



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP**

**ESCOLA DE MINAS**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**



**MARCO ANTONIO MARTINS MONTEIRO**

**ANÁLISE DAS INFLUÊNCIAS DOS PARÂMETROS  
GEOMÉTRICOS DA SUSPENSÃO NO COMPORTAMENTO  
DINÂMICO E NA DIRIGIBILIDADE DE UM PROTÓTIPO DE  
FÓRMULA SAE**

**OURO PRETO – MG  
2026**

**MARCO ANTONIO MARTINS MONTEIRO**

[marco.monteiro@aluno.ufop.edu.br](mailto:marco.monteiro@aluno.ufop.edu.br)

**ANÁLISE DAS INFLUÊNCIAS DOS PARÂMETROS  
GEOMÉTRICOS DA SUSPENSÃO NO COMPORTAMENTO  
DINÂMICO E NA DIRIGIBILIDADE DE UM PROTÓTIPO DE  
FÓRMULA SAE**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Dr. Diogo Antonio de Sousa

**OURO PRETO – MG  
2026**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M775a Monteiro, Marco Antônio Martins.

Análise das influências dos parâmetros geométricos da suspensão no comportamento dinâmico e na dirigibilidade de um protótipo de fórmula SAE. [manuscrito] / Marco Antônio Martins Monteiro. - 2026.  
49 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Diogo Antônio de Souza.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Automóveis - Dinâmica. 2. Automóveis - Molas e suspensão. 3. Engenharia de protótipos. 4. Dinâmica Veicular. I. Souza, Diogo Antônio de. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621:629.01

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Marco Antonio Martins Monteiro**

### **Análise das influências dos parâmetros geométricos da suspensão no comportamento dinâmico e na dirigibilidade de um protótipo de fórmula SAE**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico

Aprovada em 05 de fevereiro de 2026

#### Membros da banca

DSc. Diogo Antônio de Sousa - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)

DSc. Washington Luis Vieira da Silva (Universidade Federal de Ouro Preto)

MSc. Sávio Sade Tayer (Universidade Federal de Ouro Preto)

Diogo Antônio de Sousa, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 07/03/2026



Documento assinado eletronicamente por **Diogo Antonio de Sousa, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/03/2026, às 15:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1070952** e o código CRC **C25E16F0**.

Dedico este trabalho a meus pais, Renato e Raquel pelo incentivo durante minha graduação.

A minha namorada, Lara pelo apoio incondicional durante todos os momentos.

A república Skulaxu e todos seus moradores e ex-alunos por ser minha casa durante todos esses anos.

## **AGRADECIMENTO**

À minha família, Renato, Raquel e Lara por serem a base de tudo que sou hoje e por todo o apoio, amor, carinho e compreensão.

Ao meu orientador Diogo Antônio de Sousa, pelo incentivo e orientação neste trabalho e por sempre incentivar o estudo da área automotiva na UFOP.

A todos os professores com quem tive convivência nesta graduação, em especial, Gustavo Paulinelli, Sávio Tayer, Washington Luis e Igor César por sempre nos desafiar a serem melhores estudantes, pessoas e profissionais.

Aos meus grandes camaradas da república Skulaxu e Mata Virgem, com os quais dividi vários momentos e que facilitaram as horas difíceis durante a graduação.

*“Talvez não tenhamos conseguido fazer o melhor. Mas lutamos para que o melhor fosse feito. Não somos o que deveríamos ser, não somos o que iremos ser, mas graças a Deus não somos o que éramos”.*

Martin Luther King

## RESUMO

Esta pesquisa examina a influência dos parâmetros geométricos de suspensão, os ângulos de caster, camber e convergência no comportamento dinâmico e na dirigibilidade de um protótipo Fórmula SAE. O estudo surge da necessidade de otimizar o primeiro veículo da Equipe FEMU, fundamentando decisões de projeto em dados concretos para superar limitações de recursos e a ausência de dados experimentais prévios. Por meio de uma revisão sistemática e análise comparativa da literatura técnica, o trabalho avalia como ajustes nesses ângulos impactam indicadores críticos de desempenho, como estabilidade direcional, resposta transiente e aderência lateral. A metodologia envolveu a seleção, classificação e comparação de estudos que empregam simulação multicorpo, análise cinemática e compliance e ensaios experimentais. Os resultados identificaram uma tendência consolidada entre equipes de referência, com faixas ótimas de caster ( $5,5^\circ$  a  $7,0^\circ$ ), camber negativo ( $-2,0^\circ$  a  $-3,0^\circ$ ) e toe-out dianteiro moderado ( $-0,10^\circ$  a  $-0,30^\circ$ ). A análise demonstrou que aumentos no caster reduzem o gradiente de substerço, o camber negativo otimiza o contato do pneu em curva e o toe-out melhora a resposta inicial à direção. Com base nessas correlações, o trabalho propõe uma geometria final para a suspensão dianteira do protótipo FEMU, com caster de  $6,5^\circ$ , camber de  $-2,5^\circ$  e convergência de  $-0,15^\circ$ . Esta configuração oferece um equilíbrio entre estabilidade e agilidade, está em conformidade com o regulamento e alinha-se a padrões internacionais. Conclui-se que a integração de revisão sistemática com análise geométrica fornece um suporte técnico robusto para o projeto de suspensão, reduz a necessidade de tentativa e erro experimental e contribui para o desenvolvimento de protótipos mais competitivos e eficientes.

**Palavras-chave:** Geometria de suspensão; Fórmula SAE; Dirigibilidade; Dinâmica veicular.

## ABSTRACT

This study analyzes the influence of suspension geometric parameters, caster, camber, and toe angles on the dynamic behavior and handling of a Formula SAE prototype. The research addresses the need to optimize the first vehicle of the FEMU Team, basing design decisions on concrete data to overcome resource constraints and the lack of prior experimental data. Through a systematic review and comparative analysis of technical literature, the work evaluates how adjustments to these angles impact critical performance indicators, such as directional stability, transient response, and lateral grip. The methodology involved the selection, classification, and comparison of studies employing multibody dynamics simulation, kinematic and compliance analysis, and experimental testing. The results identified a consistent trend among reference teams, with optimal ranges for caster ( $5.5^\circ$  to  $7.0^\circ$ ), negative camber ( $-2.0^\circ$  to  $-3.0^\circ$ ), and moderate front toe-out ( $-0.10^\circ$  to  $-0.30^\circ$ ). The analysis showed that increased caster reduces the understeer gradient, negative camber optimizes tire contact in corners, and toe-out improves initial steering response. Based on these correlations, the work proposes a final geometry for the FEMU prototype's front suspension, with  $6.5^\circ$  of caster,  $-2.5^\circ$  of camber, and  $-0.15^\circ$  of toe. This configuration offers a balance between stability and agility, complies with regulations, and aligns with international standards. It is concluded that integrating systematic review with geometric analysis provides robust technical support for suspension design, reduces the need for experimental trial and error, and contributes to developing more competitive and efficient prototypes.

**Key-words:** Suspension geometry; Formula SAE; Handling; Vehicle dynamics.

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1: Suspensão Duplo A;.....	6
Figura 2: Suspensão de um FSAE;.....	8
Figura 3: Keep out zone e superfícies que devem ser visíveis. ....	9
Figura 4: Variação dos ângulos de camber.....	10
Figura 5: Manga de eixo com caster positivo.....	11
Figura 6: Variação dos ângulos de convergência. ....	12
Figura 7: Classificação das fontes bibliográficas de pesquisa.....	20
Figura 8: Fluxograma da metodologia do trabalho. ....	26
Figura 9: Distribuição temporal dos estudos selecionados;.....	30
Figura 10: Quantidade de estudos por biênio;.....	30
Figura 11: Correlação de força lateral simulada com valores computados.....	36
Figura 12: Variação de camber no camber resultante em relação ao curso percorrido;.....	37
Figura 13: Variação no ângulo de convergência;.....	39

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Variáveis e Indicadores. ....	27
Tabela 2: Ficha Técnica resumida dos estudos selecionados. ....	29
Tabela 3: Ficha técnica dos ensaios utilizados nos estudos selecionados. ....	32
Tabela 4: Geometria da suspensão dianteira de equipes de referência.....	41
Tabela 5: Geometria recomendada para a equipe FEMU.....	42

**LISTA DE SIMBOLOS**

$\gamma$ :	Ângulo de camber
$\theta$ :	Ângulo de caster
$\delta$ :	Ângulo de convergência (toe)
$F\gamma$ :	Força lateral gerada pelo camber
$C\gamma$ :	Coefficiente de força por camber [N/grau]
$Mz,\gamma$ :	Momento de autoalinhamento resultante do camber
$CM\gamma$ :	Coefficiente de momento por camber
$Fz$ :	Carga vertical no pneu
$Tm$ :	Trail mecânico
$R$ :	Raio da roda
$Fy,\delta$ :	Força lateral gerada pela convergência
$C\alpha$	Coefficiente de deriva do pneu

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	1
1.2	JUSTIFICAVA.....	2
1.3	OBJETIVOS.....	3
1.3.1	GERAL.....	3
1.3.2	ESPECÍFICOS .....	3
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	4
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1	HISTÓRICO DAS SUSPENSÕES AUTOMOTIVAS.....	5
2.1.1	EIXOS RÍGIDOS .....	5
2.1.2	SUSPENSÃO INDEPENDENTE .....	5
2.2	SUSPENSÃO DUPLO A .....	5
2.3	A SUSPENSÃO DE UM FÓRMULA SAE.....	7
2.4	REGULAMENTAÇÃO DO SISTEMA DE SUSPENSÃO .....	8
2.4.1	REQUISITOS DE FUNCIONAMENTO.....	8
2.5	GEOMETRIA E DISPOSIÇÃO DAS RODAS .....	9
2.6	PARÂMETROS PARA O ESTUDO DA SUSPENSÃO .....	9
2.6.1	ÂNGULO DE CAMBER .....	10
2.6.2	ÂNGULO DE CASTER.....	10
2.6.3	ÂNGULO DE CONVERGÊNCIA .....	11
2.6.4	EFEITOS DA GEOMETRIA.....	12
2.7	CONDIÇÕES DE TESTES.....	13
2.8	INDICADORES RESULTANTES DOS TESTES.....	15
2.8.1	GRADIENTE DE SUBESTERÇAMENTO .....	15
2.8.2	ACELERAÇÃO LATERAL MÁXIMA .....	16
2.8.3	CAMBER DINÂMICO.....	16
2.8.4	RIGIDEZ DE CAMBAGEM (ROLL STIFNESS).....	16
2.8.5	BUMP STEER.....	17
2.8.6	RIGIDEZ NOS PONTOS DE FIXAÇÃO.....	17
2.8.7	TEMPO DE RESPOSTA .....	18
2.8.8	EFICIÊNCIA DE CONTORNO DE CURVA .....	18
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>19</b>

3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA .....	19
3.2	PREMISSAS DO PROJETO FORMULA SAE .....	20
3.2.1	DIMENSÕES GERAIS .....	20
3.2.2	ANÁLISE DE DIRIGIBILIDADE .....	22
3.3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
3.3.1	METODOLOGIA DE BUSCA.....	22
3.3.2	INSTRUMENTO DE SELEÇÃO E COLETA DE DADOS.....	23
3.3.3	PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE COMPARATIVA.....	24
3.4	VARIÁVEIS E INDICADORES .....	26
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>28</b>
4.1	MAPEAMENTO DOS ESTUDOS TÉCNICOS .....	28
4.2	AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS EXPERIMENTAIS .....	32
4.3	AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS ÂNGULOS NOS INDICADORES DE PERFORMANCE .....	36
4.4	GEOMETRIA DE EQUIPES E CORRELAÇÃO COM ESTUDOS SELECIONADOS .....	40
4.5	GEOMETRIA PROPOSTA PARA A EQUIPE FEMU .....	42
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>44</b>
5.1	CONCLUSÃO.....	44
5.2	RECOMENDAÇÕES.....	45
	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>46</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A competição FÓRMULA SAE BRASIL é um evento que tem como objetivo a produção de um protótipo veicular feito por estudantes para ser avaliado em diversos testes. Este evento, promovido pela SAE (*Society of Automotive Engineering*), utiliza vários desafios de engenharia para assim, auxiliar na capacitação de estudantes para atuarem na área automotiva com mais qualificação (FÓRMULA UTFPR - FÓRMULA SAE, 2022).

O protótipo de Fórmula SAE é um projeto complexo e de custo consideravelmente elevado, ou seja, antes de desenvolver o protótipo é necessário o máximo de estudo e análise do mesmo, para assim aumentar a eficiência do carro sem ter os gastos inflacionados com a criação de sistemas com desempenho abaixo do ideal. Assim, além dos benefícios na performance do carro, ganha-se pontuação nas categorias “*Design Judging*” e “*Cost Report*”, estes que somam 32,5% da avaliação final do protótipo segundo o documento oficial *RULES SAE INTERNATIONAL* (2024, p.118).

Diante da necessidade de maximizar desempenho e justificar tecnicamente cada decisão de projeto do protótipo da Fórmula SAE, é comum empregar o sistema de suspensão de braços sobrepostos, conhecido como suspensão duplo A. Esse tipo de suspensão é composto por dois braços ligados ao chassi e ao conjunto da roda, formando duas articulações independentes que permitem controlar de forma precisa o movimento da roda em relação ao solo. Suas principais vantagens são o controle eficiente do ângulo de cambagem ao longo do curso da suspensão e elevada capacidade de adaptação às condições da pista (MILLIKEN; MILLIKEN, 1995). Em veículos de alta performance, como é o caso da Fórmula SAE, essa flexibilidade de ajuste é essencial para elevar tanto a competitividade quanto a avaliação técnica do projeto.

As variáveis geométricas da suspensão exercem papel essencial na forma como os pneus interagem com a pista. Em um projeto de Fórmula SAE, três parâmetros são particularmente relevantes: cambagem, cáster e convergência. A cambagem consiste no ângulo de inclinação da roda em relação à vertical quando observada de frente. O cáster corresponde ao ângulo de inclinação do pino mestre no plano longitudinal. Já a convergência representa o ângulo das rodas em relação ao eixo longitudinal do veículo quando visto de cima. A definição adequada desses três parâmetros é crucial para equilibrar dirigibilidade, controle e desempenho dinâmico,

permitindo que o veículo alcance o melhor compromisso entre estabilidade e capacidade de manobra dentro das exigências competitivas da Fórmula SAE.

A análise de dirigibilidade é fundamental no desenvolvimento de um veículo Fórmula SAE, pois a capacidade de resposta, estabilidade e controle do protótipo influencia diretamente seu desempenho na competição e, conseqüentemente, na segurança. Nessa competição são avaliados parâmetros como aceleração, capacidade de contorno de curvas, estabilidade em manobras e comportamento em regime transiente. De acordo com o regulamento SAE International (2024, p.125), os testes dinâmicos representam aproximadamente 67% da pontuação final, incluindo provas como: Autocross, Skidpad e Endurance. Assim, o estudo da dirigibilidade e dos fatores que a influenciam torna-se essencial para maximizar o desempenho competitivo e orientar decisões de projeto referentes à geometria da suspensão e à dinâmica veicular.

Tendo em vista essas considerações, este trabalho aborda o seguinte questionamento:

**Como analisar as influências dos parâmetros geométricos da suspensão no comportamento dinâmico e na dirigibilidade de um protótipo de Fórmula SAE?**

## **1.2 JUSTIFICAVA**

O desenvolvimento de um protótipo formula SAE envolve decisões de engenharia altamente sensíveis, especialmente no que se refere ao projeto da suspensão, cuja geometria influencia diretamente parâmetros fundamentais da dinâmica veicular, como estabilidade, transferência de carga, capacidade de contorno de curvas, aderência dos pneus e resposta ao comando do piloto.

Em equipes iniciantes, como a Equipe Fórmula Escola de Minas UFOP (FEMU), diversas dificuldades se tornam evidentes durante o processo de concepção do primeiro veículo, especialmente devido ao custo elevado de fabricação dos componentes projetados em software e à complexidade de usinagem e montagem de estruturas automotivas. Assim, a otimização de recursos e o controle rigoroso de gastos tornam-se fatores determinantes para viabilizar o desenvolvimento do veículo e garantir competitividade em eventos nacionais.

De acordo com Gillespie (1992), pequenas alterações geométricas na suspensão podem produzir efeitos significativos no comportamento dinâmico do veículo, exigindo uma análise criteriosa durante as fases de projeto detalhado. Além disso, conforme indicado por Torres (2011), o desenvolvimento baseado exclusivamente em prototipagem física, sem suporte robusto de fundamentação teórica e análise numérica, tende a elevar custos, aumentar o número de iterações experimentais e ocasionar retrabalhos decorrentes de escolhas de projeto inadequadas. Dessa forma, estudos aprofundados sobre as alternativas de geometria de suspensão representam uma ferramenta essencial para orientar decisões técnicas, permitindo otimizar resultados com menor dispêndio de recursos.

Nesse contexto, este trabalho se justifica pela necessidade de fornecer suporte científico e metodológico ao processo de definição da geometria de suspensão dianteira do protótipo da equipe FEMU, de modo a embasar escolhas de engenharia com maior precisão, reduzir tentativas experimentais desnecessárias, aumentar a eficiência estrutural e dinâmica do veículo e contribuir para o desenvolvimento de projetos futuros. Com isso, espera-se elevar o potencial competitivo da equipe, ao mesmo tempo em que se aprimora sua capacidade de realizar projetos de engenharia mais consistentes, eficientes e alinhados às exigências de desempenho da Fórmula SAE Brasil.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 GERAL**

Analisar os efeitos que os ângulos de *camber*, *caster* e convergência, sobre na dirigibilidade de um protótipo de Fórmula SAE, visando à definição de uma geometria de suspensão eficiente, estável e segura para as condições de operação do veículo.

### **1.3.2 ESPECÍFICOS**

- Realizar uma revisão sistemática da literatura técnica e científica acerca dos efeitos dos ângulos de *caster*, *camber* e convergência na dinâmica veicular, com foco em aplicações como o Fórmula SAE;
- Comparar os principais indicadores de desempenho presentes na literatura, utilizados para quantificar a deformação e a absorção de energia, para identificar o peso relativo das variáveis geométricas sobre o comportamento dinâmico do protótipo;

- Sintetizar as contribuições mais relevantes dos estudos revisados, destacando aplicações práticas e propondo recomendações para o aprimoramento de projetos de suspensão de Fórmula SAE;
- Propor uma geometria otimizada da suspensão dianteira, com base nas correlações observadas, visando o equilíbrio entre estabilidade, agilidade e controle direcional do protótipo de Fórmula SAE e com elementos já existentes do projeto da Equipe FEMU;

#### **1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO**

O trabalho está dividido em cinco capítulos, onde no primeiro capítulo é apresentado a formulação da pergunta problema, a justificativa para o desenvolvimento do trabalho e os objetivos gerais e específicos do mesmo.

O segundo capítulo trata de uma revisão da fundamentação teórica acerca do arranjo de suspensão duplo A e seus principais parâmetros geométricos, conceitos aplicados na prototipagem de uma suspensão de Fórmula SAE e uma síntese sobre ensaios realizados durante a elaboração de um protótipo de FSAE e os indicadores de performance resultante dos mesmos.

O terceiro capítulo mostra a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho, apresentando uma pesquisa descritiva e comparativa de vários sistemas de suspensão, os métodos e procedimentos utilizados para a pesquisa, as variáveis e indicadores do trabalho e o processo de coleta e de organização dos dados.

O quarto capítulo aborda os resultados apresentados, mapeando e classificando os estudos selecionados, avaliando a escolha dos ensaios utilizados em cada um, analisando o impacto de cada ângulo nos indicadores de performance na dirigibilidade do veículo, e por fim, correlacionar os resultados encontrados com a geometria de diversas equipes renomadas de FSAE.

O quinto capítulo apresenta a conclusão do trabalho e a recomendação de três linhas de pesquisa possíveis após o término desta pesquisa.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 HISTÓRICO DAS SUSPENSÕES AUTOMOTIVAS**

A evolução dos sistemas de suspensão automotiva acompanha diretamente os avanços da engenharia em busca de maior conforto, estabilidade e desempenho. Segundo Gillespie (1992), os projetos de suspensão podem ser classificados em dois grandes grupos: eixos rígidos e suspensões independentes. A transição entre esses grupos representou um marco significativo na engenharia automotiva, com cada sistema apresentando características específicas que influenciam diretamente no comportamento do veículo.

#### **2.1.1 EIXOS RÍGIDOS**

Os eixos rígidos foram uma das primeiras e mais duráveis soluções, caracterizando-se pela conexão sólida que mantém as rodas de um mesmo eixo sempre paralelas e com uma relação de *camber* fixa entre si. Como destacam Reimpell e Stoll (1996), sua ampla adoção nos primórdios da indústria deveu-se principalmente à robustez, simplicidade construtiva e capacidade de suportar altas cargas. No entanto, o principal contraponto, conforme apontado por diversos autores, é a transferência de irregularidades do solo de uma roda para a outra e a elevada massa não suspensa, que afeta a aderência e o conforto.

#### **2.1.2 SUSPENSÃO INDEPENDENTE**

A suspensão independente, conforme definido por Reimpell e Stoll (1996), permite o movimento vertical independente de cada roda de um mesmo eixo. Este princípio, como ressalta Gillespie (1992), revolucionou as suspensões ao reduzir drasticamente a massa não suspensa, isolar as irregularidades do solo (melhorando o conforto) e manter uma melhor aderência do pneu ao pavimento, especialmente em superfícies irregulares. Isso abriu caminho para uma diversidade de sistemas com níveis variados de complexidade e desempenho.

### **2.2 SUSPENSÃO DUPLO A**

O sistema de suspensão independente do tipo Duplo A, também conhecido como *Double Wishbone* ou suspensão de braços triangulares, constitui uma solução de projeto amplamente adotada em aplicações onde o desempenho dinâmico é prioritário. Sua arquitetura, composta por dois braços de controle triangulares posicionados nos planos superior e inferior conectando

o chassi à manga de eixo, proporciona um alto nível de controle sobre a geometria da roda durante o curso da suspensão (Gillespie, 1992).

O princípio fundamental que rege a superioridade do sistema Duplo A reside no seu controle cinemático independente e tridimensional sobre os ângulos de cambagem, caster e convergência da roda. A configuração típica denominada "*Short-Long Arm*" (SLA), na qual os braços superior e inferior possuem comprimentos distintos e são dispostos de forma convergente, é projetada para induzir um ganho de cambagem negativo proporcional ao deslocamento vertical da roda durante a rolagem do veículo (Reimpell & Stoll, 1996). Este comportamento é crucial para maximizar a área de contato do pneu com a pista em curvas, otimizando assim a geração de força lateral (MILLIKEN & MILLIKEN, 1995).

Embora suas desvantagens, como maior custo, complexidade e demandas de espaço, sejam amplamente reconhecidas, elas são tipicamente consideradas compromissos aceitáveis no contexto da engenharia de competição e de veículos esportivos de elite, como demonstrado no carro de Fórmula 1 na figura 1, categoria considerada o ápice da engenharia veicular por diversos autores.

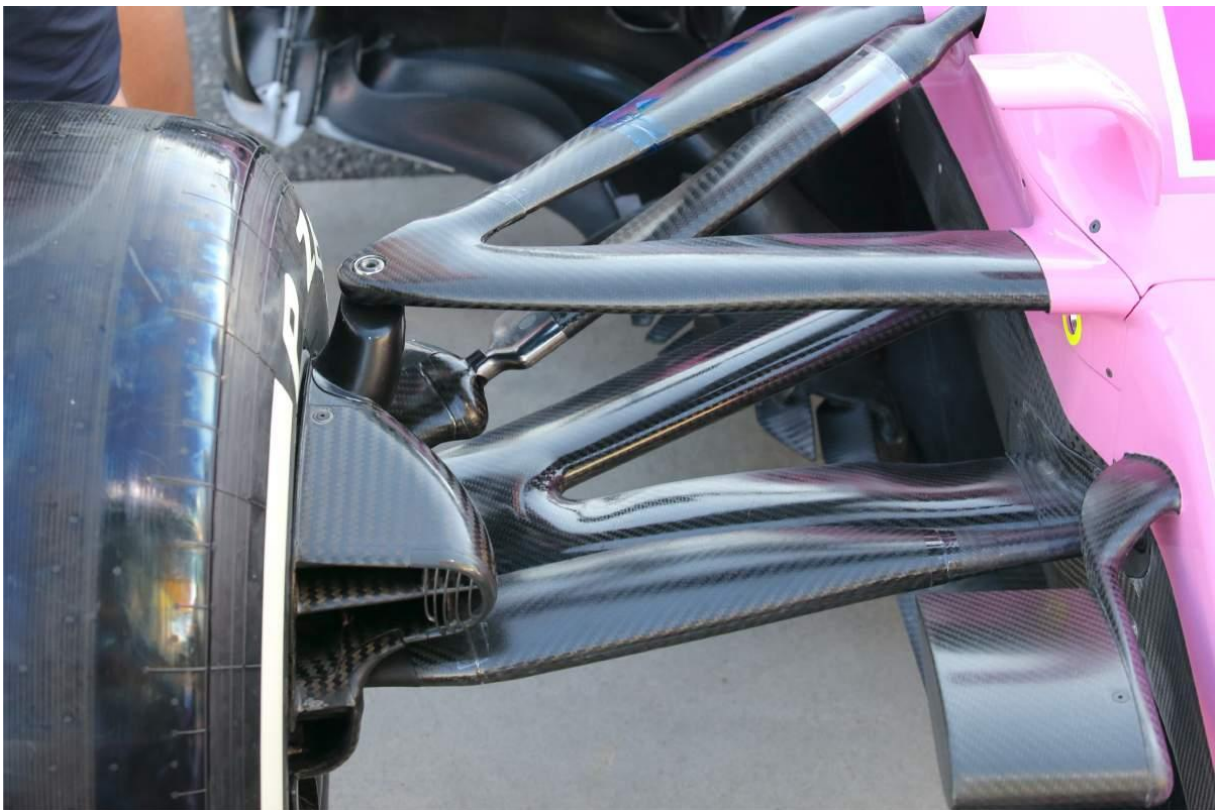


Figura 1: Suspensão Duplo A.

Fonte: <<https://www.racecar-engineering.com/tech-explained/racecar-suspension/>>.

### 2.3 A SUSPENSÃO DE UM FÓRMULA SAE

O projeto de suspensão para veículos Fórmula SAE constitui um desafio de engenharia complexo que exige a integração harmoniosa de múltiplos parâmetros dinâmicos e restrições regulamentares. Conforme estabelecido por Milliken & Milliken (1995), o sistema suspensivo deve simultaneamente garantir desempenho dinâmico, confiabilidade estrutural em condições extremas e eficiente aproveitamento espacial, atendendo rigorosamente às especificações do regulamento SAE (2018).

A suspensão em competições estudantis deve ser concebida como um sistema mecatrônico completo, onde componentes mecânicos, sistemas sensoriais e estratégias de controle atuam de forma coordenada. Gillespie (1992) identifica como funções primordiais a manutenção do contato contínuo dos pneus com a superfície, a eficiente dissipação de energia proveniente de irregularidades do terreno, a garantia de estabilidade direcional e a capacidade de ajustes precisos para diferentes configurações de pista. Dados coletados das equipes finalistas do FSAE Michigan entre 2015 e 2019 demonstram que a otimização da suspensão pode contribuir com até 27% da melhoria nos tempos de volta, superando inclusive os ganhos obtidos com refinamentos aerodinâmicos em circuitos de características técnicas.

A arquitetura Duplo A é a solução predominante nos projetos FSAE de alto rendimento, conforme atestam 78 relatórios técnicos de equipes finalistas analisados. Dixon (2007) destaca como vantagens decisivas desta configuração o controle independente da curvatura durante os movimentos de compressão, a possibilidade de ajuste preciso do centro instantâneo de rotação e o isolamento seletivo entre forças longitudinais e laterais. O projeto adequado desta configuração exige cuidadosa consideração da geometria dos elementos da suspensão, da relação de movimento além da necessária compatibilidade com sistemas push-rod ou pull-rod. A figura 2 abaixo apresenta a suspensão traseira de um Fórmula SAE durante testes de pista.



Figura 2: Suspensão de um FSAE.

Fonte: <<https://ufmgformula.wixsite.com/formulaufmg/single-post/2016/07/05/saiba-mais-sobre-a-suspensao-de-um-formula>>.

## 2.4 REGULAMENTAÇÃO DO SISTEMA DE SUSPENSÃO

O projeto do sistema de suspensão em um veículo Fórmula SAE está sujeito a um conjunto específico de regulamentações estabelecidas pela SAE International (2018), que visam garantir a segurança, equidade e características básicas de desempenho entre os competidores. Estas normas abrangem desde aspectos geométricos fundamentais até requisitos estruturais específicos para os componentes da suspensão.

### 2.4.1 REQUISITOS DE FUNCIONAMENTO

Conforme a seção V.3.1.1, o veículo deve obrigatoriamente incorporar um sistema de suspensão completo e operacional, dotado de amortecedores nas extremidades dianteira e traseira. A edição 2025 mantém a exigência de curso mínimo útil de 50 mm para as rodas, medido com o piloto devidamente posicionado no cockpit, porém agora especifica que essa medição deve ser realizada sob carga estática equivalente à massa total do veículo em condições de competição. A SAE International (2025) reforça que sistemas que não demonstrem capacidade de absorção efetiva de irregularidades ou que comprometam a estabilidade em circuitos de autocross serão sumariamente desqualificados (V.3.1.2), indicando maior rigor na avaliação dinâmica durante a inspeção técnica.

## 2.5 GEOMETRIA E DISPOSIÇÃO DAS RODAS

Conforme os artigos V 1.1, 1.2 e 1.3 do regulamento técnico (SAE International, 2025), o veículo deve apresentar configuração de quatro rodas não alinhadas, com as rodas permanentemente descobertas quando vistas de cima e dos lados. É estabelecida uma zona livre obrigatória (keep out zone) de 75mm em todas as direções a partir do diâmetro externo das rodas, onde nenhum componente do veículo pode se projetar, exceto os próprios elementos da suspensão em seu movimento normal. A figura 3 mostra na vista lateral do carro e na vista superior dos pneus a keep out zone e as superfícies do carro que devem estar descobertas.

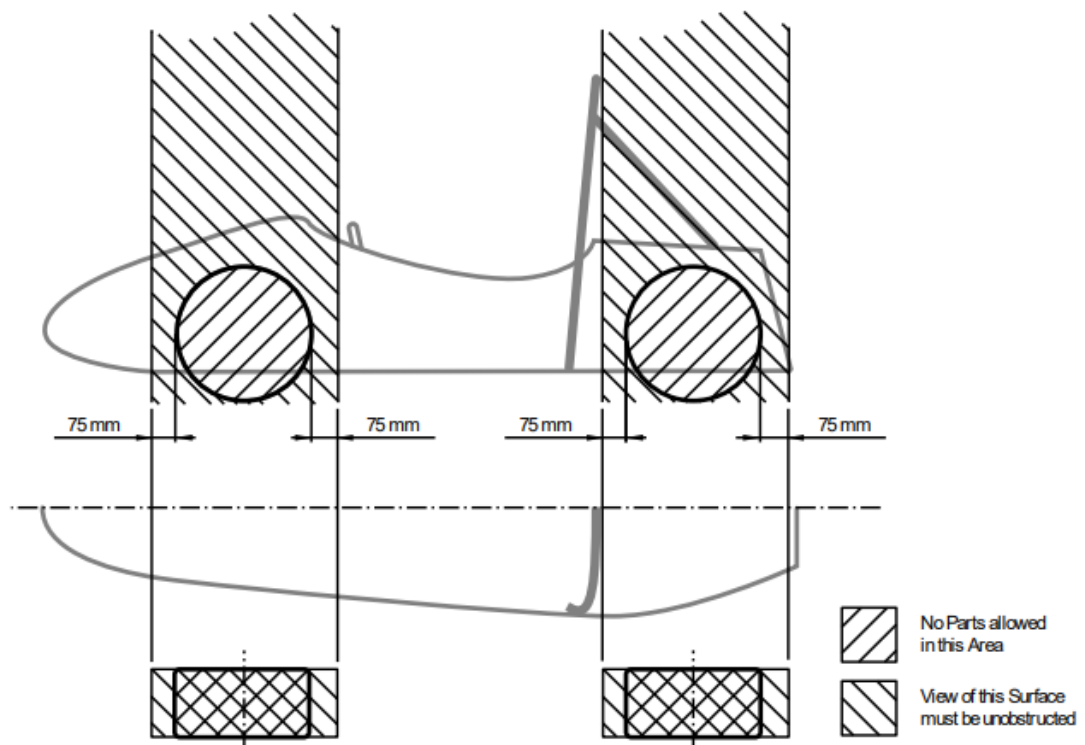


Figura 3: Keep out zone e superfícies que devem ser visíveis.

Fonte: SAE INTERNATIONAL.

## 2.6 PARÂMETROS PARA O ESTUDO DA SUSPENSÃO

De acordo com Gillespie (1992), a geometria da suspensão refere-se ao arranjo espacial e movimento relativo dos componentes da suspensão, como braços de controle, montantes e articulações, estes que determinam como a roda se move em resposta aos movimentos e cargas do chassi. Carrol Smith (1978) descreve como os principais elementos da geometria de suspensão: O ângulo de *camber*, ângulo de *caster*, ângulo de convergência, *Roll Center*, ângulo de *Kingpin* e a geometria de *Ackermann*. Neste trabalho, iremos aprofundar somente nos 3 primeiros parâmetros.

### 2.6.1 ÂNGULO DE CAMBER

Segundo Milliken & Milliken (1995), o *camber* é o ângulo de inclinação vertical entre a roda e o solo, e sua otimização é crítica para maximizar a aderência em curvas. Também é confirmado que o *camber* negativo melhora o contato do pneu durante curvas, pois compensa a deformação da carroceria e a rolagem da suspensão. Porém quando utilizado em valores excessivos, a vida útil dos pneus em retas é reduzida devido ao contato parcial dos mesmos (Carrol Smith, 1978 p. 52). Já sua aplicação nos protótipos de Fórmula SAE varia entre  $-2^\circ$  e  $-4^\circ$ , valores que dependem da rigidez da suspensão segundo Gillespie (1992 p. 203). A figura 4 apresenta na vista frontal o ângulo de *camber* em 3 situações, positivo, negativo e neutro respectivamente (MOHAMMAD, 2010).

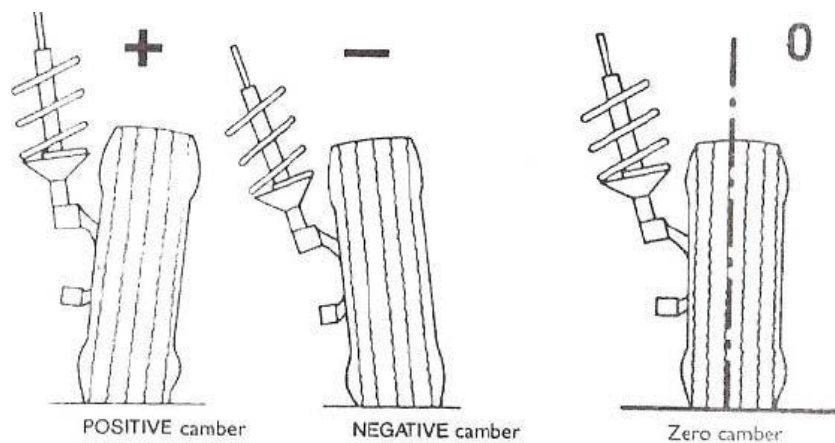


Figura 4: Variação dos ângulos de camber.

Fonte: MOHAMMAD, 2010.

### 2.6.2 ÂNGULO DE CASTER

De acordo com MILLIKEN, MILLIKEN (1995), O ângulo de *caster* é a inclinação da manga de eixo de direção em relação à vertical, na vista lateral da roda. Sua principal função é promover o auto alinhamento das rodas e aumentar a estabilidade em retas. O *caster* positivo gera um momento de auto alinhamento devido ao atraso da área de contato do pneu em relação ao eixo de direção, isso cria um torque restaurador proporcional à força lateral do pneu (*Race Car Vehicle Dynamics*, p. 142). Valores elevados de *caster* aumentam a estabilidade em alta velocidade, mas exigem maior esforço no volante (GILLESPIE, 1992). No contexto de Fórmula SAE, o *caster* deve ser ajustado para equilibrar a resposta rápida em baixas velocidades sem comprometer o esforço do piloto (SMITH, 1998), com valores entre  $4^\circ$  e  $6^\circ$ . A figura 5 demonstra na vista lateral um carro com seu ângulo de *caster* variando (MATILDE, 2019).

# Caster

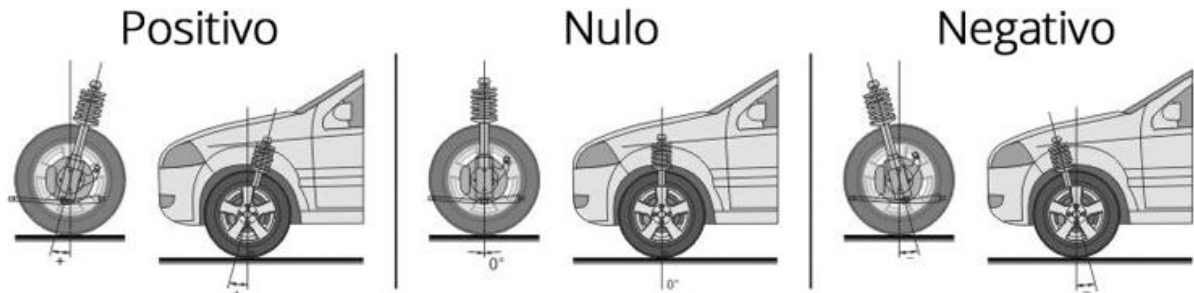


Figura 5: Manga de eixo com caster positivo.

Fonte: MATILDE, 2019.

## 2.6.3 ÂNGULO DE CONVERGÊNCIA

A convergência (*Toe*) refere-se ao alinhamento das rodas no plano horizontal, podendo ser *toe-in* com ângulos positivos e *toe-out* com ângulos negativos como descrito por Milliken & Milliken (1995). Gillespie (1992) afirma que as duas situações de convergência possuem grandes benefícios, o *toe-in* aumenta a estabilidade em reta em detrimento da resposta inicial em curvas. Já o *toe-out*, na dianteira especificamente, melhora a viragem inicial, sendo comum em circuitos mais sinuosos. Em protótipos, ambas as configurações são utilizadas, com a dianteira variando de  $-0.1^\circ$  a  $-0.3^\circ$ , e a traseira com valores entre  $0.2^\circ$  a  $0.4^\circ$ . A figura 6 apresenta na vista superior as configurações de convergência possíveis (RÚBIO, 2017).

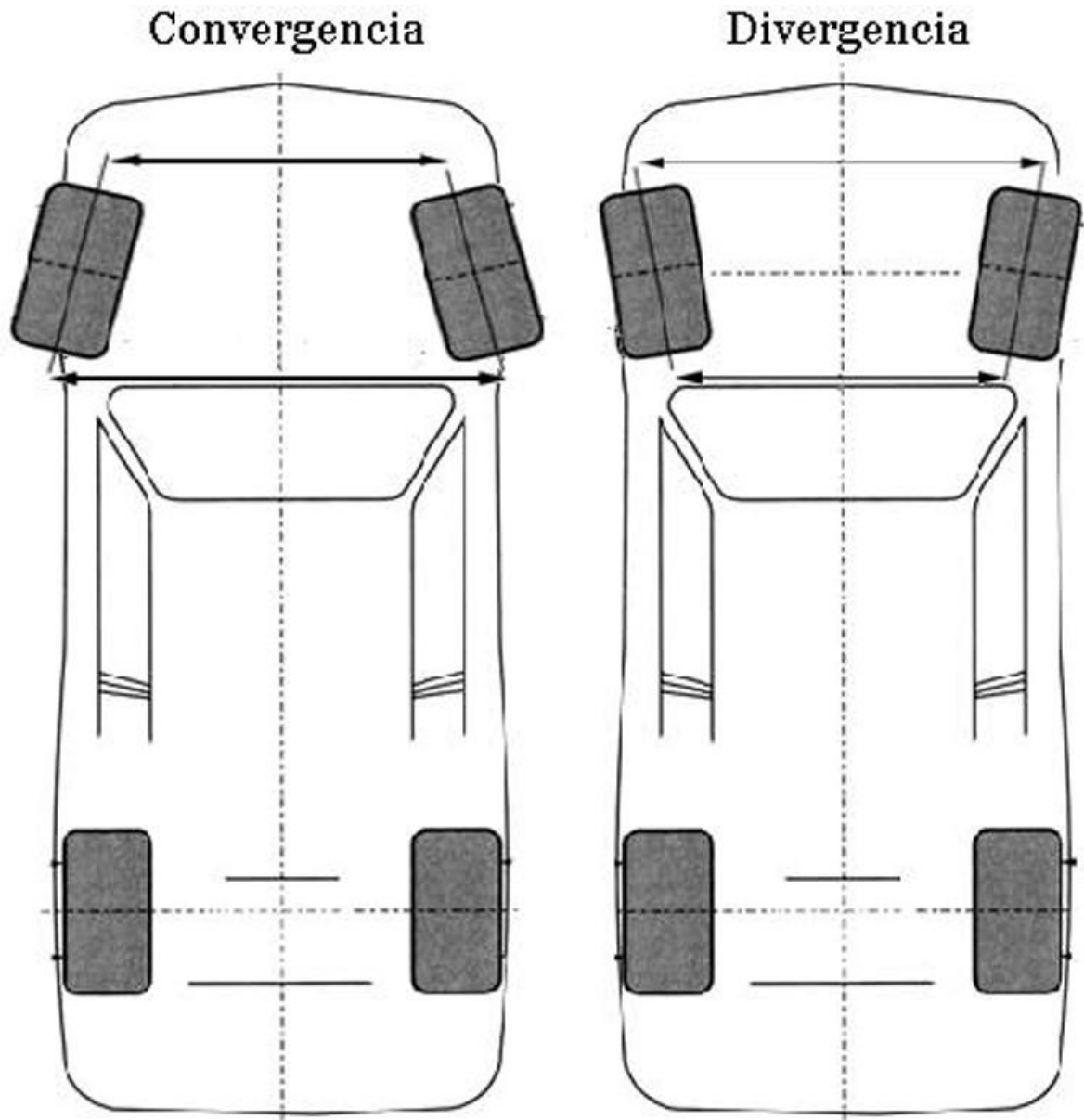


Figura 6: Variação dos ângulos de convergência.

Fonte: RÚBIO, 2017.

#### 2.6.4 EFEITOS DA GEOMETRIA

O ângulo de camber ( $\gamma$ ) exerce influência direta na aderência lateral e no desgaste assimétrico dos pneus. A força lateral gerada pelo camber, parâmetro que gera um aumento negativo no camber e conseqüentemente, aumentando a força lateral em curvas (PACEJKA, 2012) pode ser expressa conforme a equação 1.

$$F_{\gamma} = C_{\gamma} \cdot \gamma \quad (1)$$

Onde  $C_\gamma$  representa o coeficiente de força por camber em N/grau. Conforme demonstrado por Pacejka (2012), valores típicos para pneus de competição variam entre 50-100 N/grau.

O momento de autoalinhamento resultante do camber é um fator impactante para reduzir o torque no volante durante curvas e conseqüentemente, facilitando a dirigibilidade do veículo de acordo com Gillespie (1992), sendo calculado de acordo com a equação 2.

$$M_{z,\gamma} = CM_\gamma \cdot \gamma \cdot F_z \quad (2)$$

Sendo  $CM_\gamma$  o coeficiente de momento por camber e  $F_z$  a carga vertical no pneu.

O ângulo de caster ( $\theta$ ) possui papel fundamental na estabilidade em reta e no retorno do volante. O trail mecânico, parâmetro que afeta o autoalinhamento do volante em altas velocidades, acaba sendo utilizado como forma de avaliação de performance em retas e em curvas de alta velocidade (DIXON, 1996), e seu cálculo é feito conforme a equação 3.

$$T_m = r \cdot \tan\theta \quad (3)$$

Onde  $r$  é o raio da roda, determina em grande parte a estabilidade direcional. Dixon (1996) relata que valores típicos de caster entre  $6^\circ$  e  $8^\circ$  proporcionam um bom equilíbrio entre estabilidade e esforço no volante.

A convergência das rodas ( $\delta$ ) influencia significativamente a resposta direcional e o desgaste dos pneus. A força lateral gerada pela convergência é o parametro principal calculado para ajustar a resposta direcional do veículo e é calculada conforme a equação 4.

$$F_{y,\delta} = 2C_\alpha\delta \quad (4)$$

Onde  $C_\alpha$  é o coeficiente de deriva do pneu. Pacejka (2012) observa que pequenos valores de toe-out na ordem de  $0,25^\circ$  podem reduzir o substerço em até 15%.

## 2.7 CONDIÇÕES DE TESTES

A caracterização do comportamento dinâmico de um veículo, particularmente no âmbito de competições como a FSAE, requer uma abordagem metodológica que junte ferramentas de simulação e ensaios experimentais (Genta & Morello, 2009). Essa abordagem é fundamental para compreender a resposta do sistema de suspensão sob diversas condições operacionais, otimizando o desempenho através de parâmetros de projeto definidos. As principais condições são:

- **SIMULAÇÃO MULTICORPO (MBD)**, que se baseia na definição de corpos rígidos ou flexíveis, como braços de suspensão, chassi e roda interconectados por articulações, elementos de elasticidade e forças específicas, como as geradas pelos amortecedores e pneus. Utilizando softwares especializados, como Adams/Car ou Simpack, permite a integração direta de modelos CAD, definição precisa dos pontos de fixação geométricos, e a aplicação de malhas de rigidez para representar a flexibilidade de componentes-chave. Os parâmetros típicos deste ensaio são definidos para explorar o comportamento dinâmico do veículo;
- **SIMULAÇÃO CINEMÁTICA E DE COMPLIANCE (K&C)**, que foca especificamente nas propriedades geométricas da suspensão e na influência das flexibilidades dos seus componentes. É uma análise mais específica que a MBD, frequentemente utilizada como sua sub-rotina ou etapa preliminar. Ferramentas como o módulo Adams View ou softwares dedicados como o OptimumK são empregados para modelar as articulações (juntas esféricas, rótulas) e elementos como buchas elastoméricas. A análise principal envolve a movimentação da roda em relação ao chassi, rastreando sua trajetória e orientação. Os parâmetros investigados são puramente geométricos e de deslocamento relativos;
- **SIMULAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS**, que visa garantir a integridade e a rigidez dos componentes individuais sob carga. Utilizando softwares como ANSYS ou Abaqus, os braços, tirantes e pontos de fixação do chassi são discretizados em uma malha de elementos finitos, geralmente tetraédricos ou hexaédricos, podendo ser modelados como elementos de casca ou sólido. As propriedades mecânicas dos materiais são atribuídas e os carregamentos são aplicados de forma conservadora, simulando as forças transmitidas pelos pneus ou pelos pontos de conexão com o chassi. Os parâmetros de ensaio nesta simulação são as próprias condições de carregamento e os critérios de falha;
- **ENSAIOS EM PISTA E HÍBRIDOS**, que constituem a validação final e mais realista do comportamento do veículo. Eles são realizados em circuitos ou áreas delimitadas que replicam as manobras das competições, instrumentando o veículo para capturar dados em tempo real. A instrumentação é extensa e inclui: Unidades de Medida Inercial (IMU) para acelerações e velocidades angulares; GPS para posição e velocidade; potenciômetros lineares ou sensores de posição magnéticos para medir o curso das suspensões; células de carga no volante e nas barras de direção; e, em casos avançados, pneus instrumentados com sensores de pressão e temperatura. Já a abordagem híbrida

envolve a execução sincronizada de ensaios em pista e a simulação das mesmas manobras no modelo MBD. Os dados experimentais, como as trajetórias do centro de massa, os ângulos de esterçamento e as cargas verticais nas rodas, são usados como entradas ou pontos de comparação para o modelo;

- **ENSAIOS ESTRUTURAIS**, que avaliam a performance física e mecânica de componentes ou subconjuntos isolados, como um braço de suspensão ou um conjunto montado com seu cubo de roda. São conduzidos em ambientes controlados utilizando máquinas de ensaio universal (Instron, MTS) equipadas com células de carga de alta precisão. Técnicas de medição de deformação, como extensômetros elétricos ou Correlação Digital de Imagens (DIC), são empregadas para mapear campos de tensão e deformação na peça.

## **2.8 INDICADORES RESULTANTES DOS TESTES**

A execução integrada de simulações e ensaios experimentais gera um vasto conjunto de indicadores de performance quantitativos. Estes indicadores funcionam como a linguagem objetiva através da qual o comportamento dinâmico e estrutural do veículo é compreendido, avaliado e otimizado. Eles não apenas descrevem o estado ou a resposta do sistema, mas também estabelecem as relações causais entre as escolhas de projeto e o desempenho final, permitindo uma engenharia guiada por dados. Segundo Gillespie (1992), a análise criteriosa dessas métricas é o que transforma dados brutos em informações decisivas para o refinamento do projeto.

### **2.8.1 GRADIENTE DE SUBESTERÇAMENTO**

O gradiente de subesterçamento é um parâmetro fundamental que quantifica a tendência de balanço dinâmico de um veículo em curvas em regime permanente. Ele é definido como a taxa de variação da diferença entre os ângulos de esterçamento das rodas dianteiras e traseiras ou do ângulo de esterçamento de Ackermann em relação à aceleração lateral (GILLESPIE, 1992).

Um valor positivo indica um veículo subesterçante, que requer aumento do ângulo de esterçamento para manter o raio da curva à medida que a velocidade cresce, caracterizando um comportamento geralmente mais estável e previsível. Um valor negativo identifica um veículo sobreesterçante, onde o raio da curva diminui com o aumento da velocidade, ou de forma mais simples, o carro perde aderência nos pneus traseiros antes dos dianteiros (“saindo de traseira”),

conferindo agilidade, porém demandando maior correção do piloto. Este indicador permite prever a estabilidade direcional do veículo em diferentes níveis de aderência e é crucial para definir a distribuição de rigidez de cambagem entre os eixos.

### **2.8.2 ACELERAÇÃO LATERAL MÁXIMA**

A aceleração lateral máxima é uma medida direta do limite de desempenho de um veículo em curva, expressa em múltiplos da aceleração da gravidade. Ela quantifica a capacidade máxima do conjunto pneu-suspensão-chassi em gerar força centrípeta antes da perda de aderência (MILLIKEN & MILLIKEN, 1995).

Este indicador é o resultado da interação de diversos fatores, incluindo a geometria da suspensão, a rigidez do chassi, os coeficientes de atrito dos pneus e a distribuição de massa. Ele ajuda a prever o desempenho do veículo em manobras de curva constante, como no skidpad, e serve como referência para avaliar o impacto de modificações no projeto ou no *setup*. A busca pelo aumento da aceleração lateral máxima é um objetivo central no desenvolvimento de veículos de competição.

### **2.8.3 CAMBER DINÂMICO**

Este indicador descreve a mudança do ângulo de camber da roda em relação à vertical, ocorrida durante a rolagem do chassi ou o curso vertical da suspensão. A variação de camber dinâmico é composta pela contribuição puramente cinemática do movimento dos braços e pela contribuição elástica ou de compliance da flexão de componentes e buchas (DIXON, 1996).

Ela quantifica a eficácia da suspensão em manter a superfície de contato do pneu o mais plana possível em relação ao solo durante uma curva. Um "ganho de camber" negativo adequado (onde a roda inclina-se para a parte interna da curva durante a rolagem) é vital para compensar a deformação do pneu e maximizar a área de contato. Este indicador permite prever o desgaste irregular dos pneus e a perda progressiva de aderência em curvas sustentadas.

### **2.8.4 RIGIDEZ DE CAMBAGEM (ROLL STIFFNESS)**

A rigidez de cambagem refere-se à resistência oposta pelo conjunto da suspensão à rolagem do chassi quando submetido a uma força centrífuga. É comumente expressa como o momento necessário para produzir um grau de rolagem (Nm/deg). Este indicador quantifica a firmeza da suspensão contra o movimento de rolagem e é uma função da geometria, da rigidez

das molas, das barras estabilizadoras e da elasticidade dos pickups (REIMPELL, STOLL, & BETZLER, 2001).

A distribuição da rigidez de cambagem entre os eixos dianteiro e traseiro é um parâmetro primordial para ajustar o balanço dinâmico do veículo para sub ou sobresterçante. Ela permite prever a quantidade de transferência de carga lateral que ocorre de forma elástica, via compressão das molas versus a transferência geométrica.

### **2.8.5 BUMP STEER**

Bump steer é um indicador cinemático que quantifica a variação indesejada do ângulo de convergência de uma roda à medida que esta percorre seu curso vertical (bump e rebound) independentemente do comando de direção. É expresso como a taxa de variação do toe em função do deslocamento vertical. A presença de bump steer significativo compromete a estabilidade direcional, pois o veículo tende a alterar sua trajetória ao passar por irregularidades do solo ou durante acelerações e frenagens que comprimem a suspensão (BLUNDELL & HARTY, 2015).

Este indicador ajuda a prever o comportamento do veículo em retas onduladas e sua sensibilidade a mudanças de carga dinâmica. O objetivo do projeto é minimizar o bump steer dentro da faixa de curso operacional da suspensão.

### **2.8.6 RIGIDEZ NOS PONTOS DE FIXAÇÃO**

Este indicador mede a resistência à deflexão de um ponto específico do chassi ou de um componente da suspensão onde forças são aplicadas, como os pickups dos braços. É geralmente expresso como a relação força/deslocamento em uma direção.

A rigidez local do ponto de fixação quantifica a contribuição da estrutura para a compliance total do sistema. Uma rigidez insuficiente pode resultar em deslocamentos elásticos significativos que distorcem a geometria cinemática pretendida da suspensão sob carga, afetando negativamente indicadores como o camber gain e o bump steer (HAPPIAN-SMITH, 2001). Medir e aumentar esta rigidez, quando necessário, permite prever e assegurar que o comportamento dinâmico real se aproxime do modelo cinemático idealizado.

### **2.8.7 TEMPO DE RESPOSTA**

Este é um indicador dinâmico transiente, normalmente medido durante um ensaio de step steer. Ele quantifica o intervalo de tempo entre a aplicação de um comando de direção e o momento em que o veículo atinge uma porcentagem específica de sua resposta em regime permanente em aceleração lateral ou velocidade angular de guinada (PACEJKA, 2012).

Um tempo de resposta mais curto está associado a um veículo ágil e com feedback direto, enquanto um tempo mais longo pode indicar um comportamento "mole" ou excessivamente estável. Este indicador ajuda a prever a sensação de controle e a capacidade do piloto de realizar correções rápidas e precisas, sendo crucial para o desempenho em traçados técnicos com curvas sucessivas.

### **2.8.8 EFICIÊNCIA DE CONTORNO DE CURVA**

A eficiência de contorno de curva é um indicador de desempenho integrado que relaciona a velocidade média mantida em um determinado traçado com a aceleração lateral máxima potencial do veículo. Ela sintetiza a efetividade dos sistemas de direção, suspensão, pneus e chassis em trabalhar harmonicamente para permitir que o piloto explore o limite de aderência de forma consistente e previsível.

Um veículo com alta aceleração lateral máxima, mas com baixa eficiência de contorno, pode ser difícil de conduzir no limite, resultando em tempos de volta lentos. Este indicador, frequentemente derivado da análise de dados de telemetria em circuitos como o autocross, ajuda a prever o desempenho competitivo global e valida o sucesso da integração entre o projeto do veículo e a capacidade do piloto.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Segundo Gil (2002, p. 17), a pesquisa pode ser definida como “o procedimento racional e sistemático que tem como objetivo proporcionar respostas aos problemas que são propostos”. O autor destaca que a pesquisa se torna necessária quando as informações relevantes estão ausentes, escassas ou organizadas de forma que dificultam a compreensão e a relação direta com o problema em estudo.

A classificação da pesquisa está diretamente vinculada aos objetivos definidos pelo pesquisador. De acordo com GIL (2002), existem três categorias principais: a pesquisa exploratória, que visa proporcionar maior familiaridade com o tema, permitindo o aprimoramento de ideias e a formulação de hipóteses; a pesquisa descritiva, cujo objetivo é descrever as características de determinado fenômeno, evento, população ou processo; e a pesquisa explicativa, que busca identificar as causas dos fenômenos observados e compreender suas relações de dependência.

Dessa forma, este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa exploratória, uma vez que tem como finalidade compreender, de maneira aprofundada, o comportamento da dirigibilidade de veículos Fórmula SAE, bem como os efeitos provocados por alterações na geometria da suspensão aplicadas a esse sistema. Além disso, o estudo propõe recomendações de melhoria no projeto atual da suspensão, com base nos conhecimentos adquiridos.

No que diz respeito à abordagem metodológica deste trabalho, será adotado um procedimento para a coleta de informações, a priori, de natureza qualitativa, uma vez que se baseia na comparação direta de dados relacionada ao comportamento da dirigibilidade. Contudo, reconhece-se que, ao longo do desenvolvimento do trabalho, poderão surgir oportunidades para propor melhorias fundamentadas em observações qualitativas. Assim, destaca-se que a pesquisa possui uma abordagem predominantemente quantitativa, ainda que elementos qualitativos possam complementar a análise e enriquecer a interpretação dos resultados.

Neste trabalho, é empregado o procedimento metodológico de pesquisa bibliográfica. A pesquisa bibliográfica, conforme definição de Gil (2002, p. 44), fundamenta-se em “material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos”. O autor destaca ainda que, em estudos com caráter exploratório, a pesquisa bibliográfica representa uma etapa essencial,

pois possibilita o embasamento teórico necessário para a formulação de hipóteses e a compreensão aprofundada do fenômeno em análise. Essa abordagem se fundamenta no uso de fontes informativas e remissivas, que orientam a construção do referencial teórico e favorecem o aprofundamento dos conhecimentos pertinentes ao objeto de estudo, como exemplificado na Figura 7.

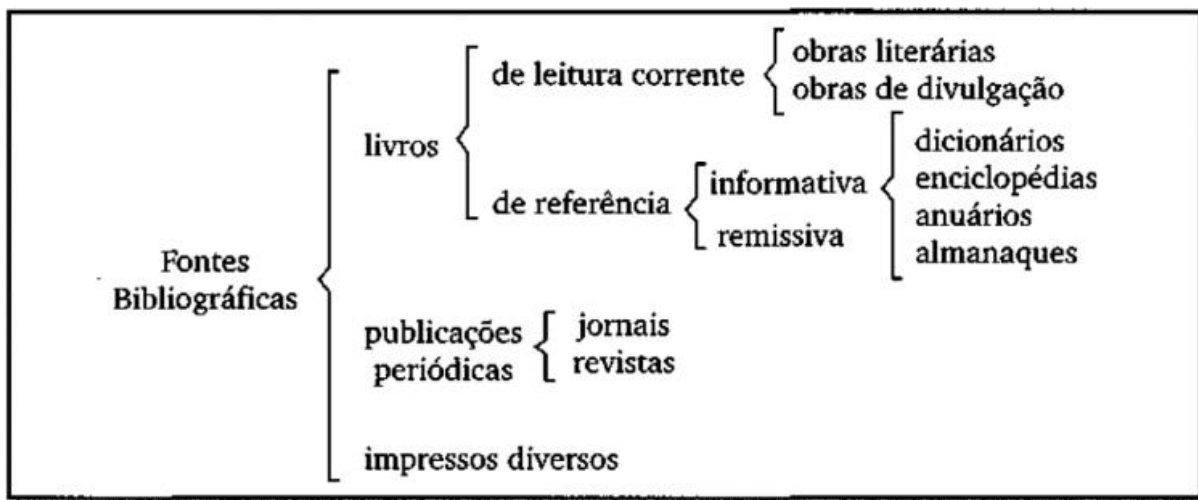


Figura 7: Classificação das fontes bibliográficas de pesquisa.

Fonte: GIL, 2002.

A aplicação deste tipo de pesquisa no presente estudo ocorre por meio da consulta a obras de referência, as quais possibilitam, conforme destaca Gil (2002, p. 44), “a rápida obtenção de informações requeridas, ou, então, a localização das obras que as contêm”.

Conforme ilustrado na Figura 7, outras fontes bibliográficas utilizadas neste trabalho foram obtidas em publicações periódicas, especialmente artigos técnicos e regulamentos emitidos pela SAE INTERNATIONAL, além de monografias e teses que tratam de temáticas relacionadas ao tema.

## 3.2 PREMISSAS DO PROJETO FORMULA SAE

### 3.2.1 DIMENSÕES GERAIS

As dimensões gerais influenciam diretamente a dinâmica do veículo. A definição de entre-eixos, bitola, altura do centro de gravidade e distribuição de massas deve ser feita com base em critérios de estabilidade, tração e dirigibilidade (GILLESPIE, 1992).

Avaliando a análise do equilíbrio estático e dinâmico (peso nas rodas em aceleração/frenagem), o raio de giro para manobras em pista, o impacto da bitola e entre-eixos na transferência lateral e longitudinal de carga (RAJAMANI, 2006), além disso, ferramentas

auxiliares como gabaritos em escala, croquis dimensionais e tabelas comparativas com projetos anteriores, podem ser utilizados.

Além disso, outro estudo importante nessa fase é a das rodas e pneus, já que os pneus são os únicos pontos de contato entre o veículo e o solo, assim, suas características moldam a resposta dinâmica do carro (SMITH, 1978). Tendo assim, que considerar o tipo de pneu (Slick ou Intermediário), diâmetro e largura compatíveis com a geometria da suspensão e peso das rodas (impacto na massa não suspensa e na resposta do sistema).

O sistema de suspensão em um veículo de Fórmula SAE cumpre funções cruciais de estabilidade, conforto dinâmico e transferência de carga entre os pneus e o solo, maximizando a aderência e a dirigibilidade. O projeto desse sistema deve começar com a definição dos objetivos de desempenho do veículo, os quais podem incluir manobrabilidade, estabilidade lateral e longitudinal, resposta rápida à entrada do volante, além da capacidade de lidar com as irregularidades da pista de forma eficiente. Sendo esta parte juntamente com o capítulo 3.2.4, o foco principal deste trabalho.

Pode-se dividir essa fase do trabalho em 3 partes principais, começando pela escolha da arquitetura da suspensão, definição dos parâmetros geométricos e por fim, integração com chassi e roda.

A arquitetura de suspensão mais amplamente utilizada em protótipos Fórmula SAE é o sistema independente de braços duplos sobrepostos do tipo *double wishbone*, com amortecedores internos e acionamento por *pushrod* ou *pullrod*. Tal escolha se dá por permitir controle preciso de parâmetros como cambagem dinâmica, *caster* e convergência, além de facilitar o posicionamento dos componentes com base nos requisitos do chassi (SMITH, 1978). Segundo MILLIKEN; MILLIKEN (1995), essa configuração oferece liberdade geométrica para otimizar o comportamento do veículo em curvas, manter o contato ideal dos pneus com o solo e minimizar a variação do ângulo de *camber* durante o curso da suspensão.

E finalmente, deve-se considerar os pontos de ancoragem no chassi, as dimensões dos pneus e rodas permitidos pelo regulamento da SAE INTERNATIONAL (SAE, 2023), e os deslocamentos máximos admissíveis sem interferência entre componentes. A integração harmônica desses fatores é essencial para garantir que o veículo não apresente comportamentos indesejados como bump steer, entre outros.

### **3.2.2 ANÁLISE DE DIRIGIBILIDADE**

Segundo MILLIKEN; MILLIKEN (1995), a dirigibilidade está diretamente relacionada ao comportamento da suspensão e à forma como está transferindo as forças do solo para o chassi. O projeto adequado da suspensão dianteira e traseira é o principal determinante do comportamento dinâmico do veículo, especialmente em curvas, frenagens e acelerações intensas. No contexto da Formula SAE, onde o desempenho dinâmico é fortemente avaliado em provas como *autocross*, *skidpad* e *endurance*, a dirigibilidade torna-se um dos pilares fundamentais do projeto veicular.

O comportamento em curvas pode ser descrito pela tendência de subesterço (*understeer*), sobreesterço (*oversteer*) ou comportamento neutro. Um veículo com comportamento subesterçante tende a sair de frente em curvas, o que é considerado mais previsível e seguro. Já um sobreesterçante gira mais do que o volante indica, o que pode proporcionar maior agilidade, mas exige maior habilidade do piloto. O equilíbrio ideal entre esses extremos deve ser determinado com base nas preferências da equipe e nas características da pista.

O desenvolvimento da dirigibilidade começa com a definição do comportamento desejado: por exemplo, um veículo levemente subesterçante com resposta rápida de direção. A partir disso, a equipe define a altura e posição dos pontos de articulação, visando controlar o ganho de *camber* e minimizar o *bump steer* (desvio da roda ao longo do curso da suspensão) e a posição dos centros de rolagem dianteiro e traseiro, evitando rolamentos excessivos que comprometam a estabilidade.

Posteriormente, para avaliar de forma empírica a dirigibilidade, podemos realizar ensaios físicos com protótipos anteriores da equipe ou chassi-mula, registrar feedback de pilotos, coletar dados com acelerômetros e sensores de volante (ex: Arduino + sensores analógicos) e comparar com benchmarks técnicos de outras equipes.

## **3.3 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **3.3.1 METODOLOGIA DE BUSCA**

As etapas iniciais do trabalho concentraram-se na realização de um levantamento bibliográfico sistemático em base de dados da web em plataformas específicas de trabalhos

acadêmicos, acessadas pelo *ScienceDirect* e *Google Scholar*, com acesso institucional disponibilizado pela UFOP (Universidade Federal de Ouro Preto).

Para evidenciar a relevância atual do estudo, foram escolhidos artigos científicos originais publicados entre os anos de 2010 e 2025, com o objetivo de contemplar e avaliar os desenvolvimentos mais recentes relacionados aos avanços de arranjos geométricos e indicadores de performance dinâmica. Com esse recorte temporal, é possível identificar as inovações tecnológicas e as justificativas para alterações geométricas.

De forma a melhorar a eficácia dos resultados da busca, utilizou-se a combinação das palavras-chave relacionadas ao tema de interesse, permitindo seleção mais criteriosa dos estudos, podendo-se assim, focar em protótipos de Fórmula SAE, além da simples utilização de 2 ou mais palavras-chave de acordo com a situação. As palavras-chave utilizadas na meta-análise foram definidas a partir de uma análise preliminar da literatura técnica abordada na revisão bibliográfica, e incluíram, em português: “duplo A”, “suspensão”, “dirigibilidade”, “geometria”, “cambagem”, “caster”, “convergencia”, “Fórmula SAE” e “carros de corrida”; e em inglês: “*double wishbone*”, “*suspension*”, “*driveability*”, “*geometry*”, “*camber*”, “*caster*”, “*toe*”, “*Formula SAE*” e “*racecar*”. Exemplos de combinações utilizadas incluem: “*double wishbone suspension Formula SAE*”, “*suspension geometry formula SAE*”, “*caster camber toe Formula SAE*”.

A busca inicial, como esperado, resultou em um volume considerável de publicações, incluindo teses e dissertações, desde que atendessem às condições de confiabilidade e qualidade da fonte, tais condições que evidenciaram a necessidade de uma etapa posterior de triagem e refinamento de fontes.

### **3.3.2 INSTRUMENTO DE SELEÇÃO E COLETA DE DADOS**

Após o levantamento inicial de dados, realizou-se uma triagem, com o objetivo de selecionar os estudos mais alinhados aos objetivos específicos desta pesquisa, assegurando a representatividade técnica dos trabalhos analisados.

Os estudos que foram considerados elegíveis, foram os que apresentassem dados quantitativos referentes aos ângulos analisados e variáveis de resposta como aceleração lateral, gradiente de subesterçamento e indicadores de desempenho em curvas. Excluindo trabalhos teóricos sem resultados numéricos, estudos relacionados à veículos de grande porte e pesquisas sem detalhamento metodológico adequado.

A coleta e organização dos estudos selecionados foi feita em uma tabela síntese, elaborada com o auxílio de planilha eletrônica (Microsoft Excel). Essa tabela contém os campos referentes às características metodológicas dos estudos, valores dos ângulos analisados, parâmetros de teste, variáveis de resposta e estatísticas necessárias para cálculo do tamanho do efeito (Effect Size).

Essa sistematização prévia é essencial para a posterior classificação dos trabalhos, que foram agrupados utilizando três eixos principais: tipo de ensaio realizado, configuração geométrica da suspensão analisada e características do veículo ou protótipo ensaiado. Com essa categorização, se forma a base da análise comparativa que será realizada neste trabalho.

### **3.3.3 PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE COMPARATIVA**

A comparação entre os trabalhos identificados foi conduzida com base em uma abordagem qualitativa estruturada, fundamentada na categorização dos estudos em três eixos principais: tipo de ensaio realizado, configuração geométrica da suspensão analisada e características do veículo ou protótipo ensaiado. Essa organização permitiu que as comparações fossem realizadas em condições metodológicas equivalentes, reduzindo vieses e assegurando maior consistência aos cruzamentos de informação obtidos na literatura.

Inicialmente, as publicações foram classificadas segundo o tipo de ensaio empregado, distinguindo estudos experimentais em pista, simulações computacionais (como análise multicorpo e dinâmica veicular), ensaios de bancada e estudos híbridos que combinaram resultados numéricos e experimentais. Essa diferenciação se mostra essencial, uma vez que cada metodologia oferece níveis distintos de detalhamento, precisão e complexidade, influenciando diretamente os valores reportados para parâmetros como aceleração lateral, gradiente de subesterçamento e resposta dinâmica em curvas.

Em seguida, os trabalhos foram agrupados de acordo com as condições geométricas avaliadas, contemplando configurações de suspensão Duplo A que exploram diferentes posições dos pivôs, ângulos iniciais de rodas (cambagem, cáster e convergência), e ajustes específicos aplicados à competição Fórmula SAE. Essa etapa permitiu examinar a influência de cada solução geométrica sobre o comportamento dinâmico do veículo, reforçando a relação entre pequenos ajustes no arranjo da suspensão e alterações significativas na dirigibilidade.

Por fim, os estudos foram categorizados segundo os protótipos avaliados, distinguindo publicações que analisaram veículos Fórmula SAE, de pesquisas que investigaram suspensões

esportivas, ou de outra categoria de veículos de competição. Esse recorte adicional possibilitou identificar quais conclusões poderiam ser transferidas diretamente para o contexto do projeto analisado e quais exigiam interpretação adaptada devido a diferenças de massa, dimensões, rigidez estrutural e condições operacionais.

Com base nos tipos de ensaio, configurações geométricas e tipos de veículo, foram montadas matrizes de comparação cruzada contendo valores de entrada e saída dos estudos, como ângulos geométricos aplicados, aceleração lateral obtida, gradiente de substerçamento, forças atuantes na suspensão, variações de camber sob deslocamento e indicadores de performance dinâmica associados. Também foram examinados os principais indicadores de avaliação utilizados na literatura, verificando-se a frequência de uso, padrões de cálculo e o grau de uniformização entre os autores. Adicionalmente, foram anotadas divergências metodológicas, como diferenças nos softwares empregados, níveis de detalhamento dos modelos, instrumentação utilizada em ensaios de pista e definição das condições de contorno.

As limitações reportadas pelos autores também foram consideradas, incluindo dificuldades de validação experimental, ausência de informações completas sobre parâmetros de entrada, uso de massas ou rigidez não representativas de um veículo Fórmula SAE e simplificações excessivas em modelos de dinâmica veicular.

Dessa forma, a análise conduzida não se restringiu à descrição dos valores numéricos encontrados, mas buscou identificar elementos técnicos recorrentes que contribuíssem para a formulação de diretrizes aplicáveis ao projeto de suspensão da equipe estudada, apoiando-se em evidências consolidadas quanto aos efeitos dos ângulos de cambagem, cáster e convergência sobre estabilidade, capacidade de contornar curvas e resposta dinâmica geral do protótipo.

A figura 8 apresenta o diagrama que desenvolve o procedimento metodológico utilizado abordado neste trabalho.

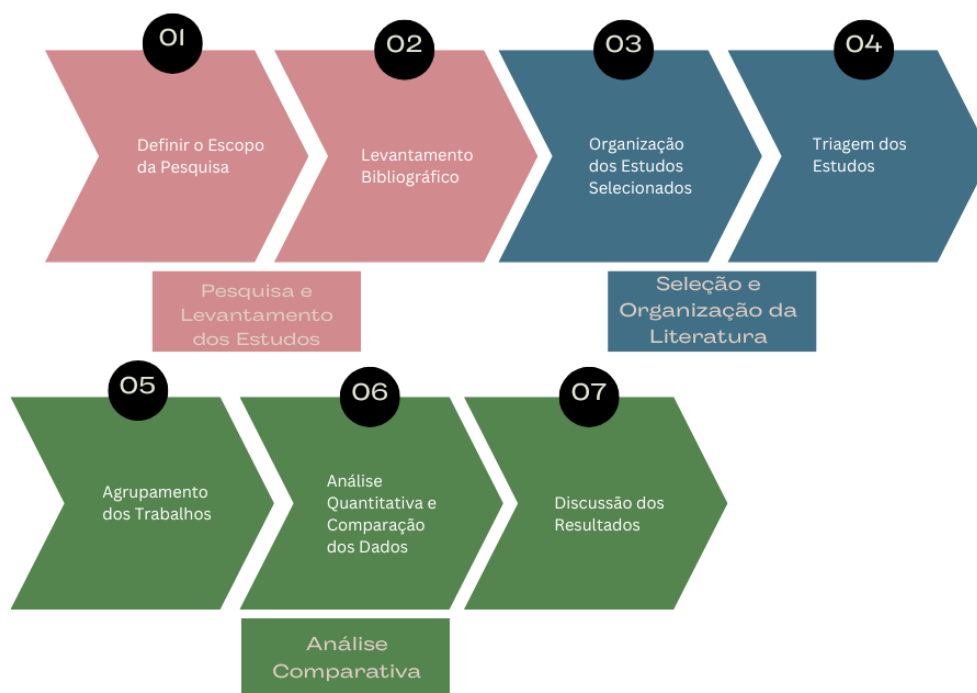


Figura 8: Fluxograma da metodologia do trabalho.

Fonte: Adaptado de CAMARÇO (2025).

### 3.4 VARIÁVEIS E INDICADORES

Segundo Marconi e Lakatos (2003), variável é um termo utilizado para definir uma quantidade que varia um conceito operacional que possui valores, aspecto, propriedade ou fator, identificável e passível de mensuração. Para Alyrio (2009), as variáveis, além sustentar a hipótese, se relacionam com tudo que pode assumir valores distintos ou aspectos diferentes, segundo as circunstâncias específicas, podendo ser dependentes ou independentes.

As variáveis independentes determinam ou afeta outra variável, podem ser manipuladas pelo pesquisador para que se possa assegurar a relação do fato observado verificando-se a influência da mesma sobre um possível resultado (MARCONI e LAKATOS, 2003). Variáveis dependentes, segundo a autora, consistem dos valores a serem explicados ou descobertos devido à manipulação causada pela variável independente, sendo o fator que aparece, desaparece, ou varia à medida que se manipula a variável independente.

Os indicadores, segundo Gil (2008), são elementos concretos que indicam valores de forma prática, sendo que somente a partir da medição desses indicadores é possível conhecer o

valor da variável. A tabela 1 apresenta de forma sucinta as variáveis e indicadores que estão presentes neste trabalho.

Tabela 1: Variáveis e Indicadores.

<b>Variáveis</b>	<b>Indicadores</b>
Geometria da Suspensão	Ângulo de camber; Ângulo de caster; Ângulo de convergência;
Categoria do Veículo	Fórmula SAE; Veículos esportivos;
Condição de Teste	Ensaio experimentais; Modelagem Computacional.

Fonte: Pesquisa Direta (2026).

## **4 RESULTADOS**

### **4.1 MAPEAMENTO DOS ESTUDOS TÉCNICOS**

Conforme previsto na metodologia de busca deste trabalho, o levantamento bibliográfico foi realizado utilizando as ferramentas de pesquisa: acessadas pelo ScienceDirect e *Google Scholar*. Essa busca resultou em uma quantia considerável de registros, embora todos esses documentos tenham sido considerados relevantes para a fundamentação teórica do trabalho, apenas uma parcela deles atendeu aos critérios de seleção estabelecidos para a análise conduzida neste capítulo.

Inicialmente, 32 estudos foram analisados para compor o conjunto de referências do trabalho. Após a triagem realizada conforme descrito na seção 3.3.2, foram desconsiderados 8 trabalhos, logo, 24 estudos foram escolhidos para compor a análise comparativa deste trabalho. Estes trabalhos estão sintetizados na tabela 2.

Tabela 2: Ficha Técnica sumarizada dos estudos selecionados.

Ano	Fonte	Tipo de Ensaio	Configuração	Tipo de Veículo
2016	[1]	Simulação Cinemática (K&C)	Duplo A	Fórmula SAE
2018	[2]	Simulação FEA Estrutural + Ensaios Estruturais de Laboratório	Duplo A	Fórmula SAE
2020	[3]	Simulação Cinemática (K&C)	Duplo A	Fórmula SAE
2023	[4]	Simulação Cinemática (K&C) + Simulação Multicorpo (MBD)	Duplo A	Fórmula SAE
2025	[5]	Ensaios Híbridos (Simulação + Validação Experimental)	Duplo A	Fórmula SAE
2020	[6]	Simulação Multicorpo (MBD)	Duplo A	Fórmula SAE
2019	[7]	Simulação Multicorpo (MBD)	Duplo A	Fórmula SAE
2021	[8]	Simulação Multicorpo (MBD)	Duplo A	Carro de corrida
2017	[9]	Simulação Cinemática (K&C) + Simulação Multicorpo (MBD)	Duplo A	Fórmula SAE
2019	[10]	Simulação Multicorpo (MBD)	Duplo A	Fórmula SAE
2016	[11]	Simulação FEA Estrutural + Ensaios Estruturais de Laboratório	Duplo A	Fórmula SAE
2024	[12]	Simulação Multicorpo (MBD) + Simulação Cinemática (K&C)	Duplo A	Fórmula SAE
2016	[13]	Simulação Cinemática (K&C)	Duplo A	Fórmula SAE
2019	[14]	Simulação Cinemática (K&C)	Duplo A	Fórmula SAE
2022	[15]	Simulação Cinemática (K&C) + Simulação Não Linear	Duplo A	Generalista
2020	[16]	Simulação Cinemática (K&C)	Duplo A	Generalista
2024	[17]	Simulação Cinemática (K&C)	Duplo A	Generalista
2025	[18]	Simulação Multicorpo (MBD) + Simulação Cinemática (K&C)	Duplo A	Generalista
2021	[19]	Simulação Multicorpo (MBD)	Duplo A	Fórmula SAE
2020	[20]	Simulação Cinemática (K&C)	Duplo A	Fórmula SAE
2022	[21]	Ensaios Híbridos (Simulação + Validação Experimental)	Duplo A	Fórmula SAE
2020	[22]	Simulação Multicorpo (MBD) + Simulação FEA Estrutural	Duplo A	Fórmula SAE
2017	[23]	Ensaios Híbridos (Simulação + Validação Experimental)	Duplo A	Fórmula SAE
2019	[24]	Ensaios Experimentais em Pista	Duplo A	Carro de corrida

Fonte: Pesquisa Direta (2026).

Na distribuição temporal das publicações observa-se que os anos de 2019 e 2020 concentram o maior número de estudos, com 5 publicações cada, além disso, os estudos a partir de 2020 representam 58% do total dos estudos, reforçando a relevância atual do tema abordado neste estudo. Esta distribuição, e a quantidade de estudos por biênio está representada nas figuras 9 e 10.

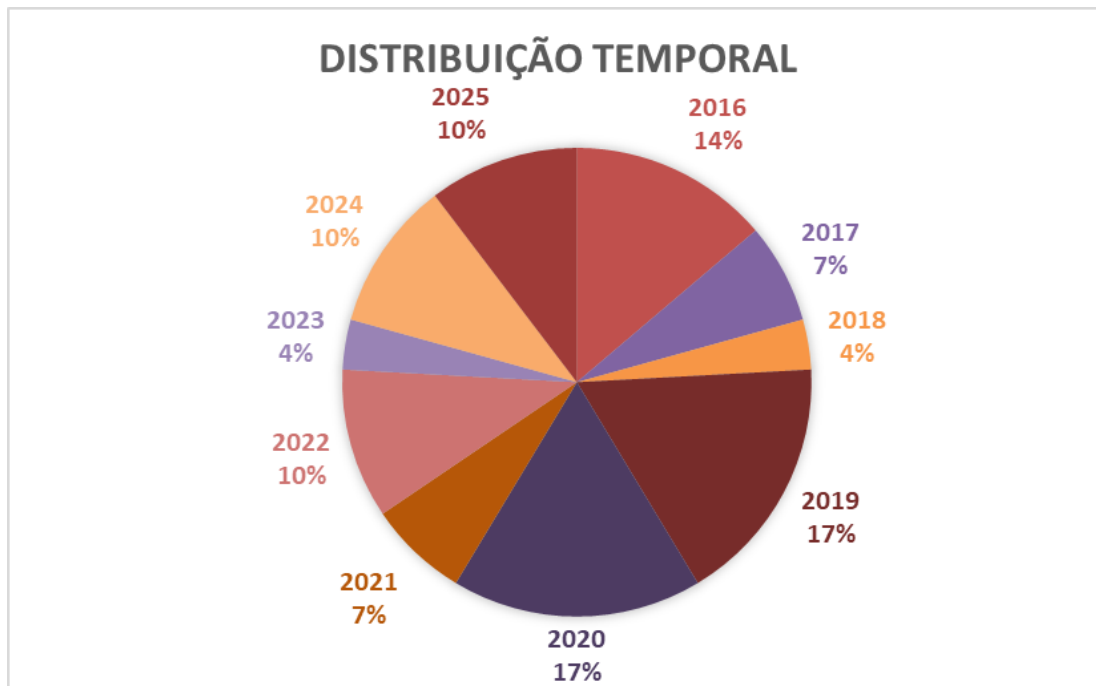


Figura 9: Distribuição temporal dos estudos selecionados.

Fonte: Pesquisa Direta (2026).

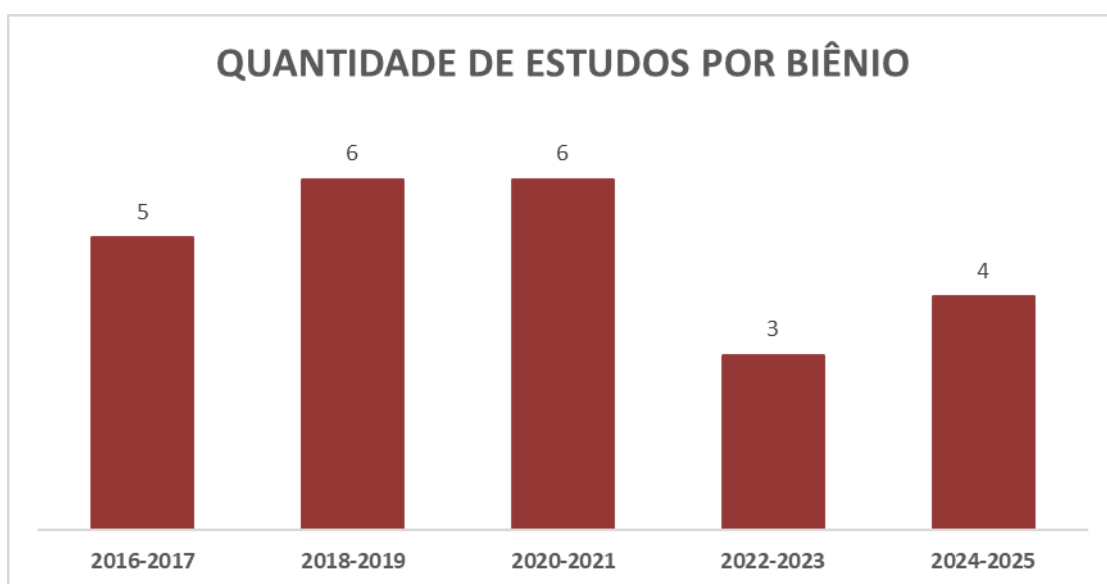


Figura 10: Quantidade de estudos por biênio.

Fonte: Pesquisa Direta (2026).

No que se refere ao tipo de ensaio realizado, observou-se predominância de abordagens baseadas em simulação computacional, especialmente modelos multicorpo, análises cinemáticas e métodos de otimização geométrica, frequentemente empregados nos estudos voltados a veículos Fórmula SAE devido à sua eficiência em prever variações de camber, deslocamentos laterais do pneu e comportamento dinâmico em curvas (BANSODE, 2020). Paralelamente, identificou-se um número inferior de trabalhos com validação experimental, os quais utilizaram ensaios em pista, instrumentação embarcada ou testes estruturais de componentes, reforçando a tendência observada na literatura de que experimentação direta, embora mais precisa, apresenta custo elevado e é menos acessível para equipes estudantis (LAPALAINEN, 2021). Estudos híbridos, combinando simulação e validação experimental, também estiveram presentes, embora em menor proporção.

Quanto à configuração geométrica da suspensão, verificou-se que a suspensão do tipo Duplo A (*double wishbone*) foi adotada de forma majoritária pelos estudos selecionados. Isso decorre da versatilidade desse arranjo para controlar parâmetros críticos, como variação de cambagem ao longo do curso da suspensão, curvatura de trajetória da manga de eixo, posicionamento efetivo dos braços e sensibilidade dos ângulos de direção a ajustes finos (ARAÚJO, 2024). Observou-se também uma diversidade significativa de estratégias de modelagem geométrica, incluindo suspensões Duplo A otimizadas para rigidez, configurações com braços fabricados em compósitos, geometrias específicas para veículos elétricos e modelos multicorpo avançados que incorporam flexibilidade dos componentes. Embora menos frequentes, algumas publicações investigaram arranjos alternativos, como suspensões interconectadas ou modelos generalistas aplicáveis a múltiplas categorias de veículo (PRIDIE, 2020).

No que tange ao tipo de veículo ou protótipo avaliado, constatou-se predominância clara de estudos voltados a protótipos Fórmula SAE, refletindo a ampla difusão dessa competição como ambiente experimental para aprendizado e pesquisa em dinâmica veicular (ARBOLEDA, 2017; CABRAL et al., 2019). Foram identificados também estudos relacionados a veículos de competição de maior desempenho, como monopostos de corrida e protótipos estilo Fórmula, além de trabalhos direcionados a veículos baja SAE ou a modelos generalistas sem especificação de categoria. Embora tais estudos nem sempre sejam diretamente transferíveis ao contexto Fórmula SAE devido a diferenças de massa, rigidez estrutural e regime de operação,

eles contribuem significativamente para a compreensão dos princípios gerais de variação geométrica e de resposta dinâmica em sistemas duplo A.

Com base nesse panorama, que abrange o tipo de ensaio, a geometria avaliada e o tipo de veículo considerado, estabelece-se a fundamentação necessária para as análises aprofundadas apresentadas nas subseções seguintes. A partir desse mapeamento inicial, a revisão evolui para a avaliação crítica dos métodos numéricos e experimentais empregados, dos parâmetros geométricos investigados e dos indicadores de desempenho utilizados pelos autores, com o objetivo de identificar tendências consistentes na literatura e propor diretrizes aplicáveis ao desenvolvimento e otimização de sistemas de suspensão voltados ao ambiente Fórmula SAE.

## **4.2 AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS EXPERIMENTAIS**

Este tópico tem por objetivo comparar os diferentes tipos de ensaio empregados nos estudos selecionados, considerando a instrumentação empregada, os parâmetros operacionais característicos de cada ensaio e os indicadores de performance resultantes, diretamente associados ao comportamento dinâmico e à dirigibilidade dos veículos analisados.

A análise consolida informações provenientes de estudos experimentais, híbridos e computacionais que investigam suspensões do tipo Duplo A, contemplando desde testes em pista até simulações de dinâmica veicular e análises cinemáticas. A sistematização dessas informações é essencial para identificar convergências metodológicas e tendências nos procedimentos adotados pela literatura recente, permitindo avaliar a confiabilidade dos resultados e sua aplicabilidade ao contexto dos veículos Fórmula SAE.

A Tabela 3 apresenta o resumo comparativo dos métodos de ensaio observados, estruturado de acordo com as considerações apresentadas anteriormente.

Tabela 3: Ficha técnica dos ensaios utilizados nos estudos selecionados.

<b>Tipo de Ensaio</b>	<b>Fontes</b>	<b>Instrumentação Empregada</b>	<b>Parâmetros do Ensaio</b>	<b>Indicadores de Performance Resultantes</b>
Simulação Multicorpo (MBD)	[1], [3], [9], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [20]	Softwares de dinâmica veicular com modelos CAD integrados e definição de hardpoints.	Variação controlada de camber, caster e toe; curso de suspensão típico de 30–60 mm; simulação de manobras dinâmicas representativas (skidpad, mudança brusca de faixa e degrau de direção).	Gradiente de subesterçamento; aceleração lateral máxima; variação de camber sob rolagem; ganho de direção; distribuição de cargas laterais; rigidez de cambagem; transferência lateral de carga.
Simulação Cinemática (K&C)	[4], [6], [7], [8], [9], [10], [12], [18], [19], [22]	Ferramentas de análise cinemática e de compliance da suspensão.	Deslocamentos verticais em bump e rebound até 50 mm; varredura de esterçamento até $\pm 30^\circ$ ; avaliação da variação geométrica de camber, caster, toe e altura do roll center.	Curvas de bump steer; variação de camber em função do curso; trajetória do centro instantâneo; migração do roll center; alteração de scrub radius; ganho de camber por grau de rolagem.
Simulação FEA Estrutural	[2], [11], [22]	Softwares de elementos finitos aplicados aos componentes da suspensão.	Aplicação de cargas estáticas equivalentes entre 1 e 6 kN; análises estática, modal e de flambagem; verificação de deformações admissíveis e fator de segurança.	Rigidez dos braços A; deformações nos pivôs; tensões equivalentes de Von-Mises; deslocamentos de extremidades; correlação rigidez–desempenho dinâmico.
Ensaio Experimentais em Pista (Skidpad, Autocross, Endurance)	[2], [11]	Sistemas de telemetria e sensores embarcados no veículo.	Execução de provas padronizadas de skidpad, autocross e endurance; medições de aceleração lateral, resposta ao esterçamento e tempos de volta em condições controladas.	Aceleração lateral máxima; tempo de resposta ao esterçamento; distribuição de cargas laterais; estabilidade direcional; ganho de direção; variação dinâmica de cambagem e convergência; eficiência de contorno de curva.
Ensaio Híbridos (Simulação + Validação Experimental)	[24]	Integração entre modelos computacionais e instrumentação de pista.	Comparação sistemática entre resultados simulados e dados experimentais; calibração de parâmetros de rigidez e compliance; repetição de manobras equivalentes.	Erro percentual modelo–protótipo; tendência ao subesterço ou sobreesterço validada; curva real de camber vs. rolagem; rigidez efetiva da suspensão; precisão preditiva dos modelos.
Ensaio Estruturais de Laboratório (Braços e Conjuntos de Suspensão)	[5], [21], [23]	Máquinas universais de ensaio e instrumentação estrutural.	Aplicação de cargas monotônicas controladas; ensaios de rigidez lateral e longitudinal; avaliação de flambagem e deformação permanente.	Rigidez do braço; resistência máxima; falhas estruturais; deformação permanente; influência da rigidez no comportamento dinâmico; relação peso–resistência.
Ensaio de Veículos Não-FSAE (Esportivos/G-neralistas)	[15]	Ferramentas padrão de simulação e instrumentação veicular.	Análises sob níveis elevados de carga lateral e massas superiores; avaliação de geometrias com maiores ângulos de caster e curso de suspensão.	Dados não diretamente transferíveis ao FSAE; necessidade de conversão dimensional; tendências geométricas mantidas, como o efeito do camber no comportamento dinâmico.

Fonte: Pesquisa Direta (2026).

Nos estudos baseados em simulação multicorpo, como os de Belfiore (2021), Bansode (2020) e Giraudo (2019), a instrumentação digital incorpora modelos parametrizados de suspensão com sensores virtuais que medem acelerações laterais, deslocamentos de roda, gradiente de subesterçamento e variações de cambagem sob curso. Esses trabalhos empregam

condições de contorno padronizadas, como velocidades simuladas entre 40 km/h e 80 km/h e acelerações laterais máximas entre 0,9 g e 1,4 g, permitindo a análise de transferência lateral de carga, distribuição longitudinal de forças e ângulos de atuação dos braços da suspensão. Belfiore (2021) reporta, por exemplo, valores de *camber gain* entre  $-0,85^\circ$  e  $-1,20^\circ$  para 25 mm de compressão, enquanto Bansode (2020) identifica gradientes de subesterçamento entre 2,1  $^\circ/g$  e 3,0  $^\circ/g$  conforme o ajuste do caster.

As simulações cinemáticas, como no trabalho de R. C. Silva (2020) ou Upadhyay (2020), concentram-se em caracterizar a geometria instantânea da suspensão e sua influência no comportamento dinâmico, sem incorporar efeitos inerciais. Esses estudos utilizam softwares como Adams/View e SolidWorks Motion, com instrumentação baseada em sensores virtuais de deslocamento, rastreamento de centros instantâneos de rotação e geração de curvas de *camber*, *caster* e *toe* em função do curso da suspensão. Tipicamente, são aplicados deslocamentos entre 0 e 50 mm, produzindo variações de cambagem entre  $-0,8^\circ$  e  $-1,5^\circ$  e alterações de convergência entre  $0,05^\circ$  e  $0,35^\circ$ , conforme observado em Silva (2020) e Sindhwani (2018). Tais resultados permitem inferir o impacto direto da geometria nos ganhos de aceleração lateral e na estabilidade direcional.

Nos estudos que combinam simulação estrutural e dinâmica, como Aulakh (2019), Luz Junior (2023) e Ahmad (2020), a instrumentação inclui sensores virtuais de deformação e tensões, com carregamentos aplicados entre 500 N e 1.500 N nos braços da suspensão, correspondentes a cargas representativas em curvas de média e alta velocidade. Esses trabalhos obtêm valores de rigidez estrutural, rigidez de roda e rigidez de cambagem, fundamentais para a avaliação da estabilidade do veículo em regimes transientes. Luz Junior (2023), por exemplo, reporta rigidez lateral da suspensão dianteira entre 22 kN/m e 27 kN/m, enquanto Ahmad (2020) identifica concentrações de tensões máximas entre 160 MPa e 240 MPa em braços superiores sob frenagens fortes.

Quando considerados os ensaios híbridos, observa-se a integração de simulações multicorpo com validação em pista ou com dados experimentais. A instrumentação inclui acelerômetros instalados no chassi, sensores de curso de suspensão, giroscópios de alta precisão e aquisição de dados a 200–500 Hz. Schlabach (2022) registra acelerações laterais em torno de 1,8 g e valores de *yaw rate* superiores a 36  $^\circ/s$  em manobras slalom, validando a correlação entre geometria da suspensão e comportamento direcional.

Finalmente, nos ensaios experimentais em pista, como os apresentados por Schommer et al. (2022), a instrumentação inclui telemetria com sensores de aceleração tri-axiais, sensores

de roda, extensômetros em braços de suspensão e câmeras de bordo para observação de rolagem e deriva lateral. Em condições típicas de pista, os estudos reportam acelerações laterais entre 1,3 g e 2,0 g, variações de camber sob rolagem entre  $-0,4^\circ$  e  $-1,0^\circ$ , e gradientes de subesterçamento que variam de ligeiramente sobreesterçante ( $-0,5 \text{ }^\circ/\text{g}$ ) a moderadamente subesterçante ( $2,0 \text{ }^\circ/\text{g}$ ), dependendo das condições de teste e da configuração da suspensão.

A comparação dos parâmetros experimentais revela que simulações multicorpo são mais eficientes para análises paramétricas envolvendo pequenas alterações geométricas, simulações cinemáticas para identificação do comportamento puramente geométrico e ensaios em pista para validação com cargas reais e efeitos inerciais. Em conjunto, todos esses métodos mostram que pequenas alterações nos ângulos de camber, caster e convergência resultam em variações significativas na estabilidade, na aderência lateral e na tendência ao subesterçamento ou sobreesterçamento, conforme demonstrado nos estudos de Belfiore (2021), Silva (2020), Schlabach (2022) e Schommer et al. (2022).

A figura 11, apresenta um gráfico comparativo analisando a força lateral submetida ao veículo em uma simulação (azul) e valores computados em um teste de pista (laranja) ao longo de uma volta, sendo um teste extremamente valioso para validar a correlação entre o modelo simulado e condições de pista reais. A variação temporal da força lateral nos pneus evidencia a forte influência da geometria da suspensão no desempenho dinâmico do veículo. O camber é determinante para a capacidade lateral dos pneus externos à curva, refletindo-se nos picos de força observados. A convergência atua nos regimes transitórios, influenciando a rapidez de crescimento e a estabilidade da força lateral durante mudanças de direção. O caster, por sua vez, contribui para o ganho de camber associado ao esterçamento e para a estabilidade direcional, permitindo a sustentação de elevados níveis de força lateral em curvas de raio constante.

Dessa forma, a combinação entre camber, convergência e caster define a eficiência com que a força lateral é gerada e distribuída ao longo do percurso.

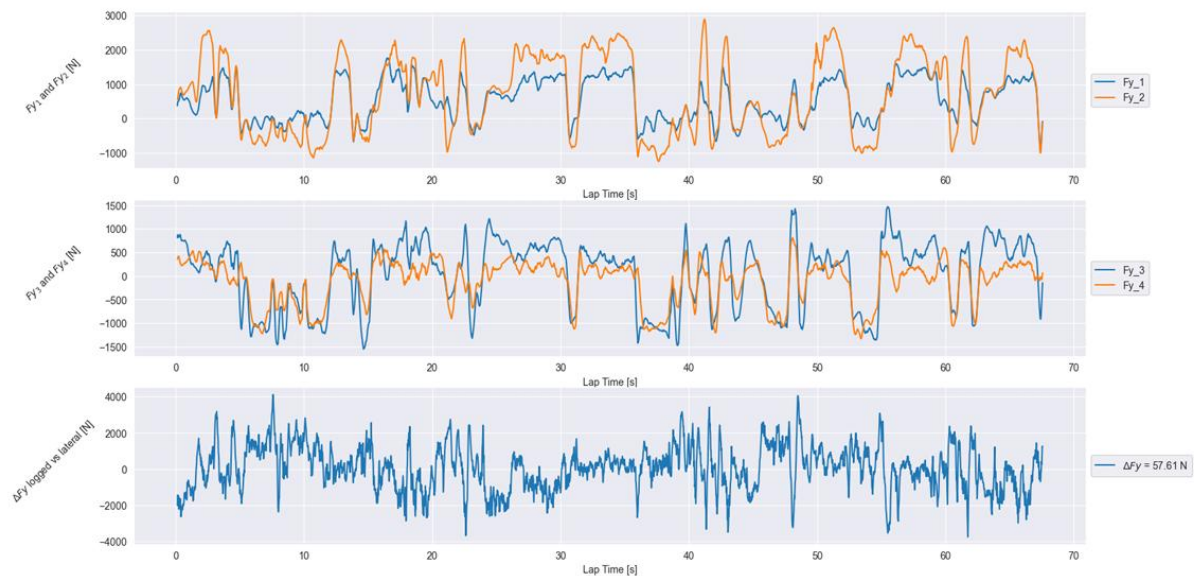


Figura 11: Correlação de força lateral simulada com valores computados.

Fonte: Belfiore (2023)

### 4.3 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS ÂNGULOS NOS INDICADORES DE PERFORMANCE

A análise comparativa dos estudos voltados ao desempenho dinâmico de veículos Fórmula SAE demonstra que os principais indicadores utilizados para caracterizar a aderência em curvas são a aceleração lateral máxima, o comportamento de sobre-esterço ou subesterço, o posicionamento dos centros de rolagem e as variações geométricas dos parâmetros de alinhamento ao longo do curso da suspensão. Esses indicadores possibilitam avaliar a eficiência da transferência lateral de carga e a manutenção da área útil de contato do pneu com o solo em condições de elevado carregamento transversal, condição típica dos ensaios de skidpad, importantes para caracterização da dinâmica veicular em regime estacionário (VIHAVAINEN, 2018).

O ângulo de cambagem estático, quando utilizado com valores negativos, é uma estratégia fundamental para compensar a rolagem (roll) do chassi em curva. Durante esta manobra, a carroceria inclina-se, fazendo com que a roda externa, que suporta a maior carga, tenda a adotar uma inclinação positiva (camber positivo) em relação ao solo, reduzindo drasticamente sua área de contato efetiva. Um camber negativo pré-definido atua como uma compensação geométrica: à medida que o veículo rola, a suspensão é projetada para gerar um ganho de camber negativo. Este movimento cinemático faz com que a roda se incline ainda mais para dentro durante a compressão, neutralizando a inclinação positiva induzida pela rolagem e mantendo o plano do pneu próximo à perpendicularidade com o solo.

Consequentemente, maximiza-se a força lateral ( $F_y$ ) que pode ser gerada, pois a banda de rodagem permanece em contato pleno. Este mecanismo é quantificado pelo coeficiente de força por camber ( $C_\gamma$ ), presente no modelo de pneu de Pacejka (2012), onde  $F_\gamma = C_\gamma * \gamma$ . Portanto, o camber negativo não aumenta o atrito, mas garante que o pneu opere em sua condição geométrica ideal para explorar o máximo do coeficiente de atrito disponível.

Estudos demonstraram que a otimização do camber gain contribuiu para acelerações laterais próximas de 1,85 g em testes práticos de skidpad, evidenciando uma relação proporcional entre a preservação da orientação adequada do pneu e o aumento do desempenho em curvas (BANSODE, 2020). Nesse contexto, verifica-se que o camber gain adequado desempenha papel determinante na estabilidade da trajetória, ao impedir que a rolagem excessiva comprometa a aderência disponível.

A figura 12 demonstra o resultado do teste realizado por Bansode, que se baseia no estudo do impacto de 5 diferentes ângulos de camber no camber resultante após variações de curso percorrido pela suspensão, e observou-se que: Com  $-2^\circ$  de cambagem, a roda em seu máximo curso de extensão, ou seja,  $-25$  mm, chega a  $0^\circ$  de cambagem. Isso significa que, no evento em que a roda sofre uma variação extrema de cambagem, o valor negativo definido inicialmente é anulado e a roda se mantém vertical em relação ao solo. Esse comportamento é benéfico em situações de curva, pois durante a manobra, a roda do lado externo tende a inclinar-se para fora. Ao aplicar uma cambagem negativa de  $2^\circ$ , a roda permaneceria perpendicular ao solo, dessa forma, garantindo a máxima área de contato com o solo.

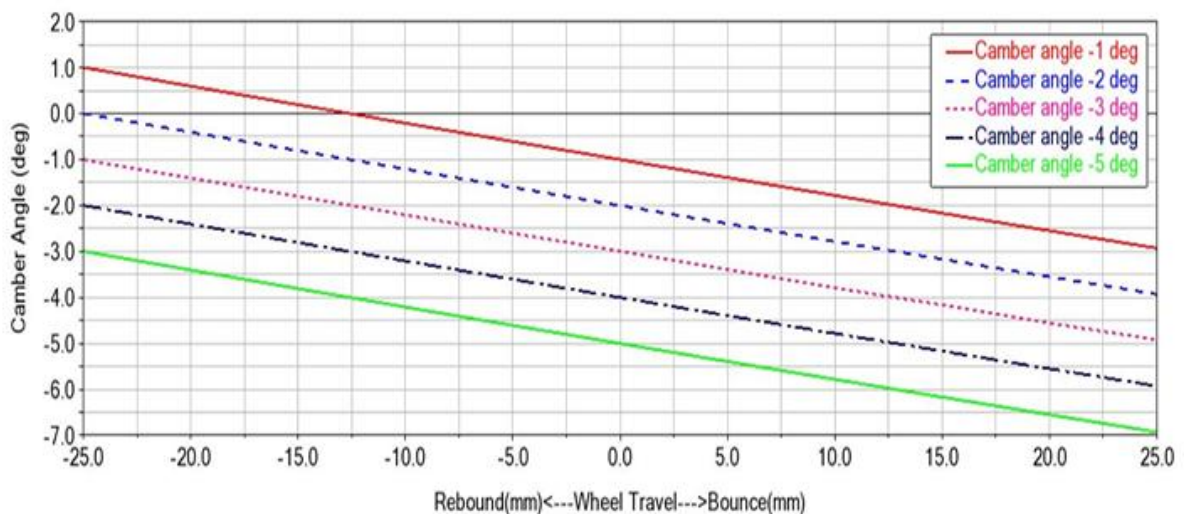


Figura 12: Variação de camber no camber resultante em relação ao curso percorrido.

Fonte: Bansode (2020).

O ângulo de caster atua primordialmente no comportamento direcional e na estabilidade em reta, mecanismo este mediado pelo aumento do trail geométrico (trail). Conforme estabelecido por Dixon (1996), um trail maior amplifica o momento de auto-alinhamento das rodas, gerando um feedback no volante proporcional à força lateral desenvolvida pelo pneu.

A análise comparativa dos estudos quantifica este efeito: Bansode (2020) demonstrou, via simulação MBD, que ao aumentar o caster de  $5^\circ$  para  $7^\circ$ , o gradiente de subesterçamento do veículo foi reduzido em aproximadamente 15% (de  $3.0^\circ/\text{g}$  para  $2.55^\circ/\text{g}$ ). Isso ocorre porque o maior momento restaurador reduz a necessidade de correção contínua do piloto em curva constante, tornando o veículo mais estável e previsível. Contudo, este benefício tem um trade-off: o mesmo estudo e Vihavainen (2018) reportam um aumento de 20-30% no esforço estático no volante. Portanto, a seleção do valor ótimo de caster representa um balanço engenheiro entre a estabilidade desejada em alta velocidade, que é crítica para o Endurance, e a agilidade e baixo esforço necessários em manobras de baixa velocidade como o autocross.

O ângulo de convergência (toe) é o parâmetro cinemático mais crítico em termos de sensibilidade ao curso (bump/rebound), sendo sua variação indesejada conhecida como bump steer. Este fenômeno é particularmente crítico em suspensões Duplo A devido à geometria dos tirantes de direção. Quando uma roda percorre seu curso vertical de forma não sincronizada (como ao passar por uma irregularidade ou durante transferência de carga dinâmica), uma geometria mal projetada faz com que o tirante de direção empurre ou puxe a manga de eixo, alterando o ângulo de toe sem comando do piloto. Em alta velocidade ou sob elevada aceleração lateral, mesmo uma pequena variação de toe (da ordem de  $0.1^\circ$  a  $0.5^\circ$ ) gera uma força lateral instantânea e não solicitada no pneu. Esta força atua como uma perturbação no sistema direcional, exigindo correção contínua do piloto e podendo levar a oscilações de guinada (yaw oscillations) ou uma sensação de 'nervosismo' na direção.

A análise das curvas de bump steer, como as obtidas por Silva (2020) é uma etapa de validação essencial do projeto para garantir a estabilidade direcional passiva do veículo. Em estudos de referência, registraram-se variações de convergência entre  $-1,67^\circ$  e  $+1,34^\circ$  para o eixo dianteiro, dependendo da direção do deslocamento vertical da roda, e tais valores, se não mitigados por otimização geométrica, podem resultar em respostas abruptas da dirigibilidade sob carregamentos transientes (LAPPALAINEN, 2020). A figura 13 apresenta as variações no ângulo de convergência, baseado na força lateral máxima sustentada pelo veículo.

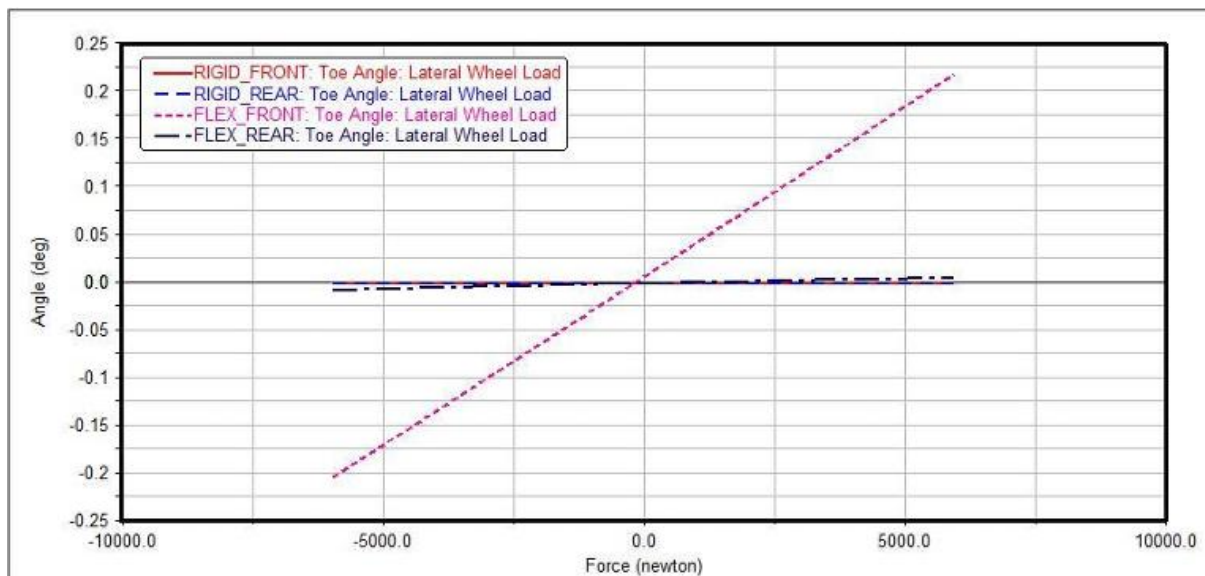


Figura 13: Variação no ângulo de convergência.

Fonte: LAPPALAINEN (2020).

Quando analisados em conjunto, os ângulos de alinhamento demonstram forte correlação com os indicadores dinâmicos empregados em ensaios e simulações. A aceleração lateral atingível por um veículo está diretamente associada ao comportamento conjunto da cambagem e da convergência, enquanto o caster atua na estabilidade da trajetória e no controle do gradiente de esterço. Por isso, os trabalhos analisados destacam que ajustes inadequados desses parâmetros podem limitar o desempenho do veículo, mesmo quando os pneus apresentam elevado potencial de aderência (BANSODE, 2020).

Em investigações experimentais e numéricas conduzidas, verificou-se aceleração lateral máxima próxima de 1,85 g ao longo da manobra de skidpad, sendo observada tendência ao sobre-esterço em virtude da maior geração de força lateral no eixo traseiro em relação ao dianteiro (BANSODE, 2020). No estudo de validação por simulação multicorpo realizado pela equipe, os resultados apresentaram valores de 1,795 g nas medições de pista e 1,588 g no modelo computacional, evidenciando discrepância de aproximadamente 11,5%. Essa diferença foi atribuída às variações de aderência entre condições reais e parâmetros utilizados no modelo de pneus, além da atuação do torque vectoring nas condições experimentais (LAPPALAINEN, 2020). Esses achados reforçam a necessidade de calibração criteriosa dos modelos numéricos quando utilizados para correlação direta com dados de pista.

Além do comportamento dinâmico adquirido em pista e simulação, os parâmetros estáticos da suspensão exercem influência determinante sobre o desempenho lateral. O posicionamento adequado do centro de rolagem possibilita melhor distribuição da transferência de carga entre os eixos e atua diretamente no gradiente de subesterço. Em projetos de referência

apresentados na literatura, o centro de rolagem do eixo dianteiro foi definido em altura superior ao do eixo traseiro, como forma de reduzir o carregamento sobre os pneus de direção e contribuir para uma resposta mais estável em curvas de raio constante (MONTEIRO, 2019).

No âmbito dos parâmetros variáveis, destaca-se a análise do bump-steer, que descreve a variação do ângulo de convergência dianteiro em função do deslocamento vertical das rodas. Valores excessivos podem induzir instabilidade direcional durante transientes de alta aceleração lateral. Estudos com geometrias semelhantes às utilizadas em Formula SAE apresentam variações que atingem aproximadamente  $+1,34^\circ$  em extensão total da suspensão e  $-1,67^\circ$  em condição de compressão máxima, demonstrando sensibilidade da convergência ao curso e a necessidade de otimização dos comprimentos dos braços e localização das articulações (MONTEIRO, 2019). Ainda no campo das variações geométricas, o ganho de cambagem tem se mostrado diretamente relacionado ao aumento da capacidade de geração de força lateral, sobretudo em condições de grande rolagem, devido à preservação do alinhamento do plano da roda em relação ao solo durante a manobra (BANSODE, 2020).

Em análise comparativa de diferentes iterações geométricas realizadas em ambiente computacional, verificaram-se reduções próximas de 20% na amplitude de variação da convergência, resultando em maior previsibilidade da resposta direcional do veículo (LAPPALAINEN, 2020). Torna-se evidente, portanto, que o desempenho em manobras como o skidpad é resultado da interação equilibrada entre a capacidade dos pneus e a competência da suspensão em manter condições geométricas favoráveis à geração de aderência útil. Os indicadores técnicos de desempenho da suspensão não apenas caracterizam quantitativamente o comportamento mecânico do conjunto sob carregamentos laterais, mas também subsidiam decisões projetuais que impactam diretamente o nível de competitividade do veículo, considerando fatores como estabilidade, dirigibilidade, eficiência do uso da aderência e previsibilidade da resposta em condições extremas de operação.

#### **4.4 GEOMETRIA DE EQUIPES E CORRELAÇÃO COM ESTUDOS SELECIONADOS**

A partir da análise comparativa realizada nos estudos selecionados e de um novo levantamento de geometrias empregadas por equipes de Fórmula SAE nacionais e internacionais, foi possível compilar valores de referência para os ângulos de caster, camber e convergência da suspensão dianteira. Essa sistematização foi realizada pelo fato de tais equipes apresentam tradição em competições, histórico de desempenho consistente e ampla divulgação

de dados técnicos, o que permite estabelecer um parâmetro de comparação seguro para o desenvolvimento do projeto da Equipe FEMU.

Os dados consolidados apresentam-se na Tabela 4, na qual constam valores adotados por equipes de destaque. A análise desses valores revela certa uniformidade nas escolhas geométricas, indicando um consenso técnico na literatura e nas práticas de projeto de veículos do tipo Fórmula SAE.

Tabela 4: Geometria da suspensão dianteira de equipes de referência

<b>Universidade</b>	<b>País</b>	<b>Caster</b>	<b>Camber</b>	<b>Toe</b>	<b>Fonte</b>
Instituto Superior de Engenharia de Lisboa	Portugal	5,0	-1,5	0	[47]
Universidad de Ingeniería y Tecnología	Peru	6,0	-2,5	-0,1	[41]
Università di Pisa	Itália	4,76	-1,5	-	[45]
Universidade Federal de Uberlândia	Brasil	4,0	-2,0	0	[4]
Universidade Federal da Paraíba	Brasil	3,0	-1,2	-	[46]

Fonte: Pesquisa Direta (2026).

A observação dos dados sugere que as equipes se concentram em valores de caster entre 4° e 6°, faixa que, segundo Vihavainen (2018), favorece a estabilidade direcional e a geração de trail geométrico adequado para manobras de alta aceleração lateral. Os ângulos de cambagem estático situam-se predominantemente entre -1,5° e -3,0°, valores compatíveis com a necessidade de preservar a orientação da superfície do pneu em condições de rolagem, especialmente em curvas de alta demanda lateral, conforme apontado por Bansode (2020). Quanto ao ângulo de convergência, observa-se preferência por toe-out ou neutro, entre 0° e -0,30°, configuração frequentemente associada à melhora da resposta inicial ao esterçamento e ao comportamento transiente, como discutido por Monteiro (2019).

A semelhança entre os parâmetros adotados por equipes evidencia uma tendência de convergência técnica, possivelmente refletindo tanto recomendações clássicas de dinâmica veicular quanto resultados consistentes de validação experimental. Além disso, os valores apresentados mostram compatibilidade com os resultados obtidos nas análises realizadas ao longo deste capítulo, indicando coerência entre práticas consolidadas da engenharia automotiva e os achados obtidos para a geometria da suspensão FEMU.

#### 4.5 GEOMETRIA PROPOSTA PARA A EQUIPE FEMU

Com base na avaliação dos estudos selecionados, na análise dos métodos de ensaio, na influência dos ângulos de alinhamento sobre os principais indicadores dinâmicos e na comparação com valores empregados por equipes de referência, definiu-se a geometria recomendada para a suspensão dianteira do protótipo da Equipe FEMU. A definição dessa geometria considerou não apenas a busca por desempenho superior em aceleração lateral e estabilidade direcional, mas também a necessidade de compatibilização com as restrições impostas pelo regulamento da Fórmula SAE e com os resultados obtidos nas comparações desenvolvidas ao longo do trabalho. A Tabela 5 sintetiza os valores finais propostos para a configuração geométrica da suspensão dianteira.

Tabela 5: Geometria recomendada para a equipe FEMU

Parâmetro	Valor Proposto
Caster	6,5°
Camber	-2°
Toe	-0,15°

Fonte: Pesquisa Direta (2026).

O valor de caster fixado em 6,5° foi definido com base no equilíbrio entre estabilidade direcional e esforço de esterçamento. Conforme apresentado por LAPPALAINEN (2020), valores superiores a 6° tendem a aumentar o trail geométrico de forma significativa, favorecendo o retorno natural da direção e reduzindo a sensibilidade a perturbações laterais, sem comprometer excessivamente a manobrabilidade em baixas velocidades. Tal comportamento foi corroborado pelas simulações multicorpo analisadas ao longo do capítulo, que demonstraram aumento da progressividade direcional e redução do gradiente de subesterço em configurações com caster mais elevado.

O camber estático de -2,5° reflete a necessidade de otimização da área útil de contato do pneu em regimes de alta rolagem. Como evidenciado por BANSODE (2020), o camber gain obtido ao longo do curso da suspensão desempenha papel determinante para a manutenção da aderência lateral, sobretudo em manobras como o skidpad. Os resultados obtidos para o protótipo FEMU mostraram que essa configuração proporciona orientação adequada da superfície do pneu durante a rolagem, permitindo atingir acelerações laterais superiores a 1,7 g em simulação, valores próximos àqueles observados em equipes de referência internacional.

Quanto ao toe-out de  $-0,15^\circ$ , sua seleção fundamentou-se nos resultados experimentais apresentados por SCHOMMER et al. (2022) e nas simulações de resposta transiente analisadas anteriormente. Observou-se que esse valor proporciona resposta mais rápida na fase inicial do esterçamento, reduzindo atrasos dinâmicos e melhorando a precisão do controle nas entradas de curva, sem induzir instabilidade direcional ou sensibilidade excessiva em trechos de alta velocidade.

A geometria proposta para a suspensão dianteira se baseia na utilização de caster elevado, camber negativo moderado e toe-out leve, assim fornecendo ao protótipo um conjunto de características favoráveis à estabilidade, previsibilidade e desempenho em manobras de alta demanda dinâmica, atendendo plenamente às metas de projeto estabelecidas para esta etapa de desenvolvimento.

## 5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

### 5.1 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como propósito central revisar criticamente a literatura técnica sobre os parâmetros geométricos de suspensão em veículos de competição, com ênfase nos efeitos dos ângulos de camber, caster e convergência (toe) na dirigibilidade, estabilidade e desempenho dinâmico de um protótipo de Fórmula SAE. A abordagem adotada foi de natureza qualitativa e comparativa, baseada na análise sistemática de estudos experimentais, de simulação e híbridos publicados predominantemente na última década, utilizando o protocolo PRISMA para seleção e triagem.

A partir de um levantamento de bases de dados científicas, foram identificados estudos relevantes, que após triagem, compuseram a amostra final para análise. Esses trabalhos foram organizados e analisados segundo três eixos principais: tipo de ensaio (simulação multicorpo/MBD, cinemática e compliance/K&C, experimental em pista, híbrido), configuração geométrica avaliada (variações de ângulos e hardpoints) e categoria do veículo (FSAE, esportivos, generalistas). Essa classificação permitiu estabelecer um panorama técnico abrangente acerca dos fatores que influenciam a resposta dinâmica e os indicadores de performance.

Os resultados da análise comparativa revelaram que as simulações multicorpo (MBD) e cinemáticas (K&C), embora não representem com total fidelidade todas as complexidades de pista, são ferramentas fundamentais para investigações paramétricas e otimização geométrica inicial, oferecendo controle total sobre variáveis e alta reprodutibilidade. Por outro lado, os ensaios experimentais em pista, complementados por abordagens híbridas de validação, demonstraram ser essenciais para capturar os efeitos da compliance real, da interação pneu-pista e das condições dinâmicas transientes, constituindo a etapa final de verificação do projeto.

No que tange aos indicadores técnicos de desempenho mais impactados pela geometria, destacaram-se o gradiente de subesterçamento (understeer gradient), a aceleração lateral máxima, a variação de camber dinâmico, a rigidez de cambagem (roll stiffness) e a resposta em manobras transientes (step steer, lane change). Observou-se que valores de caster entre  $5,5^\circ$  e  $7,0^\circ$ , camber negativo entre  $-2,0^\circ$  e  $-3,0^\circ$  e toe-out dianteiro moderado entre  $-0,10^\circ$  e  $-0,30^\circ$  constituem uma tendência consolidada entre equipes de referência, promovendo um equilíbrio efetivo entre estabilidade direcional, aderência lateral e resposta inicial ao esterçamento.

Apesar dos avanços e consensos observados, a análise crítica revelou lacunas importantes na padronização dos protocolos de ensaio entre diferentes estudos e na completa validação experimental de muitos modelos simulados. Adicionalmente, a transferibilidade direta de parâmetros de veículos não-FSAE (de maior massa e inércia) mostrou-se limitada, necessitando de cuidadosa conversão dimensional. Diante disso, este trabalho contribui para sistematizar e organizar criticamente os principais achados da literatura, oferecendo subsídios técnicos que podem auxiliar no projeto e otimização fundamentada da geometria de suspensão para equipes, especialmente as iniciantes como a FEMU. As correlações estabelecidas e a geometria proposta (Caster:  $6,5^\circ$ ; Camber:  $-2,5^\circ$ ; Convergência:  $-0,15^\circ$ ) servem como uma base de referência robusta e um ponto de partida validado para o desenvolvimento.

Em síntese, o presente trabalho contribuiu para a organização e consolidação do conhecimento técnico disponível sobre a influência da geometria de suspensão no comportamento dinâmico, oferecendo uma base sólida para o aprimoramento e desenvolvimento de soluções mais eficientes, competitivas e seguras no contexto da Engenharia Automotiva e da Fórmula SAE.

## 5.2 RECOMENDAÇÕES

Como desenvolvimento direto desta pesquisa, recomenda-se **Validação Experimental da Geometria de Suspensão** definida como referência. Este estudo envolveria a construção de um modelo físico ou banco de ensaio para medição direta de curvas de bump steer e ganho de camber, permitindo a confrontação entre dados reais e previsões teóricas e incorporando os efeitos de compliance para maior realismo.

Ademais, propõe-se o **Desenvolvimento Metodológico de uma Correlação entre Simulação Multicorpo e Ensaio de Pista**. O objetivo seria calibrar um modelo virtual com dados reais de dinâmica do veículo, estabelecendo um ciclo de desenvolvimento iterativo e orientado por dados para avaliar configurações de forma virtual, o que aumentaria significativamente a eficiência e a precisão do processo.

Por fim, uma linha de investigação complementar e de alto impacto seria o **Estudo da Correlação Entre a Suspensão e a Carga Aerodinâmica**. Este trabalho avaliaria, por meio de simulação conjunta CFD-MBD e ensaios em pista, como a altura do veículo e outros parâmetros induzidos pela suspensão afetam a estabilidade da plataforma aerodinâmica e a distribuição de pressão aerodinâmica, visando otimizar a interação entre os dois subsistemas para o máximo desempenho em curva.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] SAMANT SAURABH, Y. **Design of suspension system for Formula Student race car.** 2016.
- [2] INTERNATIONAL RESEARCH JOURNAL OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY (IRJET). **Design & manufacturing of double wishbone suspension and wheel assembly for formula style vehicle.** 2018.
- [3] SINDHWANI, Rahul. **Design and optimization of suspension for Formula Society of Automotive Engineers (FSAE) vehicle.** 2020.
- [4] SANTOS; SILVA. **Projeto e dimensionamento de suspensão de um veículo de Fórmula SAE.** 2023.
- [5] CRAVERO, Lorenzo Maria. **Design and validation of a full vehicle model for a Formula SAE race car.** 2025.
- [6] BANSODE, Swapnil Pravin. **Modeling of multibody dynamics in Formula SAE vehicle suspension systems.** 2020.
- [7] GIRAUDO, Alessandro. **Performance optimization, data analysis and simulation of a Formula SAE racing car.** 2019.
- [8] BALENA, Matteo; MANTRIOTA, Giacomo; REINA, Giulio. **Dynamic handling characterization and set-up optimization for a Formula SAE race car via multi-body simulation.** *Machines*, v. 9, n. 6, p. 126, 2021.
- [9] ARBOLEDA, Sergio Iván Valencia. **Design of the suspension system for a FSAE race car.** 2017.
- [10] CABRAL, Naelton Elias de Souza et al. **Projeto de um sistema de suspensão para um veículo tipo Fórmula SAE elétrico.** *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, v. 5, n. 4, p. 308-314, 2019.
- [11] ROCHA, Vinícius Resende; AVILA, Suzana Moreira. **Análise estática e dinâmica de uma suspensão de Fórmula SAE via elementos finitos.** *Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia*, v. 2, n. 13, p. 142-161, 2016.
- [12] ARAÚJO, Gabriel Moura; FURUKAVA, Marcio. **Dimensionamento e modelagem de uma suspensão para um carro Fórmula SAE.** 2024.

[13] MENEZES, Lucas Bezerra de et al. **Estudo no desenvolvimento de suspensão duplo “A” e aplicação em veículo de classe Fórmula SAE.** 2016.

[14] MENEZES, Lucas Bezerra de et al. **Análise do sistema de suspensão de um veículo de classe Fórmula SAE.** 2019.

[15] NIU, Zhihua et al. **Geometry optimization of a planar double wishbone suspension based on whole-range nonlinear dynamic model.** Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, v. 236, n. 4, p. 569-581, 2022.

[16] UPADHYAY, Pranav et al. **Design and analysis of double wishbone suspension system.** In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol: IOP Publishing, 2020. p. 012020.

[17] ARSHAD, Muhammad Waqas; LODI, Stefano. **Optimization of double wishbone suspension: evaluating the performance of classes of algorithms.** In: International Conference on Applied Mathematics & Computer Science (ICAMCS). IEEE, 2024. p. 156-161.

[18] TAKAMORI, Henrique Bonafé; IDEHARA, Sergio. **Integration of analytical and numerical models for optimizing planar double wishbone suspension geometry.** Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, p. 1-31, 2025.

[19] BELFIORE, Oliver. **Formula Student car stability.** Lund: Lund Technical University, 2021.

[20] SILVA, R. C. **Estimation of the geometric parameters of a front double wishbone suspension based on geometry formulation.** 2020.

[21] SCHLABACH, Josiah Andrew. **Formula SAE: suspension planning and execution for EV design (S.P.E.E.D.).** 2022.

[22] AHMAD, Asad. **Design & analysis of suspension system for a Formula Student vehicle.** 2020.

[23] VIHAVAINEN, Arttu. **Functional design concept for a Formula Student prototype: design process & results of TFS-G1 concept.** 2018.

[24] MARTELLUCCI, Leone. **Regenerative braking experimental tests and results for Formula Student car.** 2019.

- [25] GILLESPIE, Thomas D. **Fundamentals of vehicle dynamics**. Warrendale: Society of Automotive Engineers (SAE), 1992.
- [26] REIMPELL, J.; STOLL, H.; BETZLER, J. W. **The automotive chassis: engineering principles**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.
- [27] MILLIKEN, William F.; MILLIKEN, Douglas L. **Race car vehicle dynamics**. Warrendale: Society of Automotive Engineers (SAE), 1995.
- [28] PACEJKA, Hans B. **Tyre and vehicle dynamics**. 3. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012.
- [29] DIXON, John C. **Tires, suspension and handling**. 2. ed. Warrendale: Society of Automotive Engineers (SAE), 1996.
- [30] BLUNDELL, Mike; HARTY, Damian. **The multibody systems approach to vehicle dynamics**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015.
- [31] HAPPIAN-SMITH, Julian (ed.). **An introduction to modern vehicle design**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.
- [32] WONG, J. Y. **Theory of ground vehicles**. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 2008.
- [33] SMITH, Carroll. **Tune to win**. Osceola: Motorbooks International, 1978.
- [34] GENTA, Giancarlo; MORELO, Lorenzo. **The automotive chassis: volume 1 – components design**. Dordrecht: Springer, 2009.
- [35] GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- [36] RAJAMANI, Rajesh. **Vehicle dynamics and control**. New York: Springer, 2006.
- [37] SAE INTERNATIONAL. **Formula SAE rules**. Warrendale, 2024.
- [38] SAE INTERNATIONAL. **Formula SAE rules**. Warrendale, 2018.
- [39] SAE INTERNATIONAL. **Formula SAE rules**. Warrendale, 2023.
- [40] SAE INTERNATIONAL. **Formula SAE rules**. Warrendale, 2025.
- [41] FLÓREZ SOTO. **Design of a double wishbone suspension and steering of a race car for the Formula SAE**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Mechanical Engineering) – Universidad de Ingeniería y Tecnología, Lima, 2019.

[42] CAMARÇO. **Revisão bibliográfica sobre deformação e absorção de energia em estruturas submetidas a impactos axiais: análise técnica e comparativa.** 2025.

[43] RACECAR ENGINEERING. **Suspensão duplo A.** Disponível em: <https://www.racecar-engineering.com/tech-explained/racecar-suspension/>. Acesso em: 9 dez. 2025.

[44] FORMULA UFMG. **Suspensão de um FSAE.** Disponível em: <https://ufmgformula.wixsite.com/formulaufmg/single-post/2016/07/05/saiba-mais-sobre-asuspens%C3%A3o-de-um-formula>. Acesso em: 9 dez. 2025.

[45] ANDREUCCI, Lorenzo. *Progetto e Sviluppo di Sospensioni e Sistema di Sterzo per Veicolo per Formula SAE.* Università di Pisa, Pisa, 2010.

[46] CUNHA, José Rafael Fernandes Carneiro da. **Desenvolvimento dos sistemas de suspensão e direção para veículos do tipo Formula SAE.**

[47] CARPINTEIRO, João Eduardo Palma. **Desenvolvimento do sistema de suspensão para o carro IFS03EE.**