAE.

REFERÊNCIAS

BULLOCK, L.; GARDINER, A.; HEAPS, T.; HEGERMANN, B.; JOHNSON, L.; MORRISON, L.; TODD, C.; WALKER, K.; WOOLFENDEN, J. USU Mini Baja SAE. Logan, **UT: Mechanical & Aerospace Engineering Department**, Fall 2022–Spring 2023. Disponível em: <https://engineering.usu.edu/mae/students/senior-projects/fall2022-spring2023/projects/usu-mini-baja-sae>. Acesso em: 10 nov. 2025.

DUAN, C. **Analytical Study of a Dog Clutch in Automatic Transmission Application**. SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems, v. 7, n. 3, p. 1155–1159, 2014. DOI: 10.4271/2014-01-1775. Acesso em: 10 nov. 2025.

EQUIPE SINUELO. **Equipe Sinuelo FAHOR de Baja: O QUE É A EQUIPE SINUELO FAHOR DE BAJA?**. Disponível em: <<https://sinuelo.fahor.com.br>> Acesso em: 15 mar. 2025

GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics: Revised Edition**. SAE International, 2021. ISBN-epub: 978-1-4686-0356-9. Acesso em: 18 mar. 2025

HOW A CAR WORKS. **How car suspension works**. Disponível em: <https://www.howacarworks.com/basics/how-car-suspension-works>. Acesso em: 04 ago. 2025.

JAYAKUMAR, P.; ALANOLY, J.; JOHNSON, R. **Three-Link Leaf-Spring Model for Road Loads**. SAE Technical Paper 2005-01-0625, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.4271/2005-01-0625>. Acesso em: 06 mar. 2025

JAZAR, R. N. **Vehicle Dynamics: Theory and Application**. Springer, 2017. ISBN-epub: 978-0-387-74244-1. Acesso em: 25 fev. 2025

JIMENEZ, G. **Barra estabilizadora: O que é e para que serve?**. Kavak, 2022. Disponível em: <https://www.kavak.com/br/blog/barra-estabilizadora-para-que-serve>. Acesso em: 18 nov. 2025.

KASAHARA, T.; MORIOKA, N.; SATOU, M.; YAGI, T.; MURAOKA, K. **Development of a New Multi-link Suspension**. SAE Technical Paper 2000-01-0092, 2000. Acesso em: 04 mar. 2025.

LAJQI, S.; PEHAN, S.; LAJQI, N.; GJELAJ, A.; PŠENIČNIK, J.; EMIN, S. **Design of Independent Suspension Mechanism for a Terrain Vehicle with Four Wheels Drive and Four Wheels Steering**. Annals of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering, v. XI, n. 1, p. 101-108, 2013. Acesso em: 04 mar. 2025.

LAKATOS, E. M. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 9. ed. Rio de Janeiro: Atlas, 2021. E-book. p.212. ISBN 9788597026580. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788597026580/>. Acesso em: 04 mar. 2025.

LAMERS, W. **Development and analysis of a multi-link suspension for racing applications**. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/Development-and-analysis-of-a-multi-link-su>>

sension-Lamers/b941b9a5a84561547a27dc3941c09ebd0a4dae5c> Acesso em 28 mar. 2025

LIU, X., et al. **Roll motion active control based on dynamic stability factor for wheel-legged vehicles**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, v. 237, n. D, 2023. DOI: 10.1177/09544070231211369. Acesso em: 18 nov. 2025.

MACORIN, R. B. **Estudo sobre suspensão automotiva focado em veículos off-road**. 2006. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Acesso em: 25 fev. 2025

MILLIKEN, W. F.; MILLIKEN, D. L. **Race Car Vehicle Dynamics**. SAE International, 1995. ISBN: 1-56091-526-9. Acesso em: 10 mar. 2025

NEWAY, A. **How to Build a Car: The Autobiography of the World's Greatest Formula 1 Designer**. HarperCollins, 2017. ISBN-epub: 978-0-0081-9681-3. Acesso em: 23 fev. 2025.

NICANOR, G. A.; CARVALHO, L. S.; MAZZONI, U. R. C. **Análise dinâmica da suspensão de um veículo Mini Baja SAE**. Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 8, n. 3, p. 1-13, dez. 2016. Acesso em: 18 mar. 2025

OVERDRIVE. **Alinhamento de rodas: os cinco ângulos essenciais**. Disponível em: <<https://overdrive-br.blogspot.com/2012/07/alinhamento-de-rodas-os-cinco-angulos.html>>. Acesso em: 20 mar. 2025

RICHMOND, B. G.; BARTH W. W.; IAN G.; PAUL C. D.; CALLUM F. R.; MARK A. S.; DAVID S. S. **Finite Element Analysis in Functional Morphology**. The Anatomical Record Part A, 2005. Disponível em: <https://anatomypubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ar.a.20169>. Acesso em 20 nov. 2025.

SAE BRASIL. **Baja Nacional**. Disponível em: <<https://saebrasil.org.br/programas-estudantis/baja-sae-brasil-2/>>. Acesso em: 15 mar. 2025

SANTANA, L. de C; VILLIBOR, G. P. **Avaliação do sistema de suspensão "Semi-Trailing Arm" para aplicação em veículos off-road tipo Baja**. *Journal of Engineering and Computing Education*, v. 3, n. 1, p. 040–042, 2017. Acesso em: 26 jan. 2025

SCHAEFFLER. **Chassis Systems – Heading Toward Steer-By-Wire**. Disponível em: <https://www.schaeffler.com/en/media/dates-events/kolloquium/digital-conference-book-2022/chassis-solutions/>. Acesso em: 18 nov. 2025.

SOUZA, A. C. G. F. de; MORAES, M. C. de; MENEZES, M. Â. **Análise da barra estabilizadora em um veículo off-road**. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v. 5, n. 7, p. 10848–10859, jul. 2019. DOI: 10.34117/bjdv5n7-221. Acesso em: 10 nov. 2025.

SOUZA, G. I. de. **Estudo dinâmico e dimensional de um novo modelo de tirante para um veículo Baja**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas-RN, 2021. Acesso em: 20 mar. 2025

SNELGROVE, A. **Off Road Inovations - Design of an Off-Road Suspension and Steering System**. Mechanical Design Project II, 2014. Engineering Department of Memorial University of Newfoundland. Disponível em: https://offroadinnovations.weebly.com/uploads/1/9/0/6/19060545/final_report__drawing_package.pdf. Acesso em: 08 out 2025.

TEZA, R. V. **Análise da Proposta de Modelo de Bandeja de Suspensão Traseira em Fibra de Carbono para Veículo Baja**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), 2022. Acesso em: 20 mar. 2025

TOWN FAIR TIRE. **Caster, Camber, and Toe Alignments**. Disponível em: <https://www.townfairtire.com/information/wheel-alignment/caster-camber-and-toe-alignments/>. Acesso em: 18 mar. 2025

UKAMNAL, Santosh et al. **Design of Trailing Arm Suspension**. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), v. 3, n. 6, p. 87–91, 2014. ISSN 2278-0181. Disponível em: www.ijert.org. Acesso em: 04 ago. 2025.

YAKIMOVICH, T; LEMAIRE, E. D.; KOFMAN, J. **Engineering design review of stance-control knee-ankle-foot orthoses**. Journal of Rehabilitation Research and Development, v. 46, n. 2, p. 257–268, fev. 2009. DOI: 10.1682/JRRD.2008.02.0024. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/26298694_Engineering_design_review_of_stance-control_knee-ankle-foot_orthoses. Acesso em: 10 nov. 2025.