UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

RENATO SILVA PEREIRA JUNIOR

MODELO COMPUTACIONAL DE UM JUMELO ARTICULADO PARA A DINÂMICA VEICULAR

OURO PRETO - MG
2022

RENATO SILVA PEREIRA JUNIOR

renato.junior1@aluno.ufop.edu.br

MODELO COMPUTACIONAL DE UM JUMELO ARTICULADO PARA DINÂMICA VEICULAR

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.

Professor orientador: DSc. Edson Alves Figueira Junior

Professor coorientador: DSc. Gustavo Paulinelli Guimarães

OURO PRETO – MG
2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

P436m Pereira Junior, Renato Silva.
Modelo computacional de um jumelo articulado para dinâmica veicular. [manuscrito] / Renato Silva Pereira Junior. - 2022.
76 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Edson Alves Figueira Junior Junior.
Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Paulinelli Guimarães Guimarães.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. SoldiWorks (Software). 2. Veículo - Conforto. 3. Veículos a motor - Molas e suspensão. 4. Mecânica - Vibração - Sistema massa-mola. 5. Simulação (Computadores) - Simulação Multi-Corpos. I. Guimarães, Gustavo Paulinelli Guimarães. II. Junior, Edson Alves Figueira Junior. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

Renato Silva Pereira Júnior

Modelo Computacional de um jumelo articulado para a dinâmica veicular

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 11 de outubro de 2022

Membros da banca

[DSc] - Edson Alves Figueira Júnior- Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
[DSc] - Gustavo Paulinelli Guimarães - Universidade Federal de Ouro Preto
[DSc] - Cláudio Márcio Santana - Universidade Federal de Ouro Preto
[DSc] - Diogo Antônio Sousa - Universidade Federal de Ouro Preto

Edson Alves Figueira Júnior, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 15/10/2022

Documento assinado eletronicamente por **Edson Alves Figueira Junior**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/10/2022, às 10:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Paulinelli Guimaraes**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/10/2022, às 15:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Claudio Marcio Santana**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 21/10/2022, às 10:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Diogo Antonio de Sousa**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/10/2022, às 13:42, 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 , informando o código verificador **0409532** e o código CRC **C1590C8F**.

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: (31)3559-1533 - www.ufop.br

Dedico este trabalho a minha mãe, Cláudia, pelo amor e apoio, que sempre esteve comigo nos melhores e piores momentos.

AGRADECIMENTO

Inicio agradecendo a minha mãe Cláudia por ser meu abrigo, pelo apoio incondicional e por ter batalhado tanto para garantir que eu concluísse esta etapa e todas as mulheres que contribuíram na minha vida e me fizeram quem eu sou hoje, especialmente as minhas avós “Salu” (i.m.) e “Miria” e minhas tias Márcia e Tânia (i.m.).

A minha irmã Isabella, por todos os conselhos e companheirismo e toda minha família, que sempre confiou e me suportou quando eu mais precisei.

Aos meus amigos Willian, Luís, Paulo, Medson e Lázaro que me proporcionaram extrem felicidade nos meus momentos de graduação.

Aos companheiros de Engenharia Mecânica, Nilton, Arlindo, Led, Uriel SemKappa e todos os representantes do Projeto Coxa.

A equipe FEMU, IVECO e ao ITV, onde me construí como profissional e o mais importante, criei amizades incríveis.

A minha casa, a república Diretoria, por todo o acolhimento, pelos momentos de “borraxada”, pelas nossas farras e as amizades de todos os alunos e ex-alunos.

A UFOP e ao DEMEC, pelo ensino de qualidade e gratuito, além de suas importantes contribuições para o meu crescimento acadêmico e profissional.

Por fim aos meus orientadores, Edson Alves e Gustavo Paulinelli, por sempre apoiarem e acreditarem no potencial de todos os seus alunos. Que bom que pude encontrar professores como vocês nessa jornada!

“Afirmar que se detém o conhecimento absoluto é se tornar monstruoso. O conhecimento é uma aventura interminável na borda da incerteza.”

Frank Herbert

R E S U M O

Este trabalho apresenta a análise de um jumelo articulado a partir da modelagem 3D de um sistema de suspensão de um veículo Chevrolet S10 ano 2017, através de elementos finitos, buscando descobrir a real eficácia do sistema. É levantado uma breve apresentação sobre dinâmica veicular e como esta influencia no conforto de rodagem percebido por um condutor ao utilizar um veículo, além de abordar os tipos de suspensões e seus componentes mais comuns de fabricação, dando enfoque em veículos de carga. É apresentado um modelo analítico com base em sistema de suspensão de feixe de molas do veículo estudado. Disto é determinado parâmetros de funcionamento e aplicações de carga dentro do sistema do veículo, durante a sua real aplicação. Através do *software SolidWorks* é realizada a modelagem 3D do conjunto original, sendo este submetido a análises de frequência, com foco de encontrar suas respectivas formas modais, e uma análise harmônica, podendo obter um espectro de frequência, onde é analisada sua amplitude. Um segundo modelo 3D do veículo é apresentado, mas sendo este com o jumelo articulado, aplicando-o as mesmas análises do conjunto original e suas respectivas respostas. Os modelos analisados são comparados utilizando os seus espectros de frequência, observando a diferença de amplitude entre o modelo real e o novo sistema com o jumelo articulado. Quando comparados os dispositivos, o jumelo articulado apresenta uma redução de amplitude ao modelo original, sendo este um indício de melhora de conforto proposto pelo produto. Com as limitações do sistema são apresentados trabalhos futuros de simulações para comprovar a real melhoria do sistema.

Palavras-chave: *SolidWorks* - Simulação Multi-Corpos. Veículos a motor - Suspensão veicular – Dinâmica veicular. Vibrações mecânicas – Sistema massa-mola. Conforto veicular.

ABSTRACT

This work presents the analysis of an articulated shackle from the 3D modeling of a suspension system of a Chevrolet S10 year 2017 vehicle, through finite elements, seeking to discover the real effectiveness of the system. A brief presentation on vehicle dynamics is raised and how it influences the ride comfort perceived by a driver when using a vehicle, in addition to addressing the types of suspensions and their most common manufacturing components, focusing on cargo vehicles. An analytical model based on the vehicle's spring-beam suspension system is presented. From this, operating parameters and load applications are determined within the vehicle's system, during its actual application. Through the SolidWorks software, the 3D modeling of the original set is performed, which is subjected to frequency analysis, with a focus on finding their respective modal forms, and a harmonic analysis, being able to obtain a frequency spectrum, where its amplitude is analyzed. A second 3D model of the vehicle is presented, this one with the articulated jib, applying the same analyzes of the original set and their respective responses. The analyzed models are compared using their frequency spectra, observing the difference in amplitude between the real model and the new system with the articulated shackle. When comparing the devices, the articulated shackle presents a reduction in amplitude to the original model, which is an indication of improved comfort proposed by the product. With the limitations of the system, future simulation works are presented to prove the real improvement of the system.

Key-words: SolidWorks – 3D modeling. Multibody Simulation. Motor vehicles - Vehicle suspension - Vehicle dynamics. Mechanical Vibrations. Comfort.

LISTA DE SÍMBOLOS

Cs	Coeficiente de amortecimento da suspensão;
c	Coeficiente de amortecimento;
CG	Centro de gravidade;
F	Forças atuantes no sistema;
f	Frequência;
Hz	Hertz;
Ks	Constante de rigidez da suspensão;
Kt	Constante de rigidez do pneu;
k	Constante de rigidez;
Kg	Quilogramas;
M	Massa suspensa;
m	Massa não suspensa;
m1	¼ das massas das rodas;
m2	¼ da massa da carroceria;
mm	Milímetros;
N	Newton;
s1	Deslocamento da roda esquerda;
s2	Deslocamento da roda direita;
u	Excitações do sistema;
x	Eixo longitudinal ao veículo (eixo de rolagem);
x(t)	Deslocamento vertical;
y	Eixo transversal ao veículo (eixo de arfagem);
Z	Deslocamento atuantes no sistema

z	Eixo vertical ao veículo (eixo de guinada);

LISTA DE SIGLAS

CAE: Engenharia Auxiliada por Computador (Computer-aided Engineering)

FENABRAVE: Federação Nacional de Veículos Automotores

ISO: Organização Internacional de Normalização (International Organization for Standardization)

MBS: Sistemas de Multicorpos (Multibody Systems)

PIB: Produto Interno Bruto

SAE: Sociedade dos Engenheiros Automotivos (Society of Automotive Engineers)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistema de coordenadas, graus de liberdade e planos importantes na dinâmica de um veículo. 6

Figura 2: Sistema de eixos e momentos de inércia propostos pela SAE. 7

Figura 3: Subproblemas na dinâmica vertical. 8

Figura 4: O sistema dinâmico do *ride*. 8

Figura 5: Modelo 1/4 de carro. 9

Figura 6: Modelo simplificado de um conjunto chassi e suspensão. 11

Figura 7: Suspensão de eixo rígido. 12

Figura 8: Estrutura da suspensão MacPherson. 13

Figura 9: Suspensão frontal independente do tipo braço de arrasto. 14

Figura 10: Suspensão frontal duplo A de um veículo comercial leve Volkswagen. 15

Figura 11: Supensão traseira Multi-Link. 16

Figura 12: Molas helicoidais. 17

Figura 13: Mola Semielíptica convencional. 17

Figura 14: Diagrama de um amortecedor de tubo duplo. 19

Figura 15: Processo de estudo de caso linear. 24

Figura 16: Chevrolet S10 2012. 25

Figura 17: Modelo de picape utilizada como base do estudo. 26

Figura 18: Desenho 3D Chevrolet S10 2013. 27

Figura 19: Desenho de 1/3 de chassi. 28

Figura 20: Reforço na longarina posterior. 28

Figura 21: Reforço nos perfis U do chassi. 29

Figura 22: Modelo 3D do feixe de molas. 30

Figura 23: Determinação das propriedades do material. 30

Figura 24: Jumelo original Chevrolet S10. 31

Figura 25: Modelo 3D do jumelo. 31

Figura 26: Posicionamento dos amortecedores traseiros. 32

Figura 27: Jumelo articulado. 33

Figura 28: Modelo 3D do jumelo articulado. 34

Figura 29: Montagem 3D da suspensão traseira. 35

Figura 30: Plotagem de visualização de contato do conjunto chassi-suspensão. 36

Figura 31: Adição do contato de componente unido no feixe de molas. 36

Figura 32: Adição do contato de componente unido na extremidade do feixe de molas. 37

Figura 33: Adição do contato de componente do tipo permitir penetração entre o jumelo e a longarina. 38

Figura 34: Conexões mecânicas de pinos. 38

Figura 35: Massa distribuída aplicada ao chassi. 39

Figura 36: Malha aplicada ao modelo 3D. 39

Figura 37: Propriedades do estudo de forma modal. 40

Figura 38: Propriedades do estudo da análise harmônica. 41

Figura 39: Décima forma modal deformada do sistema. 47

Figura 40: Aplicação da força no feixe de molas. 47

Figura 41: Fixação da geometria do chassi. 48

Figura 42: Determinação do nó de análise de amplitude. 48

Figura 43: Espectro de frequência do jumelo original. 49

Figura 44: Adição das conexões de pino no jumelo articulado. 50

Figura 45: Décima segunda forma modal deformada do sistema com o jumelo articulado. 51

Figura 46: Espectro de frequência do jumelo articulado. 52

Figura 47: Comparação dos espectros de frequência. 53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação entre as formas de abordagem. 22

Tabela 2: Variáveis e indicadores do estudo. 43

Tabela 3: Frequências ressonantes do sistema livre-livre. 46

Tabela 4: Frequências ressonantes do sistema com jumelo articulado livre-livre. 50

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1
1.1 Formulação do Problema 1
1.2 Justificativa 3
1.3 Objetivos 3
1.3.1 Geral 3
1.3.2 Específicos 3
1.4 Estrutura do Trabalho 4

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 5
2.1 Dinâmica veicular 5
2.1.1 *Ride* e conforto veicular 8
2.2 Sistemas de suspensão 10
2.2.1 Suspensão de eixo rígido 11
2.2.2 Suspensão independente 12
2.2.3 Suspensão MacPherson 13
2.2.4 Suspensão do tipo braço de arrasto 13
2.2.5 Suspensão Duplo A 14
2.2.6 Suspensão Multi-Link 15
2.3 Componentes de suspensão 16
2.3.1 Molas 16
2.3.2 Amortecedores 17
2.4 Simulação Multi-Corpos 19

3 METODOLOGIA 21
3.1 Tipo de pesquisa 21
3.2 Materiais e métodos 24
3.2.1 Aquisição de dados 24
3.2.2 Modelagem e análise 25
3.2.3 Visão geral do veículo 25
3.2.4 Chassi 26
3.2.5 Suspensão 29
3.2.6 Jumelo articulado 32
3.2.7 Construção do conjunto original 34

3.2.8 Ambiente de simulação 40
3.3 Variáveis e indicadores 42
3.4 Instrumento de coleta de dados 43
3.5 Tabulação de dados 44
3.6 Considerações finais 44

4 RESULTADOS 45
4.1 Análise do conjunto original 45
4.1.1 Forma modal 45
4.1.2 Análise harmônica 47
4.2 Análise do conjunto com o jumelo articulado 49
4.2.1 Preparação do conjunto 49
4.2.2 Forma modal 50
4.2.3 Análise harmônica 51
4.3 Comparação dos resultados 52

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES 54
5.1 Conclusões 54
5.2 Trabalhos futuros 54

6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA 56

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

Segundo Schroeder e Castro (1996), o Brasil, na década de 50, passou por um alto crescimento industrial juntamente com o apoio de políticas de transporte, incentivo da implantação da indústria automobilística no país e uma baixa nos valores dos combustíveis derivados de petróleo. Nas palavras de Barros (2022, p. 361), “atualmente, o modal rodoviário possui uma predominância na matriz de transporte de cargas e passageiros do Brasil, sendo responsável por mais de 50% do PIB do setor de transportes”.

Com o decorrer dos tempos, os veículos de carga e de grande porte, passaram por evoluções com o foco de visar sua eficiência e conforto, para isto foi necessária uma separação dos projetos e componentes mecânicos dos veículos comuns de passeio (CLARKE, 1989).

De acordo com Dishant (2017, p. 1), “suspensão é um arranjo de pneus, amortecedores, molas, absorvedores e “links”, que conectam o veículo as rodas, permitindo o movimento relativo entre os dois”. O mesmo autor diz que, a suspensão também deve melhorar tanto o manuseio na estrada quanto a qualidade de rodagem do veículo e carga.

Segundo Rao (2008), vários sistemas complexos de vibração, podem ser resumidos em sistema massa-mola de um grau de liberdade, onde consideramos uma massa equivalente e uma rigidez equivalente das molas. O mesmo pode ser realizado em uma suspensão veicular, transformando um complexo sistema em um simples esquema vibracional de molas e amortecedores.

Bosch (2004, p. 755) preleciona que:

> Molas e amortecedores reagem sobretudo às oscilações verticais do veículo, eles são determinantes para o conforto (solicitações oscilatórias sobre passageiros e carga) e para a segurança de tráfego (solicitações da pista e flutuação da carga da roda). Vários sistemas de massa – mola – amortecedor servem para ilustrar o modo como os componentes do veículo atuam em conjunto.

Por Milliken (1995), molas são elementos que utilizam a propriedade elástica do material em torção para produzir uma taxa linear de variação da força com o deslocamento. De acordo com Shiotsuki (2009), a função da mola em um sistema de suspensão se resume em armazenar energia, além de suportar o peso estático do veículo.

Se nenhuma energia for perdida ou dissipada por atrito ou outra resistência durante a oscilação, a vibração é conhecida como vibração não amortecida (RAO,2009). Ainda segundo o mesmo autor, um sistema massa-mola tende a vibrar infinitamente após um movimento inicial, para isto são utilizados amortecedores.

De acordo com Milliken (1995), os amortecedores têm como função suprimir a oscilação e controlar o movimento da massa suspensa devido às acelerações laterais e longitudinais fornecidas pelo rodar do veículo.

Shiotsuki (2009) explica que, como a suspensão tem como uma de suas funções o suporte de carga, para veículos de grande porte e carga, utiliza-se o sistema de molas do tipo feixe de lâminas, conhecido popularmente como “feixe de molas”. Pelo mesmo autor, as molas são compostas por lâminas de aço sobrepostas e de tamanho variável, alinhadas por clipes e unidas por um parafuso no centro das mesmas.

Assim, o feixe trabalha como um sistema de molas do veículo, sobre esforços de flexo-torção, fornecendo uma alta rigidez ao sistema de suspensão, necessário para o uso em transporte de cargas (KOTHARI, 2014). Devido à alta rigidez fornecida do sistema, justificado pelo alto índice de carga dos veículos, o feixe de molas quando descarregado tem a tendência de apresentar altas oscilações no sistema, provocando instabilidade e desconforto no rodar.

Rao (2008, p. 6), explica que “sempre que a frequência natural de vibração de uma estrutura ou máquina coincidir com a frequência de excitação externa, ocorre um fenômeno conhecido como ressonância, que resulta em amplitudes excessivas e até falhas do equipamento”. Este efeito explica o desconforto no veículo, já que a frequência natural de uma estrutura está ligada a massa da mesma, sendo elas inversamente proporcionais, ou seja, quanto menor a massa maior a frequência natural, assim a frequência de rodagem do veículo se aproxima desta faixa, provocando aumento de amplitude do sistema de suspensão (RAO, 2008).

Pelas palavras de Kothari (2014), o feixe de mola pode ter suas duas extremidades acopladas diretamente à estrutura veicular, assim como uma de suas extremidades pode ser acoplada ao chassi por meio de uma haste, um braço oscilante curto, denominado jumelo. O autor complementa que, tal braço aumenta a tendência do feixe se alongar quando o mesmo é solicitado sob o efeito de compressão em sua extremidade inferior e também possui como

objetivo suavizar a ação do feixe de molas. Mesmo com o equipamento instalado, o veículo, em menor intensidade, tende a ter o efeito de grandes amplitudes.

Assim, no mercado surgem várias alternativas aos componentes originais, que prometem um maior conforto em veículos de carga, entretanto ainda não existem estudos capazes de comprovar o funcionamento destes, diante disto:

O dispositivo estudado tem capacidade de oferecer vantagens em termos de dinâmica veicular, quando comparado ao sistema original?

1.2 Justificativa

Segundo a Federação Nacional de Distribuição de Veículos Automotores - FENABRAVE (2021), o mercado brasileiro de carros de passeio tem cada vez mais procurado veículos mistos e de carga (pequeno e médio porte), para a utilização como carros de passeio, ocupando 22 posições do ranking dos 50 carros mais vendidos no Brasil em 2021.

Tendo em vista melhorar o conforto e rodar dos veículos de carga de pequeno e médio porte no país, o estudo tem como objetivo avaliar o jumelo articulado em si, propondo um melhor entendimento do real benefício da tecnologia embarcada no equipamento.

A solução de estudo de um dispositivo que ofereça mais conforto e estabilidade dos seus ocupantes se mostra relevante em relação ao crescimento do mercado nacional, sendo necessário avaliar por meios de simulações computacionais, testes físicos e análises de engenharia o equipamento em si, garantindo uma base teórica fundamentada sobre o jumelo articulado e sobre sua real eficiência.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Elaborar um modelo computacional do real benefício do jumelo articulado em carros de carga de pequeno e médio porte, em relação à dinâmica veicular.

1.3.2 Específicos

- Realizar um estudo teórico sobre dinâmica veicular e vibrações mecânicas do sistema de suspensão de veículos de carga de pequeno e médio porte;

- Construir um modelamento computacional de um sistema convencional da suspensão do veículo analisado, junto com o modelamento com o equipamento em si no *software SolidWorks*;
- Elaborar uma revisão bibliográfica, sobre metodologia de trabalho consequentemente, esboçando os tipos de pesquisa, variáveis e indicadores presentes neste trabalho;
- Desenvolver uma simulação computacional do sistema no *software SolidWorks*, analisando a dinâmica veicular do sistema de suspensão.
- Comparar os resultados da simulação computacional do sistema de suspensão convencional do veículo ao do sistema com o equipamento instalado, observando a sua real eficiência.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos, onde no primeiro capítulo é apresentado a formulação do problema, a justificativa para a realização do trabalho e seus objetivos geral e específicos.

O segundo capítulo consiste em uma revisão bibliográfica, abordando os seguintes itens: a base fundamental da dinâmica veicular e como ela se relaciona com o conforto, o breve resumo sobre vibração aplicada a veículos, os tipos de sistema suspensão comumente utilizados e os componentes de uma suspensão veicular.

O terceiro capítulo aborda a metodologia utilizada para o desenvolvimento do estudo do sistema escolhido, baseado em simulações computacionais.

No quarto capítulo, é apresentado os resultados da elaboração dos sistemas com e sem o equipamento estudado e sua preparação para a submissão de testes. Com isto, por meio de simulação de elementos finitos, é feita uma comparação de modelos e análise das respostas de amplitude.

No quinto capítulo é realizada a conclusão do trabalho, com base nos resultados adquiridos no quarto capítulo, avaliando a real eficácia do componente, além de propor trabalhos e testes futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Dinâmica veicular

Pelas palavras de Jacobson (2016), a dinâmica de veículos é um assunto de engenharia que engloba o movimento do veículo em operações relevantes do usuário, aplicado em todos os tipos de veículos e usando teorias e métodos da engenharia mecânica, controles de sinais computacionais e a ciência comportamental humana, sendo possível realizar projetos e verificação de requisitos necessários em um projeto veicular.

A literatura propõe que para desenvolver um estudo de dinâmica em um veículo é necessário observar como um sistema axial de movimento, determinando eixos e graus de liberdade ao modelo, onde é possível condensar o veículo em três grandes movimentos de dinâmica veicular: dinâmica longitudinal, lateral e vertical.

Por Ruthes (2016), a dinâmica longitudinal estuda o movimento longitudinal no eixo x e as rotações em torno do eixo y em resposta a torques aplicados às rodas. O mesmo autor explica que, a dinâmica vertical compreende o movimento vertical em torno do eixo z e as rotações em torno do eixo x (*roll*) e em torno do eixo y (*pitch*), ambas em função de irregularidades do pavimento. O autor aborda também que, a dinâmica lateral envolve o movimento lateral do veículo em torno do eixo y e as rotações nos eixos x e z, ambas como resultado da atuação do volante.

A Figura 1 mostra o sistema de coordenadas e os movimentos em torno dos eixos propostos pela Organização Internacional de Normalização (ISO) (JACOBSON, 2016).

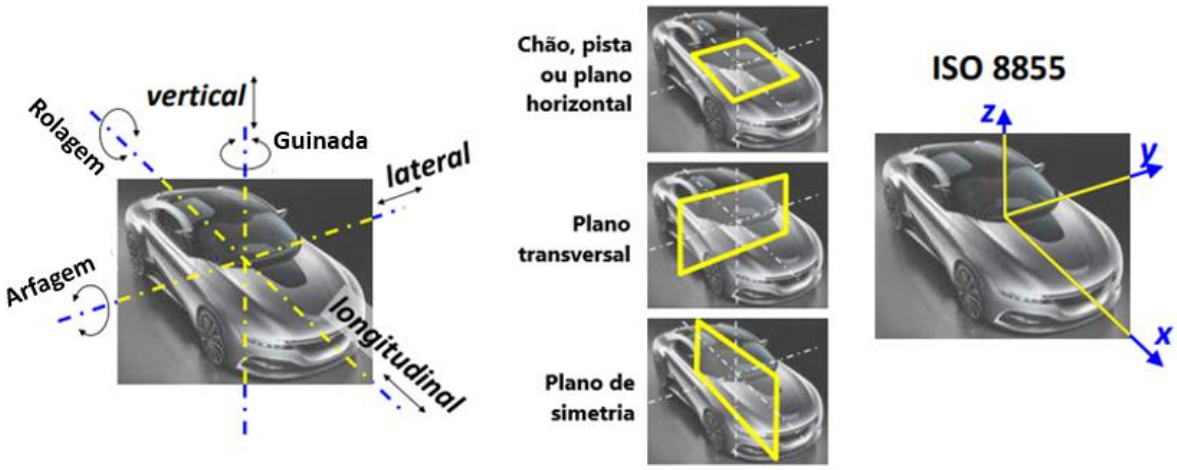

Figura 1: Sistema de coordenadas, graus de liberdade e planos importantes na dinâmica de um veículo.
Fonte: Adaptado de Jacobson (2016).

A Figura 1, do lado esquerdo, mostra os principais movimentos e graus de liberdades, que um veículo, do tipo terrestre, pode ter dentro da dinâmica veicular, além dos seus planos e rotações em torno dos eixos, do lado direito, propostos pela ISO 8835.

Como um veículo a motor é constituído por uma grande quantidade de componentes, é necessário criar uma concentração dos mesmos para análises mais elementares de todo o conjunto veicular. Segundo Gillespie (1992), em uma representação analítica de um veículo motorizado todos os componentes se movem em conjunto, como exemplo em uma situação de frenagem, onde o veículo inteiro diminui a sua velocidade como uma unidade e não somente os componentes do sistema de freios.

A literatura explica também que, para conjuntos deste tipo é necessário a utilização de um centro de massa, no caso de veículos terrestres localizado no centro de gravidade, onde é aplicada todas as forças e momentos de inércia do veículo. A Figura 2 demonstra a representação deste centro de massa aplicado na dinâmica veicular

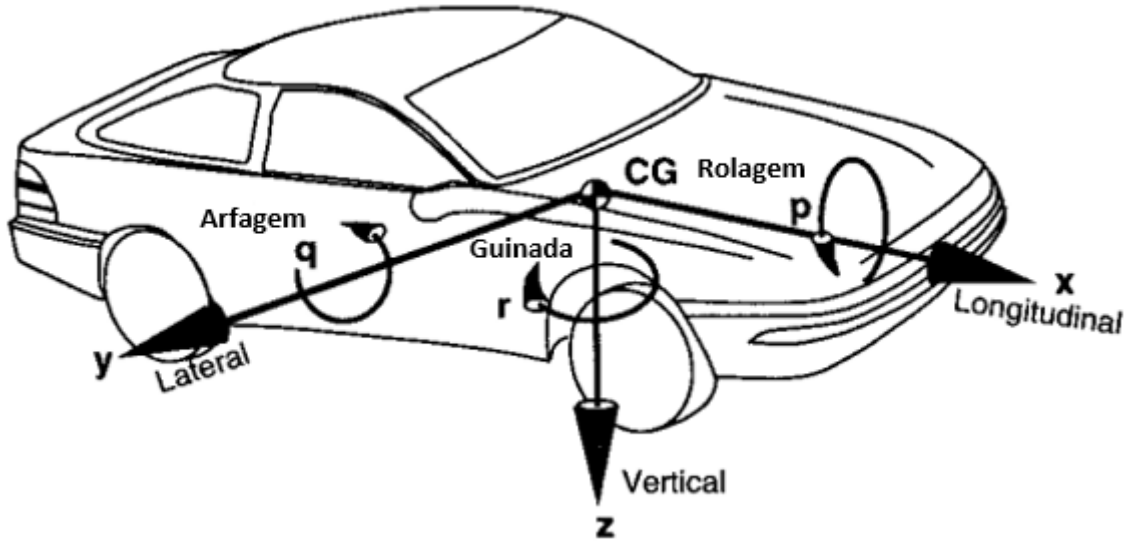

Figura 2: Sistema de eixos e momentos de inércia propostos pela SAE.
Fonte: Adaptado de Gillespie (1992).

Na Figura 2, é possível observar o centro de gravidade do veículo, massa concentrada do mesmo, e os movimentos de dinâmica veicular no mesmo.

Gillespie (1992, p. 7), acrescenta que:

> Para aceleração, frenagem e a maioria das análises giratórias uma massa é suficiente. Para análises de rodagem, é necessário tratar as rodas como centros de massas separadas. Neste caso o centro de massa que representa a carroceria é a "massa suspensa" e as rodas são denotadas como "massa não suspensa".

A dinâmica vertical segundo Neto (2005, p. 64), "estuda o comportamento do veículo e de seus ocupantes quando eles estão submetidos a excitações, podendo ser externas (via) ou internas (roda, motor, transmissão)".

Jacobson (2016, p. 239) explica que, "a dinâmica vertical é necessária desde que os veículos são operados em estradas reais, e estradas reais não são perfeitamente suaves". O autor complementa que o sistema de suspensão de um veículo compreende a interface entre a carroceria a superfície da rodovia, exercendo o papel na isolação de vibrações.

Ruthes (2016) explica que, as vibrações é um dos critérios mais importantes a respeito de fabricação e projeto de veículos, sendo suas faixas de vibração:

- $0 < f < 25$ Hz (Sensação táctil ou "*ride*");
- $25 < f < 100$ Hz (Sensação de aspereza ou "*harshness*");
- $25 < f < 20000$ Hz (Sensação de ruído audível ou "*noise*").

A dinâmica vertical, geralmente é dividida em subproblemas, sendo (RUTHES, 2016):

- Modelagem e caracterização das fontes de excitação;
- Previsão do movimento do veículo;
- Previsão e caracterização da resposta dos passageiros a vibrações.

De acordo com Neto (2005), estes subproblemas podem ser demonstrados em diagramas de blocos, mostrado na Figura 3.

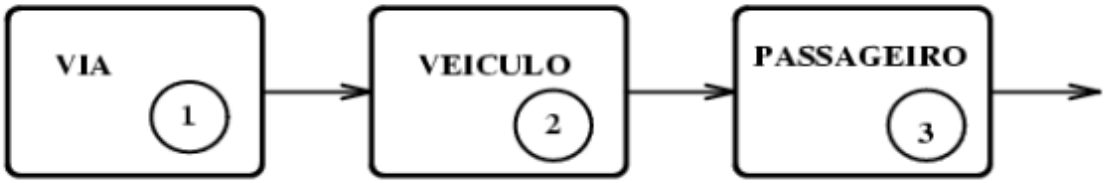

Figura 3: Subproblemas na dinâmica vertical.
Fonte: Neto (2005).

A Figura 3 demonstra o modelo dos subproblemas na dinâmica vertical, separando por irregularidades da via, modelos simples ou complexos do veículo e a tolerância do ser humano a vibrações.

2.1.1 *Ride* e conforto veicular

Por Jacobson (2016), *ride* é o conforto que os ocupantes do veículo experimentam, de oscilações estacionárias, quando o veículo viaja sobre um pavimento com uma certa irregularidade vertical em uma velocidade específica, mostrado na Figura 4. As medições do *ride* são definidas, pelo menos, incluindo as acelerações verticais do motorista (ou seu assento).

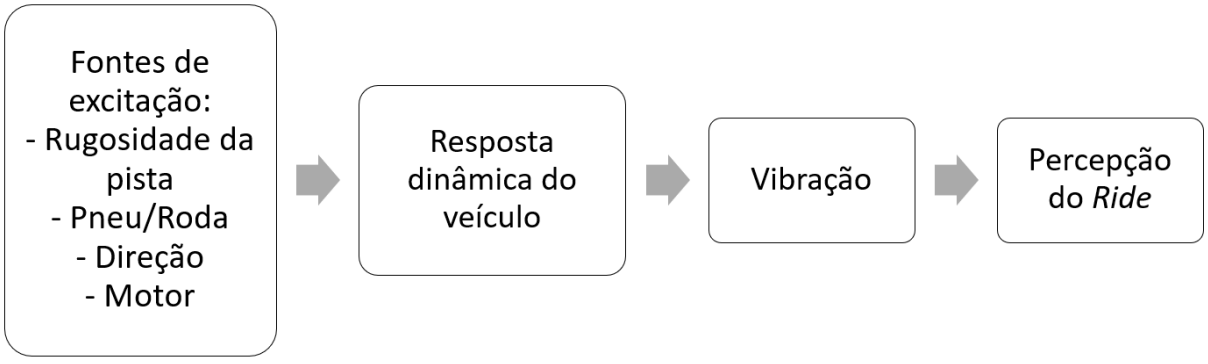

Figura 4: O sistema dinâmico do *ride*.

Fonte: Adaptado de Gillespie (1992).

Jacobson (2016) complementa que o *ride* é dividido em dois, sendo:

- *Ride* primário: O movimento da carroceria do veículo no andar de sua suspensão (movimentos verticais, e giros nos eixos transversais e longitudinal ≈0 < f < 4 Hz).
- *Ride* secundário: O movimento da carroceria do veículo sobre as frequências naturais (≈ 4 < f < 25 Hz).

O estudo de vibração é o parâmetro mais importante no julgamento da qualidade de construção de um carro (BOSCH, 2004). Ruthes (2016) explica que existem inúmeras fontes de vibração sobre um veículo comercial, podendo ser classificadas como internas e externas, dentro destas se conclui que:

- Vibrações externas: são aquelas geradas pelas irregularidades da pista de rodagem;
- Vibrações internas: são devidas as deformações e desbalanceamentos de rodas e pneus e decorrentes do conjunto motor.

Para o estudo de vibrações do veículo é necessário a utilização do modelo ¼ de carro, representando apenas uma das rodas com uma suspensão, e ¼ da massa do mesmo, mostrado na Figura 5.

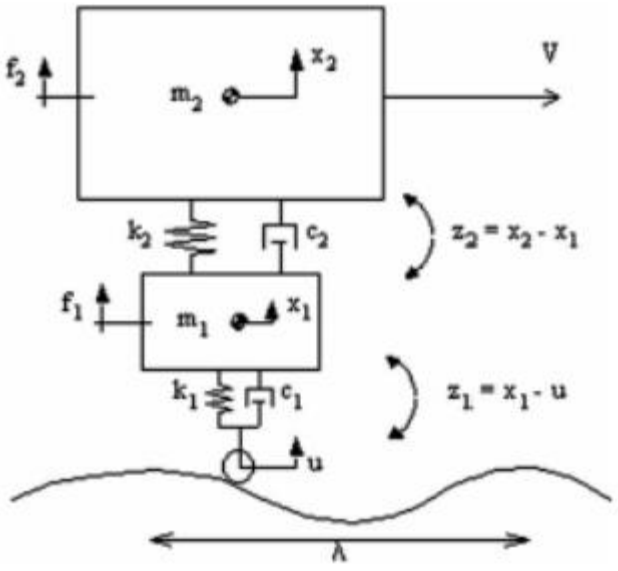

Figura 5: Modelo 1/4 de carro.
Fonte: Barbosa (2011).

O modelo esboçado na Figura 5 demonstra uma representação de um sistema de suspensão para análise do *ride*, onde o bloco m_2 representa ¼ da massa da carroceria do veículo e m_1 ¼ da massa das rodas, pneus e conjunto de suspensão (LIMA, 2014). O autor complementa que, as forças aplicadas ao sistema estão representadas como f_1 e f_2, u a entrada de excitações no sistema, k_1 e k_2 a rigidez das molas e pneus, c_1 e c_2 os coeficientes de amortecimento e, por fim, $x_1(t)$ e $x_2(t)$ os deslocamentos verticais.

A frequência natural da suspensão, segundo Ruthes (2016), é considerada o principal critério no que se refere ao conforto veicular, sendo a partir dela possível determinar as magnitudes e direções das vibrações geradas pelo *ride*.

Em consideração a Figura 5, segundo Gillespie (1992) podemos determinar a frequência natural do veículo sem a presença de amortecimento em cada canto do veículo, sendo demonstrado na equação 1.

A partir desta definição Gillespie (1992) aponta também que, a frequência natural recomendada para veículos de passeio, está na faixa de 1 a 1,5 Hz com coeficiente de amortecimento em torno de 0,4.

A ISO 2631-1 (1997) normatiza a definição de quantização da vibração do corpo humano, considerando a frequência de 0,5 Hz a 80 Hz com efeitos na saúde e 0,1Hz a 0,5Hz a sensação de enjoo.

Desta maneira, o estudo do conforto veicular é necessário para garantir o bem-estar dos ocupantes do veículo, determinando um sistema de suspensão de qualidade, logo também um carro com um bom projeto de engenharia, veículos com faixas de *ride* aceitáveis ao corpo humano.

2.2 Sistemas de suspensão

Segundo Stone e Ball (2004), um sistema de suspensão tem somente a função de prover o conforto do veículo, mas a mesma tem várias funcionalidades como:

- Isolar os passageiros e carga de vibrações e choques causados pelas irregularidades da superfície da estrada;
- Melhorar a mobilidade do veículo, garantindo uma melhor estabilidade e resistência a rolagem do chassi;

- Garantir o controle do veículo, reagindo as forças de aceleração, frenagem e situações de curvas, mantendo o melhor contato do pneu com o solo.

Um modelo de vibração complexo, como uma suspensão automotiva, pode ser representado como um modelo linear, mostrado na Figura 6, facilitando a visualização do movimento do sistema, permitindo soluções matemáticas simples de serem manipuladas (GILLESPIE, 1992).

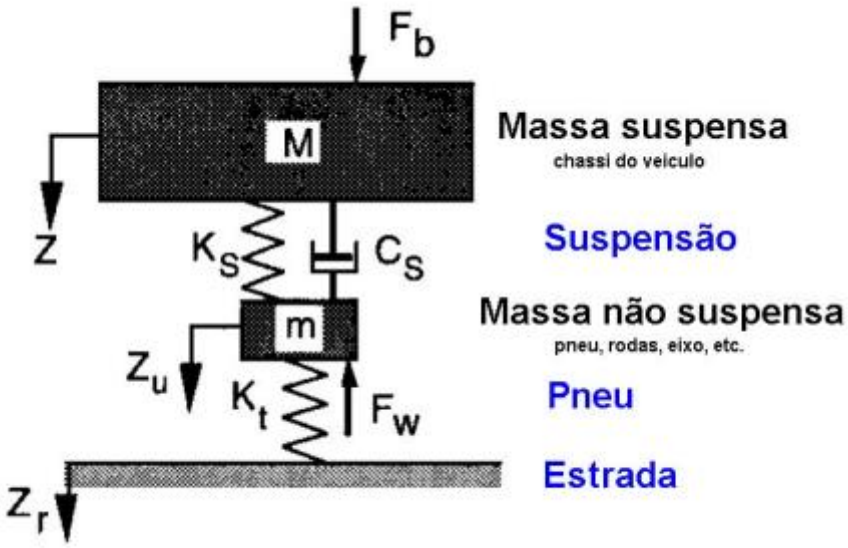

Figura 6: Modelo simplificado de um conjunto chassi e suspensão.
Fonte: Adaptado de Gillespie (1992).

A Figura 6 representa um modelo de suspensão simplificado conhecido como *quarter car*, onde K_s e K_t são constantes de rigidez, C_s uma constante de amortecimento, M e m as massas suspensa e não suspensa e Z e F os deslocamentos e forças atuantes no sistema, respectivamente.

Para um melhor entendimento da dinâmica vertical de um sistema complexo como o de suspensão, é necessário conhecer as variações comercialmente utilizadas do mesmo. Desta maneira este trabalho apresenta os tipos de suspensão existentes, com enfoque em conforto e segurança do veículo.

Os sistemas de suspensão comercialmente utilizados se distinguem em dois grupos, eixos rígidos ou suspensões independentes.

2.2.1 Suspensão de eixo rígido

A suspensão de eixo rígido, ou suspensão dependente, é comumente utilizado em veículos pelo seu baixo custo de produção e simples construção (REIMPELL, 2001). Esta

apresenta as rodas ligadas diretamente ao eixo, transmitindo o movimento da pista para a roda oposta ligada ao mesmo como mostra a Figura 7.

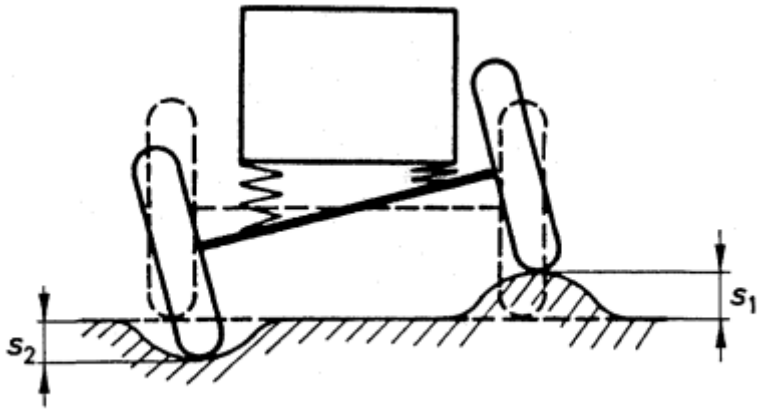

Figura 7: Suspensão de eixo rígido.
Fonte: Reimpell (2001).

O movimento de uma suspensão de eixo rígido é mostrado na Figura 7, podendo observar o deslocamento s_1, ocasionado por imperfeições na pista, e a sua interferência na roda oposta através do eixo demonstrado em s_2.

Este tipo de suspensão não afeta o ângulo de câmber durante e rolagem da carroceria, além de manter o alinhamento das rodas prevenindo o desgaste de pneus, considerada estas suas maiores vantagens em relação a outros sistemas (GILLESPIE, 1992).

2.2.2 Suspensão independente

Ao contrário das suspensões de eixo rígido, a suspensão independente possibilita o movimento individual da roda, não afetando a dinâmica da sua oposta (REIMPELL, 2001). Ainda segundo o mesmo autor, a suspensão independente tem como principais vantagens:

- Pouca necessidade de espaço;
- Possível uma mudança de convergência cinemática, tendendo ao subesterço;
- Fácil dirigibilidade;
- Baixo peso;
- Nenhuma influência na roda oposta.

Paralelo ao eixo rígido existem vários modelos e configurações de suspensões independentes, sendo descrito a seguir as mais comuns comercialmente.

2.2.3 Suspensão MacPherson

A suspensão do tipo MacPherson, demonstrada na Figura 8, é a configuração mais utilizada comercialmente por montadoras mundialmente, principalmente em veículos de pequeno e médio porte com tração dianteira (RUTHES,2016).

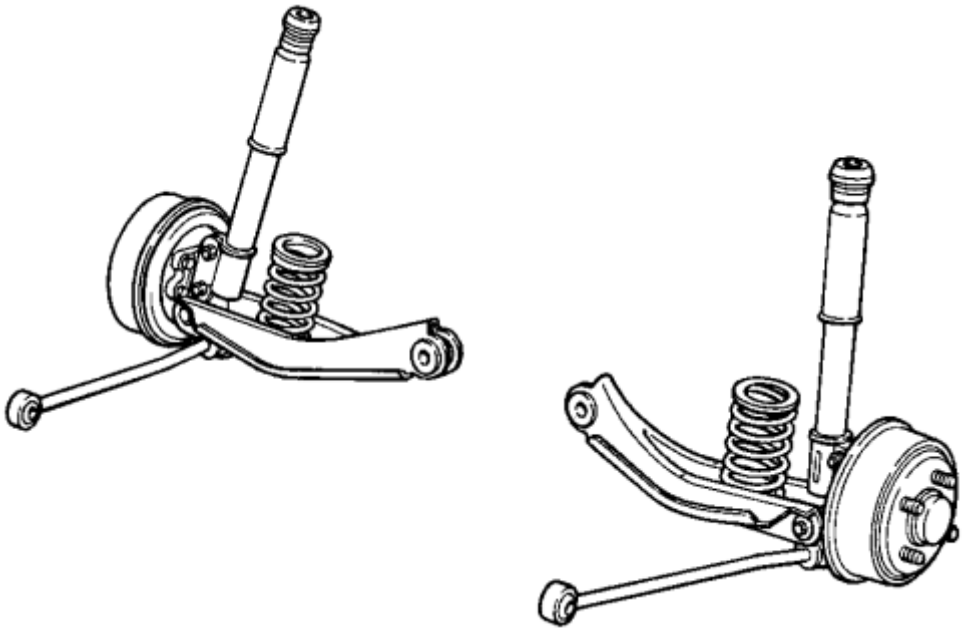

Figura 8: Estrutura da suspensão MacPherson.
Fonte: Gillespie (1992).

Como demonstrado na Figura 8, esta configuração de suspensão pelas palavras de Gillespie (1992), é um elemento telescópico que incorpora o amortecedor as rodas por um suporte na extremidade inferior, mantendo as rodas na direção da curva. O mesmo autor complementa que, a extremidade superior do sistema, é fixada na carroceria ou chassi.

A principal vantagem desta configuração é a facilidade de montagem do sistema, porque segundo Reimpell (2001), todas as peças da suspensão e direção do veículo, podem ser combinadas em somente um conjunto.

2.2.4 Suspensão do tipo braço de arrasto

Um dos mais simples e econômicos designs de uma suspensão frontal independente, é o braço de arrasto, usado pela Volkswagen e Porsche durante o corrimento da segunda guerra mundial (GILLESPIE, 1992). A suspensão do tipo braço de arrasto é mostrada na Figura 9.

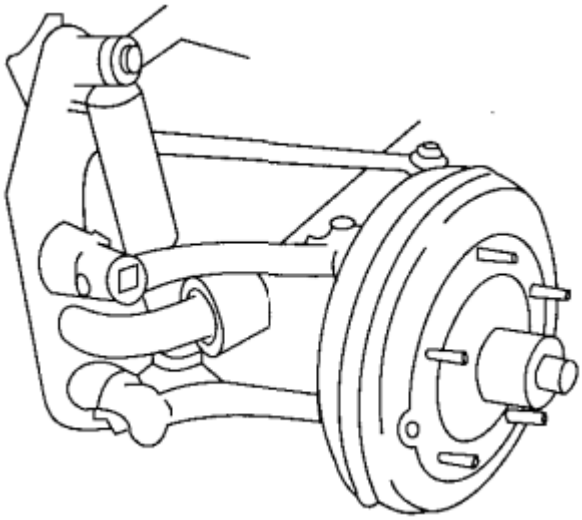

Figura 9: Suspensão frontal independente do tipo braço de arrasto.
Fonte: Gillespie (1992).

A Figura 9 demonstra uma suspensão frontal do tipo braço de arrasto aplicada em um veículo, onde nesta configuração utiliza braços paralelos equivalentes conectados nas extremidades dianteiras para as barras de torção laterais, fornecendo o efeito de mola.

2.2.5 Suspensão Duplo A

A suspensão Duplo A ou *short long arm* (SLA), é comumente utilizada pela sua facilidade de projeto e baixo peso, Gillespie (1992) explica que esta configuração, “era um design muito comum de suspensão frontal nos carros americanos após a segunda guerra mundial, utilizando dois braços de controle para fixar as rodas”, como mostrado na Figura 10.

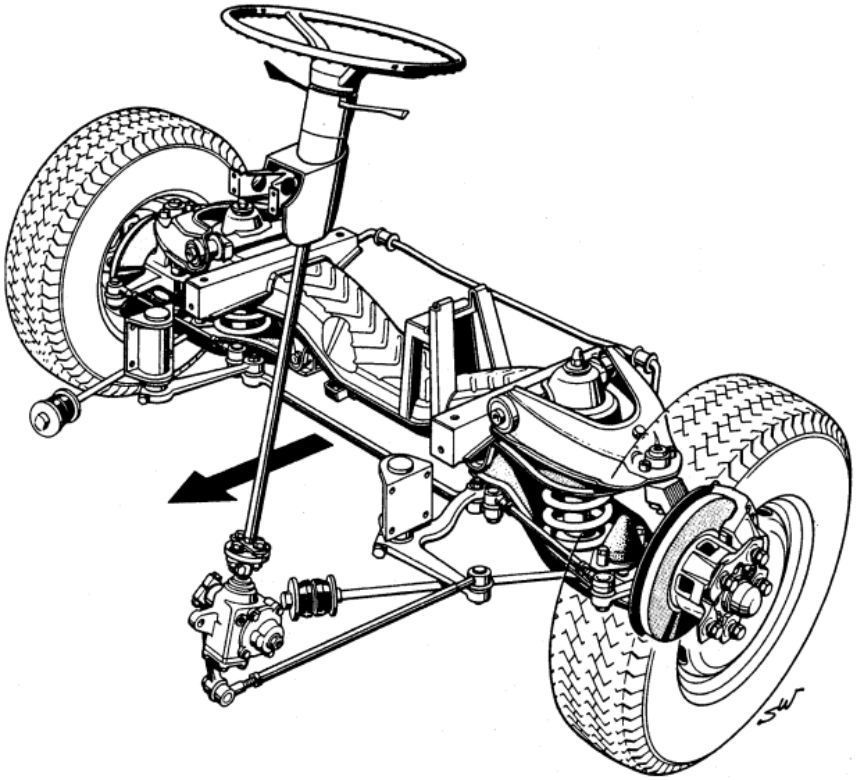

Figura 10: Suspensão frontal duplo A de um veículo comercial leve Volkswagen.
Fonte: Reimpell (2011).

Na Figura 10 é demonstrado a suspensão frontal utilizada nos modelos Lt 28 a 35 da Volkswagen do tipo duplo A (ou *A-arm*). Esta configuração consiste em dois braços transversais em cada lado do veículo, com a forma de “A” sobrepostos (REIMPELL, 2011).

2.2.6 Suspensão Multi-Link

A suspensão Multi-Link, mostrada na Figura 11, vem se tornando altamente popular na suspensão traseira dos veículos.

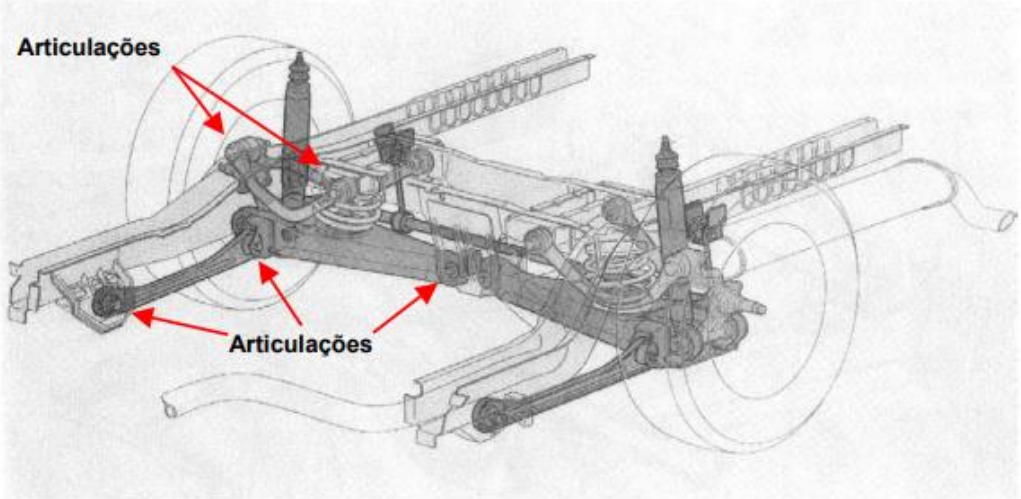

Figura 11: Supensão traseira Multi-Link.
Fonte: Freitas (2006).

A Figura 11 demonstra a suspensão traseira dos veículos Ford *Taurus* e *Sable*, caracterizada pela articulação nas conexões existentes nas pontas das barras, onde é possível eliminar os momentos fletores (RUTHES, 2016).

2.3 Componentes de suspensão

Para melhor entendimento das configurações de suspensão apresentadas no tópico anterior, é necessário a compreensão dos elementos comumente utilizados nos sistemas de suspensões veiculares.

2.3.1 Molas

As molas segundo Arcanjo (2008), são um elemento ou uma associação de elementos capazes de assumirem notáveis deformações elásticas quando submetidas a forças ou momentos, armazenando energia potencial elástica.

No cenário automotivo Diniz (2014, p. 36) salienta que, “na suspensão a mola tem o papel de suportar as cargas impostas ao veículo, sendo determinante no comportamento dinâmico global, que possui a capacidade de caracterizar os movimentos relativos do chassi e do pneu”.

As molas helicoidais, mostradas na Figura 12, são as mais comercialmente utilizadas e veículos de pequeno e médio porte.

Figura 12: Molas helicoidais.
Fonte: Freitas Júnior (2006).

Dentro das molas helicoidais, o modelo mais comum são as cilíndricas linear como mostrado na Figura 12. De acordo com Milliken *et al* (1995), estas são formadas pelo enrolamento de um arame em forma helicoidal, podendo ter passos e diâmetros constantes ou variáveis.

Outro modelo de bastante utilizado em veículos, principalmente com foco em cargas e eixos rígidos, é a mola semielíptica, ou também conhecida popularmente como feixe de molas, mostrado na Figura 13.

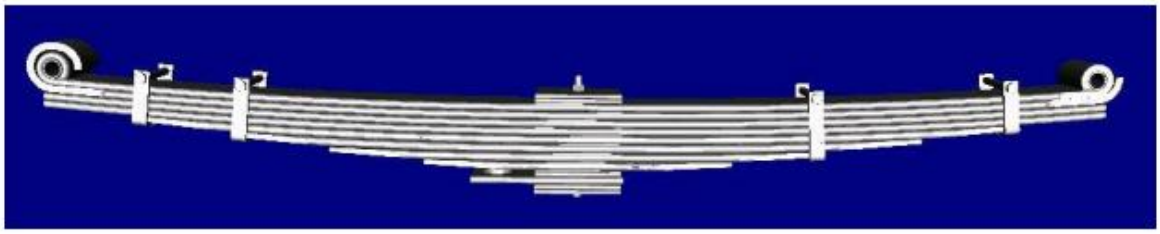

Figura 13: Mola Semielíptica convencional.
Fonte: Freitas Júnior (2006).

A Figura 13, demonstra um feixe de molas convencional composto por várias lâminas de aço sobrepostas, que geram um atrito interno em função do escorregamento das mesmas, gerando uma rigidez em função do deslocamento da suspensão do veículo (FREITAS JÚNIOR, 2006).

2.3.2 Amortecedores

Se nenhuma energia for perdida ou dissipada por atrito ou outra resistência durante a oscilação em um sistema vibratório, é conhecido como vibração não amortecida, onde há a tendência de vibrar infinitamente (RAO, 2008). A literatura complementa que, em muitos

sistemas práticos, a energia de vibração é convertida em calor ou som, diminuindo gradativamente o deslocamento do sistema, conhecida como amortecimento.

Pelas palavras de Diniz (2014, p. 40) o amortecedor se define como, “um elemento de força do sistema de suspensão que, trabalhando em conjunto com a mola, a sua função é dissipar energia do sistema na forma de calor”.

Os amortecedores, segundo Rao (2008), são designados pelos tipos de construção, sendo:

- Amortecimento viscoso: O amortecimento mais comercialmente utilizado, onde o sistema mecânico vibra em um meio fluido como ar, água, gás e óleo, sendo o método de dissipação de energia a resistência que este oferece ao corpo em movimento;
- Amortecimento Coulomb ou por atrito seco: O amortecimento, é fornecido pelo atrito entre superfícies secas ou com lubrificação inadequadas, sendo constante e contrário ao movimento;
- Amortecimento material ou sólido ou por histerese: Este tipo de amortecimento utiliza o fenômeno de absorção de energia de um material quando deformado, devido ao atrito entre os planos internos, que deslizam ou escorregam enquanto as deformações ocorrem.

De acordo com Souza (2014) *apud* Ruthes (2016), sem a utilização de um sistema de amortecimento a energia transmitida para as molas, geradas por uma irregularidade no solo, provoca desconforto e prejudica a dinâmica vertical do veículo, comprometendo a estabilidade do mesmo. A Figura 14, representa um amortecedor veicular e seus principais componentes.

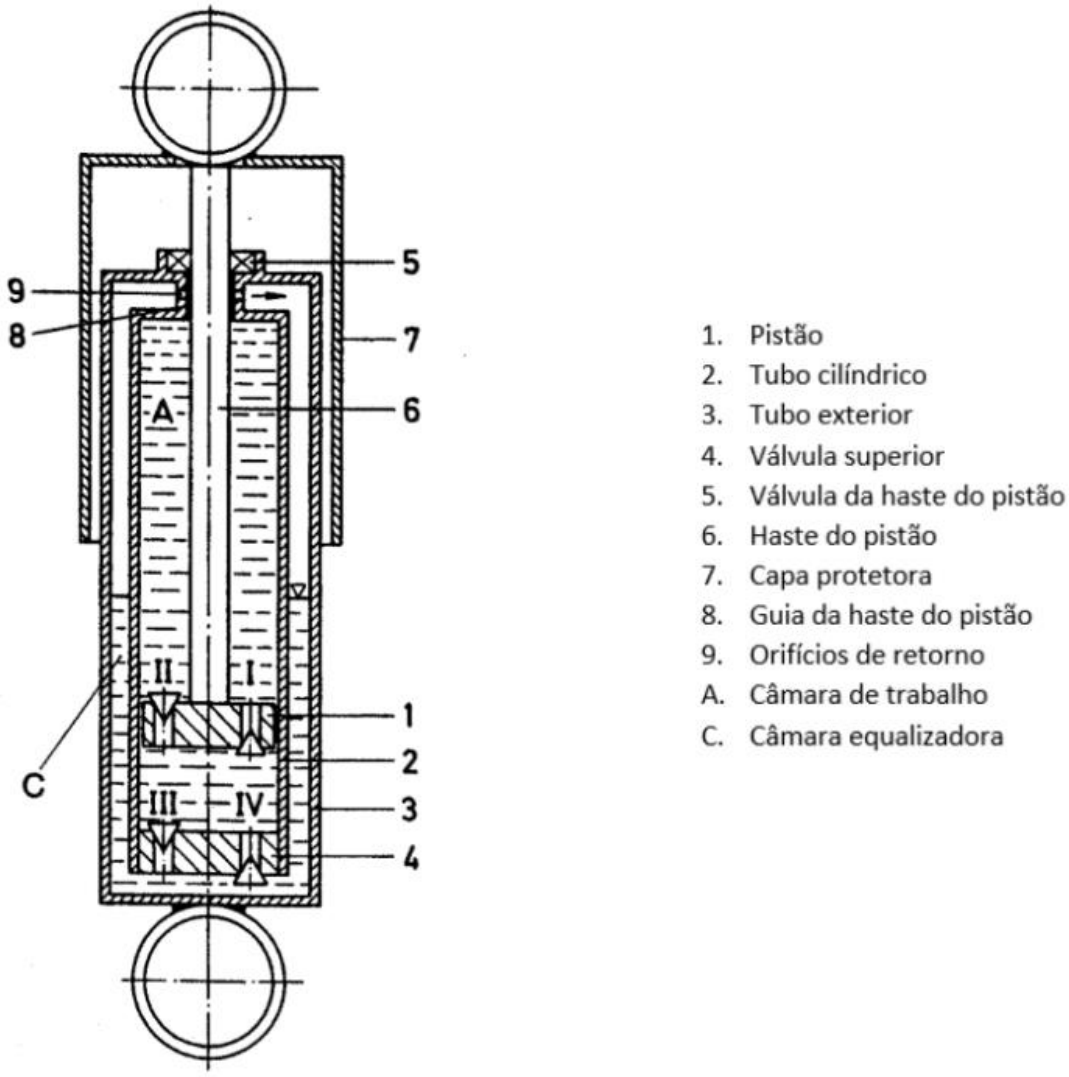

Figura 14: Diagrama de um amortecedor de tubo duplo.
Fonte: Adaptado de Reimpell (2001).

Na Figura 14 é demonstrado o modelo de amortecedor comumente utilizado em veículos de pequeno e médio porte, do tipo de tubo duplo. O sistema funciona com o movimento do pistão na câmara de trabalho A que está abastecida com óleo, onde a resistência de passagem do fluido nos orifícios do pistão, causam o efeito de amortecimento (REIMPELL, 2001).

2.4 Simulação Multi-Corpos

Nas atividades de engenharia, os projetistas são submetidos no dia a dia a problemas técnicos complexos, onde sua resolução está vinculada em uma grande fundamentação teórica e matemática. Para a resolução destes problemas com uma maior facilidade é necessário a utilização de *softwares* de simulação, conseguindo obter os resultados no menor tempo possível.

A simulação de modelos virtuais é nomeada como CAE – *Computer-aided Engineering*, onde sua estrutura consiste em cadeias numéricas baseadas em cálculos computacionais utilizados para simular o comportamento de vários componentes veiculares (CALDAS, 2013).

Na engenharia mecânica os computadores já são parte do processo de desenvolvimento de projetos, partindo da criação de desenhos até a simulação de componentes, para isto, uma das técnicas altamente utilizadas para sistemas dinâmicos é denominada como Sistemas de Multicorpos ou *Multibody Systems* (MBS) (KONDO, 1997).

Pelas palavras de Kondo (1997) *apud* Shabana (1998), sistemas multicorpos em geral são definidos como "uma coleção de subsistemas que são denominados corpos, componentes ou subestruturas, trabalhando como corpos rígidos, existindo interações entre estruturas flexíveis".

De acordo com Caldas (2013), a principal utilização dos sistemas MBS, são os projetos de suspensão, onde é necessário o desenvolvimento de várias simulações, verificando o comportamento ao longo do movimento em uma estrada do sistema.

Verifica-se desta maneira que o método MBS de simulação, é o mais adequado para quantificar o movimento de uma suspensão automotiva e sua análise de vibrações e *ride* ao longo de um uso convencional.

3 METODOLOGIA

3.1 Tipo de pesquisa

Pelas palavras de Gil (2022, p. 17), pode se definir a pesquisa como “o procedimento racional e sistemático que tem como objetivo fornecer respostas aos problemas que são propostos”. O autor complementa que a pesquisa é necessária também, nas situações em que as informações são insuficientes para responder o problema proposto.

Por Gil (2022), as pesquisas podem ser determinadas em tipos, sendo as principais:

- Pesquisa exploratória: têm como objetivo familiarizar o indivíduo com o problema, tornando o mais visível, utilizando ferramentas de aprimoramento de ideias e coleta de dados;
- Pesquisa descritiva: têm como objetivo determinar as características de um fenômeno de estudo e suas variáveis, utilizando métodos estatísticos e pesquisas de campo para determinar seus pontos de estudo;
- Pesquisa explicativa: têm como objetivo identificar fatores que contribuem para ocorrência de fenômenos, explicando o porquê da finalidade do estudo e seus acontecimentos.

O tipo de pesquisa abordado neste estudo é a pesquisa exploratória, sendo possível a compreensão do fenômeno da rigidez e amplitude na suspensão de veículos de médio porte, com a aplicação de um jumelo articulado, comparando com os resultados originais.

Em relação as formas de abordagem, uma pesquisa pode abranger dois tipos, qualitativa e quantitativa.

A pesquisa quantitativa segundo Appolinário (2011) *apud* Lozada (2018), as variáveis predeterminadas são mensuradas e expressas numericamente, juntamente com os resultados, utilizando métodos quantitativos, como por exemplo os estatísticos.

Segundo Gerhardt & Silveira (2009, p. 33), “a pesquisa quantitativa, tem suas raízes no pensamento positivista lógico, tendendo a enfatizar o raciocínio dedutivo, as regras da lógica e os atributos mensuráveis da experiência humana”.

Quanto a abordagem qualitativa Gerhardt & Silveira (2009) *apud* Lozada (2018, p. 133) complementa que:

> É um tipo de investigação voltado para as características qualitativas do fenômeno estudado, considerando a parte subjetiva do problema, onde se preocupa com aspectos da realidade que não podem ser quantificados, centrando-se na compreensão e na explicação da dinâmica das relações sociais.

Dalfovo *et al* (2008, p. 10) adiciona que:

> Podemos partir do princípio de que a pesquisa qualitativa é aquela que trabalha predominantemente com dados qualitativos, isto é, a informação é coletada pelo pesquisador não é expressa em números, ou então os números e as conclusões neles baseadas representam um papel menor na análise.

A Tabela 1 demonstra uma comparação entre as formas de abordagem qualitativas e quantitativas.

Tabela 1: Comparação entre as formas de abordagem.

Pesquisa quantitativa	**Pesquisa qualitativa**
Focaliza uma quantidade pequena de conceitos	Tenta compreender a totalidade do fenômeno, mais do que focalizar conceitos específicos
Inicia com ideias preconcebidas do modo pelo qual os conceitos estão relacionados	Possui poucas ideias preconcebidas e salienta a importância das interpretações dos eventos mais do que a interpretação do pesquisador
Utiliza procedimentos estruturados e instrumentos formais para coleta de dados	Coleta de dados sem instrumentos formais e estruturados
Coleta os dados mediante condições de controle	Não tenta controlar o contexto da pesquisa, e, sim, captar o contexto na totalidade
Enfatiza a objetividade, na coleta e análise dos dados	Enfatiza o subjetivo como meio de compreender e interpretar as experiências
Analisa os dados numéricos através de procedimentos estátisticos	Analisa as informações narradas de uma forma organizada, mas intuitiva

Fonte: Adaptado de Polit (2004).

A abordagem da pesquisa utilizada neste trabalho será a quantitativa, expressando numericamente a melhoria na dinâmica veicular com a utilização do jumelo articulado.

Para se obter uma melhor avaliação dos resultados de uma pesquisa, é preciso conhecer os dados e os procedimentos utilizados, não somente a classificando segundo natureza dos mesmos (qualitativa ou quantitativa), mas também sobre o ambiente que são coletados e os métodos utilizados para sua aferição (GIL, 2022).

Desta maneira, é necessário classificar as pesquisas segundo os métodos empregados e procedimento técnicos. São as classificações da pesquisa organizadas em:

- Pesquisa bibliográfica;
- Pesquisa documental;
- Pesquisa experimental;
- Estudo de caso;
- Pesquisa-ação;
- Pesquisa participante.

Neste trabalho serão utilizados os métodos de pesquisa bibliográfica e o estudo de caso.

A pesquisa bibliográfica, pelas palavras de Fonseca (2002, p. 32, *apud* Gerhardt & Silveira, 2009, p. 37), "é feita a partir do levantamento de referências teóricas já analisadas, e publicadas por meios escritos e eletrônicos, como livros, artigos científicos, páginas de web sites".

Teoricamente todo trabalho acadêmico, requer algum tipo de pesquisa bibliográfica, podendo ser, em sua maioria, teses e dissertações de mestrado dentro do tema, fornecendo fundamentação teórica ao estudo (GIL, 2022).

Neste estudo, a pesquisa bibliográfica é fundamentada a partir de livros, em especial os com enfoque em dinâmica veicular e publicações periódicas pertinentes, referentes ao tema proposto.

Para Gil (2022, p. 49):

> O estudo de caso é uma modalidade de pesquisa amplamente utilizada nas ciências sociais, consistindo no estudo profundo e exaustivo de um ou poucos casos, de maneira que permita seu amplo e detalhado conhecimento; tarefa praticamente impossível mediante outros delineamentos já considerados.

Quando uma pesquisa visa obter com mais profundidade o porquê da ocorrência de um fenômeno da vida real, o estudo de caso é o método mais utilizado para o seu trabalho, utilizando fontes de evidências através da observação, abastecendo o pesquisador de dados relevantes ao funcionamento do mesmo (LOZADA, 2018). Na Figura 15, é possível observar a representação gráfica da realização de um estudo de caso.

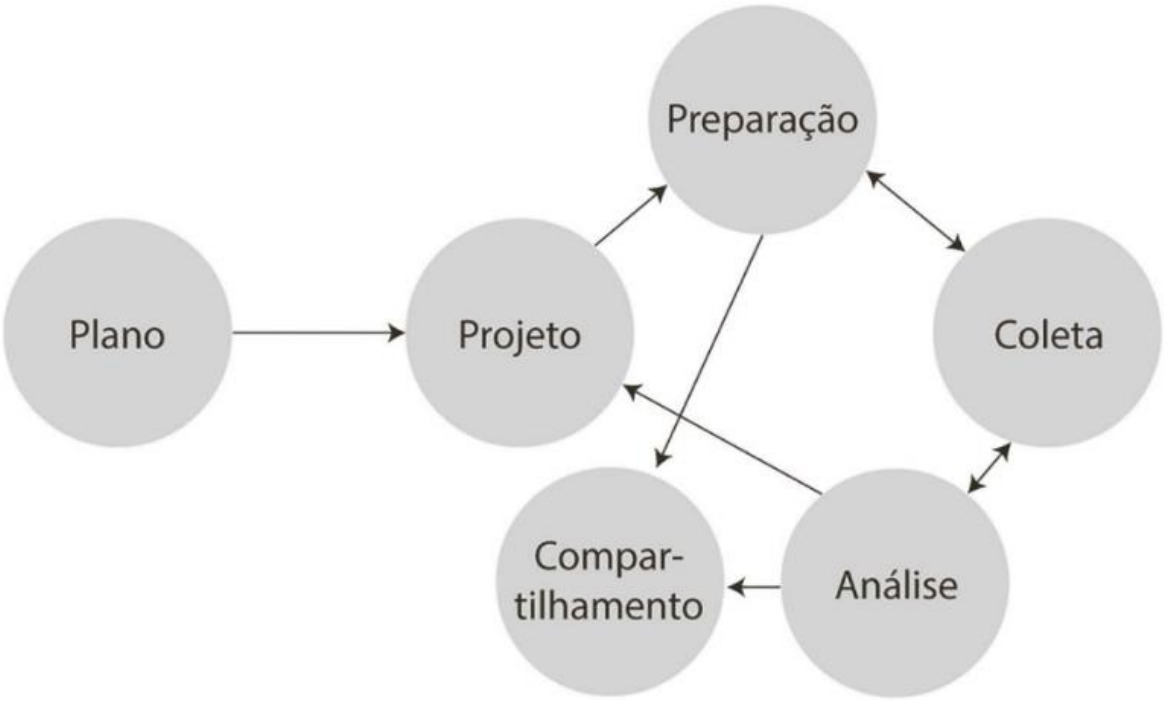

Figura 15: Processo de estudo de caso linear.
Fonte: Yin (2015, *apud* Lozada, 2018).

A Figura 15, demonstra a metodologia utilizada para determinar um estudo de caso, sendo a primeira fase o plano de estudo e posteriormente o projeto, onde todas as fases se relacionam, dependendo da necessidade do pesquisador, criando uma interseção continua na construção do trabalho (LOZADA, 2018).

3.2 Materiais e métodos

3.2.1 Aquisição de dados

Para a elaboração da pesquisa foi necessário a determinação das dimensões do modelo de suspensão traseira, de um veículo de porte médio para carga, com o jumelo original.

O equipamento a ser utilizado para análise da possível melhora da dinâmica veicular foi devidamente dimensionado a partir do modelo comercial, de forma a prescrever a melhor resposta.

3.2.2 Modelagem e análise

O conjunto suspensão-chassi do veículo será modelado em CAD pela aplicação *SolidWorks*, em sua versão estudantil, levando em consideração um modelo real aplicado em um veículo de médio porte.

O modelo será simulado por meio da mesma aplicação utilizando o método multi-corpos, no modulo de análise de frequência do *software*. Caso seja necessário um refino da simulação será utilizado a aplicação *Ansys* ou *AdamsCar*, em suas versões completas para melhor entendimento do movimento do conjunto.

3.2.3 Visão geral do veículo

Em 2012 a Chevrolet marcou e reentrada no mercado nacional de picapes médias com o novo modelo da caminhonete S10, este após 16 anos de carência de veículos na categoria da marca no Brasil (NOTICIASAUTOMOTIVAS,2022). O autor complementa que esta nova geração do carro, estava em sintonia com o modelo global da marca, fabricado nos Estados Unidos, Tailândia, Sudeste Asiático e Austrália. A Figura 16 demonstra a geração de 2012 da S10.

Figura 16: Chevrolet S10 2012.
Fonte: Notícias Automotivas (2022).

A Figura 16 demonstra o veículo com carroceria global lançado pela Chevrolet em 2012, sendo fabricada com a mesma carroceria e conjunto mecânico até o ano de 2017, com pequenas mudanças em seu projeto de engenharia.

Para o presente trabalho foi escolhido o modelo da segunda geração da picape, sendo esta fabricada no ano de 2017, para a utilização de base do estudo, ilustrada na Figura 17.

Figura 17: Modelo de picape utilizada como base do estudo.
Fonte: Autor (2022).

A Figura 17 mostra o modelo real utilizado no estudo, sendo esta uma Chevrolet S10 com motorização a diesel e configuração cabine dupla, fabricada no ano de 2017, disponibilizada para o estudo pelo professor de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto, Edson Alves Figueira Júnior.

3.2.4 Chassi

Primeiramente, para realizar qualquer análise na estrutura de um sistema veicular é necessário esboçar o componente principal do veículo, onde será fixado todos os componentes mecânicos da picape. Desta maneira, para desenho do chassi são necessárias as dimensões do mesmo utilizado no veículo. A S10 utiliza chassi de longarinas no perfil U, produzidas em aço carbono com a carroceria de aço estampado galvanizado.

Para sua confecção foram utilizadas modelos 3D e desenhos técnicos disponibilizados pela marca dentro do seu acervo técnico, mostrado na Figura 18.

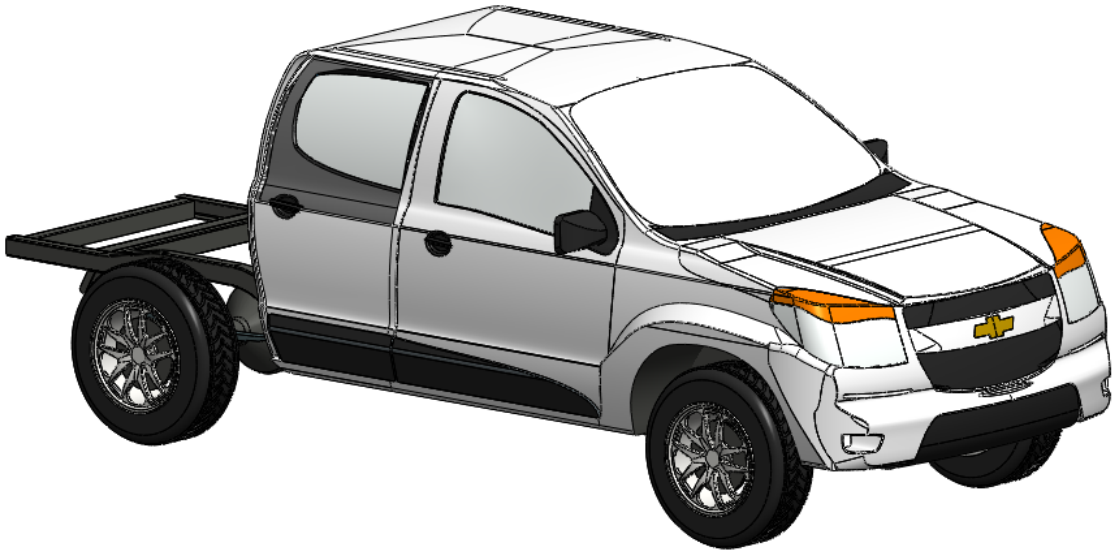

Figura 18: Desenho 3D Chevrolet S10 2013.
Fonte: GrabCad (2017).

A Figura 18 ilustra o modelo 3D utilizado para a confecção do chassi, construído em cima do modelo real da picape, como fruto de *hobby* disponibilizado na comunidade do GrabCad.

Utilizando a ferramenta avaliar disponível no *software SolidWorks*, foram obtidas as dimensões necessárias para a confecção do chassi do veículo. Como o estudo proposto é uma análise da suspensão traseira, para diminuição da capacidade de processamento necessário nas simulações foi escolhido a utilização de um modelo de 1/3 de chassi, onde é possível estudar todos os pontos de fixação da suspensão traseira.

A Figura 19 demonstra o modelo 3D, elaborado no *SolidWorks* para a análise proposta para o estudo.

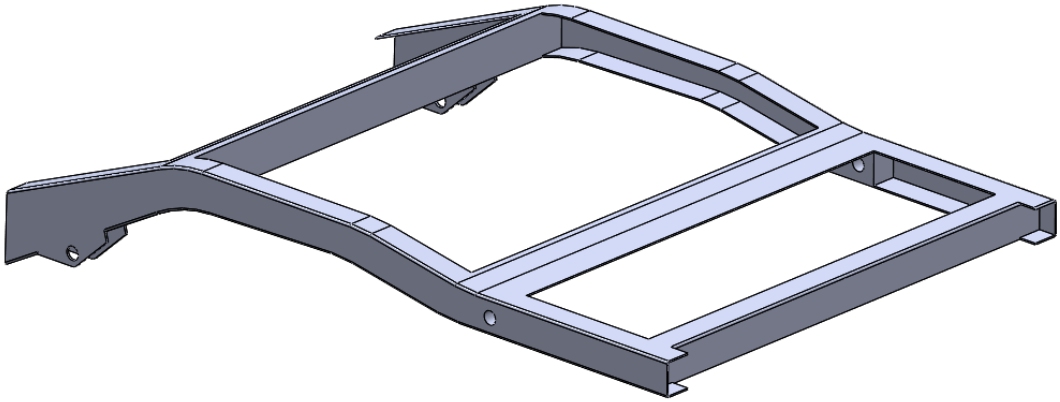

Figura 19: Desenho de 1/3 de chassi.
Fonte: Autor (2022).

É possível observar na Figura 19, o chassi de longarinas em perfil U, juntamente com as abas e pontos de fixação para posicionamento do conjunto de suspensão. O modelo do chassi como sendo uma peça para fixação da geometria do feixe de molas, foi definido como um elemento rígido sem considerar seções soldadas, obtendo maior rigidez do elemento.

Em relação a rigidez do chassi, foi necessário eliminar o perfil U e realizar reforços na estrutura, promovendo o mínimo possível de torção do sistema e garantindo o movimento somente do feixe de molas e equipamento estudado. A Figura 20, ilustra o reforço na longarina final.

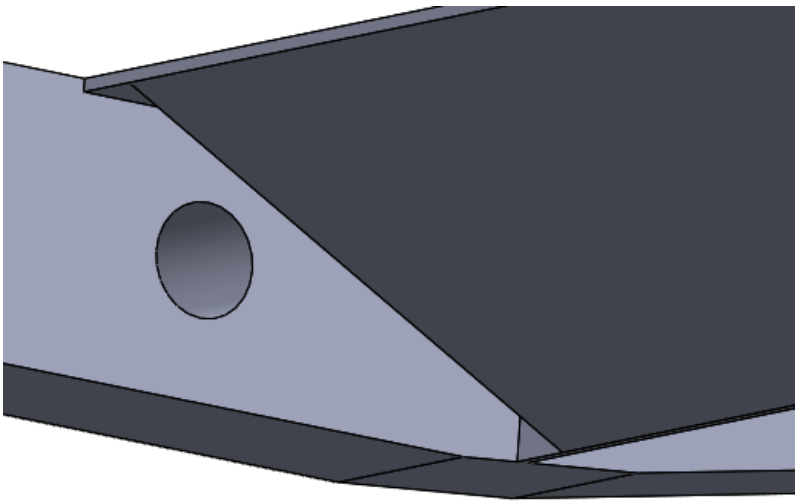

Figura 20: Reforço na longarina posterior.
Fonte: Autor (2022).

A Figura 20 mostra o reforço triangular realizado na longarina do chassi, posicionada ao longo do eixo traseiro do veículo, esta tem o intuito original de aumentar a rigidez a rolagem do mesmo, com os reforços é possível diminuir a rolagem da picape e garantir o

movimento do feixe de molas. Na Figura 21 é possível observar os reforços realizados nos perfis U do chassi.

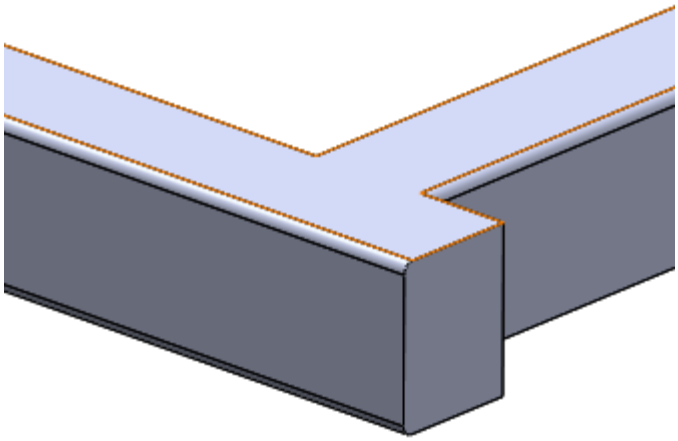

Figura 21: Reforço nos perfis U do chassi.
Fonte: Autor (2022).

É possível observar na Figura 21 a troca do perfil U, pelo perfil retangular nas extremidades do chassi, garantindo uma maior rigidez a deformação do mesmo, limitando seu movimento a ponto de melhorar a análise do jumelo.

3.2.5 Suspensão

Para análise de um conjunto de suspensão automotiva é necessário um sistema conhecido como massa-mola-amortecedor, utilizado nos veículos comerciais. A massa do sistema é representada pelo chassi e suas forças aplicadas, sendo necessário o desenvolvimento dos outros componentes de movimento.

3.2.5.1 Feixe de molas

Como explicado o sistema de suspensão necessita de um componente que represente a mola, no caso de veículos de carga é utilizada o conjunto de feixe de molas.

A Chevrolet S10, conta com um sistema de feixe de molas, compostos por 5 lâminas de aço mola 6150, sendo uma liga de aço mola com alta ductibilidade, altamente utilizada em molas, pinos e lâminas de corte.

Para o seu modelamento 3D, foi utilizado o modelo da S10 mostrado na Figura 18, com a função avaliar do *SolidWorks.* A Figura 22 mostra o modelo 3D do feixe de molas.

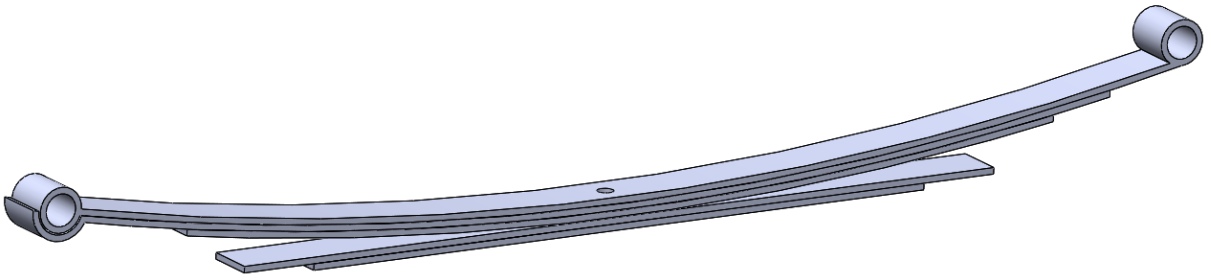

Figura 22: Modelo 3D do feixe de molas.
Fonte: Autor (2022).

Na Figura 22 é ilustrada o modelo de feixe de molas, utilizado na avaliação do conjunto de suspensão com modelamento próximo do real. Para a continuação do modelamento, foi necessário determinar na biblioteca o novo material do aço 6150, mostrado na Figura 23.

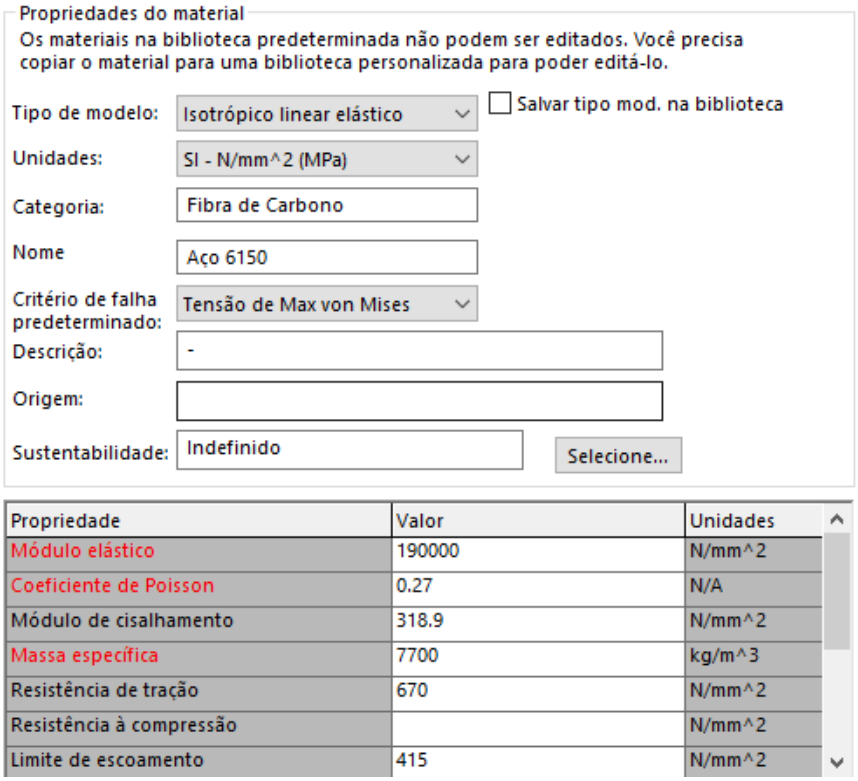

Figura 23: Determinação das propriedades do material.
Fonte: Autor (2022).

A partir de dados obtidos, a Figura 23 mostra a configuração do aço mola 6150 no *software SolidWorks*, para realizar as análises necessárias do conjunto, obtendo a resposta mais precisa possível.

3.2.5.2 Jumelo

Com o foco de manter o arco do feixe de molas, também sendo o principal foco de estudo, o jumelo original da picape S10, foi utilizado levando consideração o modelo 3D da

Figura 18, além de levar em consideração a geometria original presente no veículo, mostrada na Figura 24.

Figura 24: Jumelo original Chevrolet S10.
Fonte: 4X4 Brasil (2013).

A Figura 24 demonstra o modelo original do jumelo presente na Chevrolet S10, utilizado para a geometria de referência em conjunto com o modelo 3D. Com as informações coletadas foi possível elaborar um modelo 3D simplificado de um jumelo semelhante ao original mostrado na Figura 25.

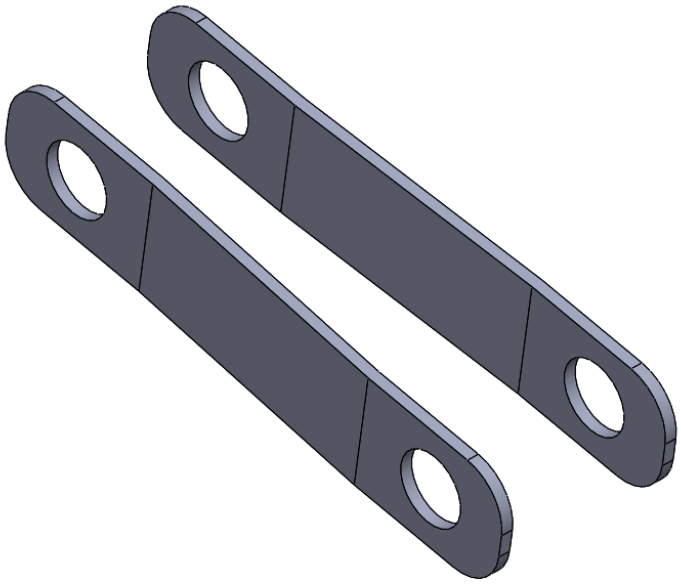

Figura 25: Modelo 3D do jumelo.
Fonte: Autor (2022).

O jumelo, ilustrado na Figura 25, foi construído com as referências determinadas pelo modelo 3D e geometria original, utilizando chapas de 5mm de aço de carbono e sem pinos de fixação para realizar a confecção de conjuntos de contatos posteriormente.

3.2.5.3 Amortecimento

O sistema original da Chevrolet S10, utiliza um amortecedor ligado diretamente na junção do eixo com o feixe de mola em cada lateral do veículo, mostrada na Figura 26.

Figura 26: Posicionamento dos amortecedores traseiros.
Fonte: Oficina Brasil (2016).

A Figura 26 demonstra a fixação original do amortecedor nos pontos de fixação do eixo e feixe de molas em um veículo Chevrolet S10 ano 2016, no seu conjunto de suspensão traseira. Para representar este amortecimento na análise, foi utilizado um baixo valor de amortecimento de 0,1, com o intuito de representar o amortecimento do amortecedor e componentes mecânicos com maior fidelidade, mas sem que este valor influencie na real atuação do jumelo dentro da suspensão.

3.2.6 Jumelo articulado

Para a real comprovação da melhoria do conforto veicular é necessário conhecer o equipamento a ser utilizado para este objetivo, o jumelo articulado, mostrado na Figura 27.

Figura 27: Jumelo articulado.
Fonte: Pickup Comfort (2022).

O jumelo articulado, ilustrado na Figura 27 e evidenciado com uma seta em vermelho, é um dispositivo desenvolvido para picapes com feixe de molas na suspensão traseira, com função de transferir menos vibração, propor maior aderência e conforto para motorista e passageiros (PICKUP COMFORT, 2022).

Para a comparação do modelo, onde promete a melhoria do conforto veicular, foi utilizado o modelo 3D, mostrado na Figura 18 e o jumelo original, mostrado na Figura 25. Utilizando a geometria do jumelo convencional adicionou um grau de liberdade, levando em consideração o produto vendido no mercado. O modelo 3D é mostrado na Figura 28.

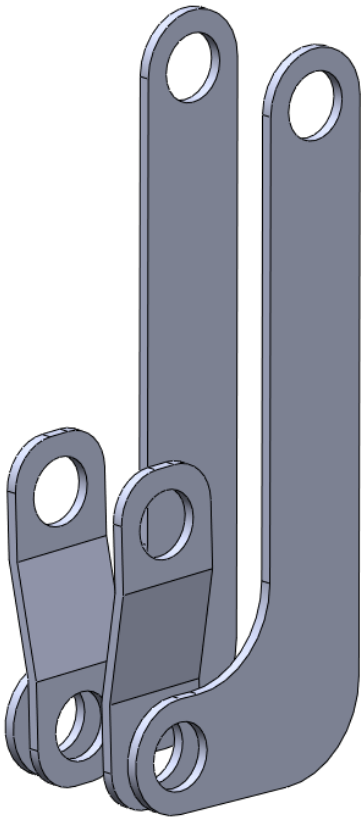

Figura 28: Modelo 3D do jumelo articulado.
Fonte: Autor (2022).

O modelo 3D do jumelo articulado, mostrado na Figura 28, foi desenvolvido em duas partes com chapas de 5mm de espessura de aço carbono e sem pinos de fixação para realizar a confecção de conjuntos de contatos posteriormente.

3.2.7 Construção do conjunto original

3.2.7.1 Preparação do conjunto

Com base nos modelos 3D desenvolvidos em *SolidWorks*, foi executado a montagem do sistema de suspensão traseira do veículo, inicialmente com o jumelo original, considerando um modelo de ¼ de carro, ou seja, utilizando somente o conjunto que representa a roda traseira direita da picape. A montagem dos componentes com o jumelo original é apresentada na Figura 29.

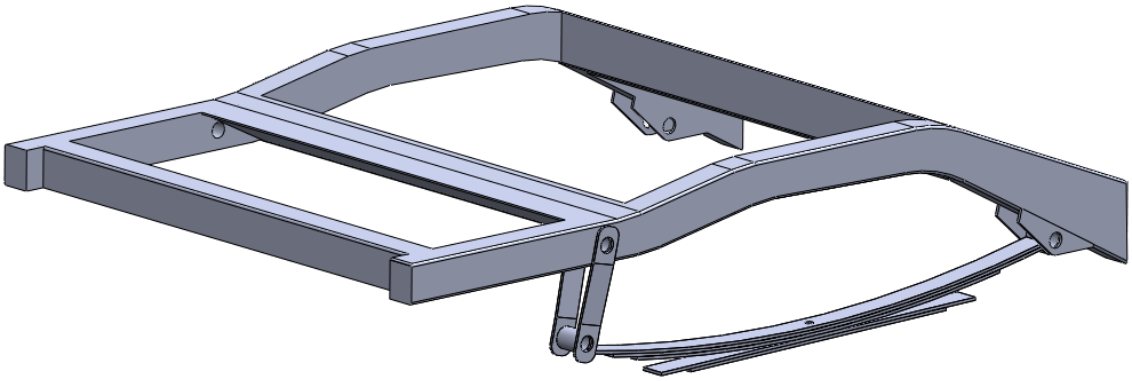

Figura 29: Montagem 3D da suspensão traseira.
Fonte: Autor (2022).

Após a construção da montagem do modelo a ser analisado é necessário determinar as conexões e contatos presentes no estudo, aumentando a proximidade com a realidade do estudo e oferecendo os movimentos necessários do sistema para sua análise. O *software SolidWorks*, em análises de frequência trabalha com quatro principais sistemas de contato sendo eles:

- Conexões mecânicas como pinos, parafusos, molas, rolamentos e entre outros;
- Conjunto de contato unido, onde componentes em contato se movimentam e deformam com a mesma intensidade;
- Conjunto de contato permitir penetração, onde os elementos com esta definição podem se mover livremente do outro e caso chegue a se encontrarem, penetrar no material de contato;
- Contato global, sendo o contato automático definido pelo *software* a partir da geometria do sistema.

O contato global do sistema é definido automaticamente pelo *SolidWorks*, inicialmente como contato unido utilizando o modelo 3D criado pelo usuário, ou seja, todos os componentes que estão em contato direto com outro na montagem da suspensão estarão definidos como unidos. Posteriormente foi realizada uma plotagem de visualização de contato para verificar as junções automáticas do *software*, mostrada na Figura 30.

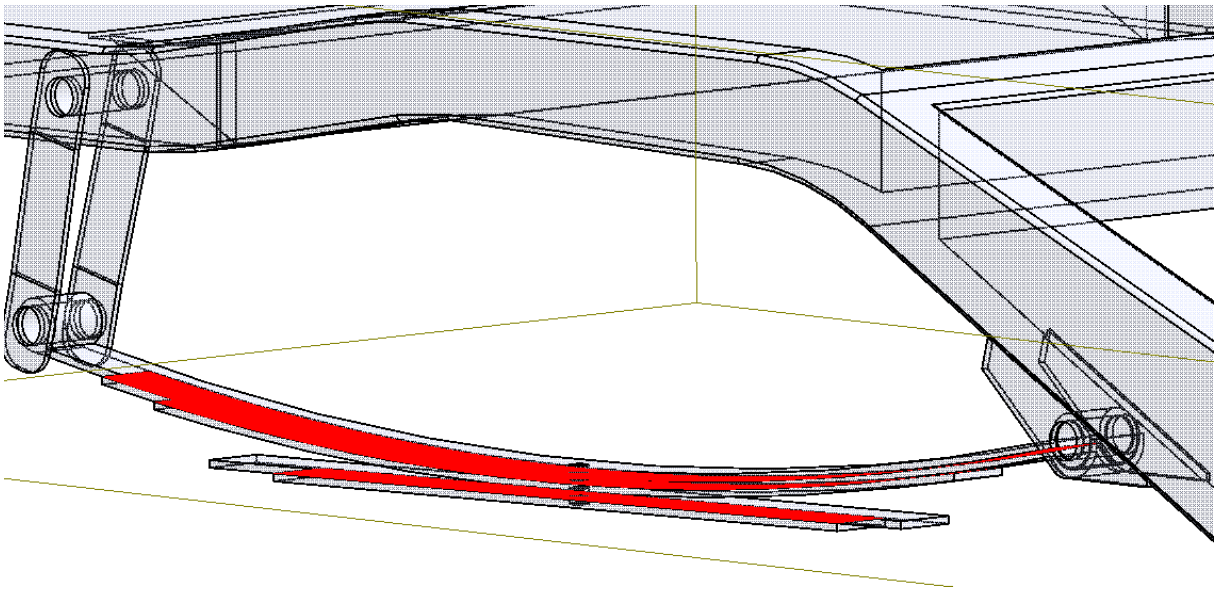

Figura 30: Plotagem de visualização de contato do conjunto chassi-suspensão.
Fonte: Autor (2022).

A Figura 30, demonstra os conjuntos de contato global automáticos do *SolidWorks*, sendo as faces e elementos em vermelhos os conjuntos que estão definidos como unidos. Após esta análise foi possível perceber a falta de contatos necessários para o correto funcionamento do sistema.

Foi observado que a terceira lâmina do feixe de molas, no contato global, não recebeu contato com a quarta pela mudança de geometria curva para a plana, sendo adicionado um contato de componente do tipo unido, mostrado na Figura 31, considerando que o feixe de molas trabalhe com as lâminas unidas.

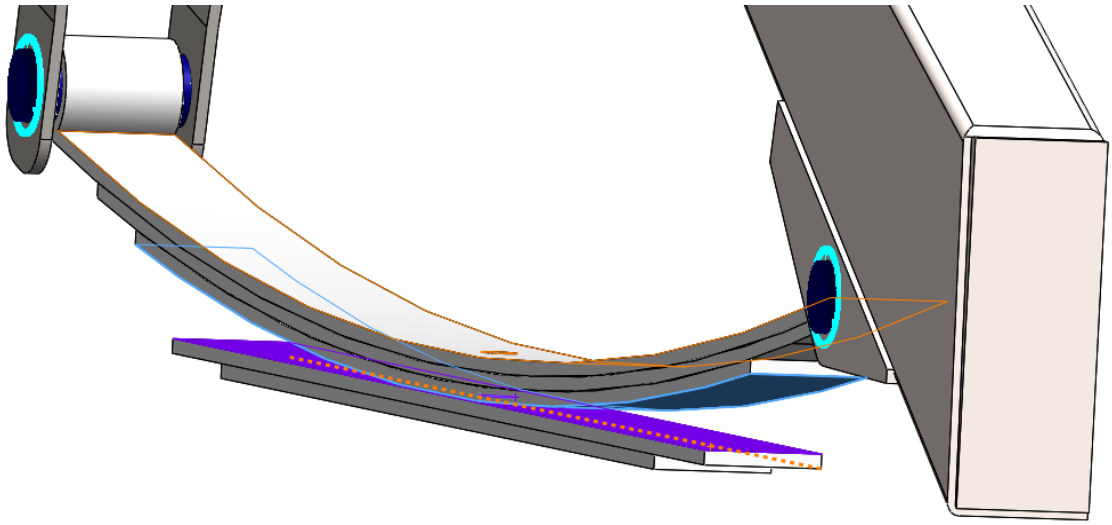

Figura 31: Adição do contato de componente unido no feixe de molas.
Fonte: Autor (2022).

Outro ponto de adição de contato observado foram as extremidades frontais da primeira e segunda lâmina do feixe de molas, esta configuração inicialmente na montagem

elas obtêm uma distância entre as duas circunferências, devido a falta do peso do veículo não sendo consideradas no contato global. Desta maneira adicionou-se as duas faces das extremidades um conjunto de contato do tipo unido, apresentado na Figura 32, representando o real funcionamento das mesmas.

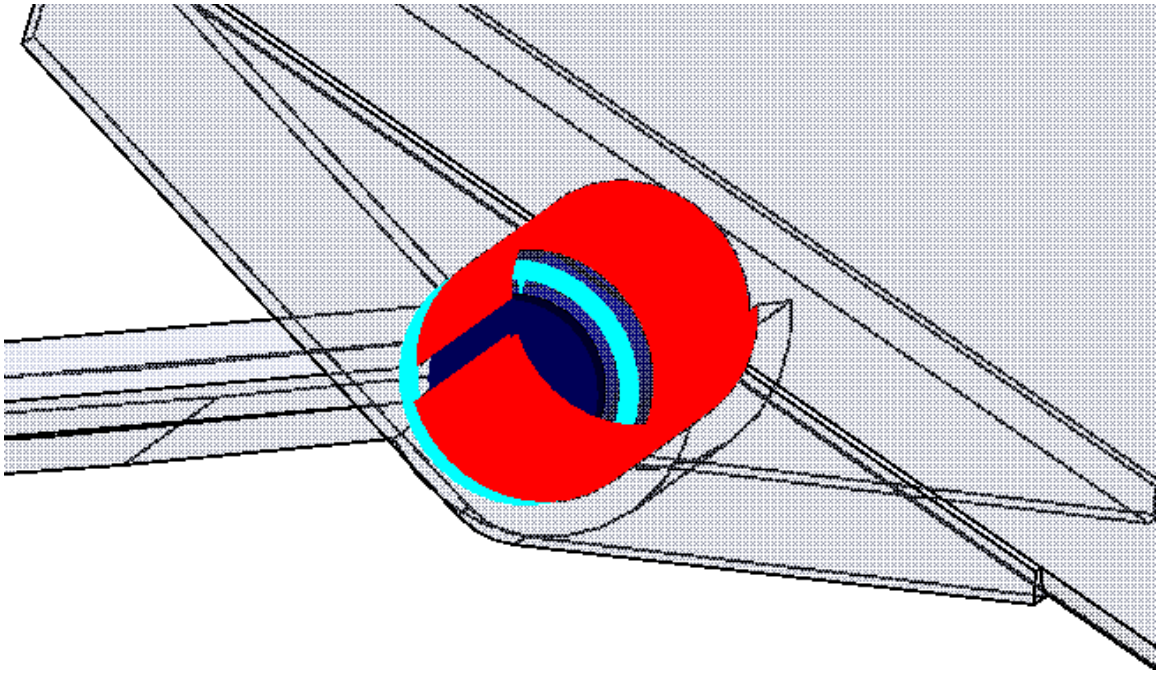

Figura 32: Adição do contato de componente unido na extremidade do feixe de molas.
Fonte: Autor (2022).

Com o prosseguimento da análise, quando testado o movimento do sistema foi identificado uma interferência de geometria na parte superior do jumelo com a longarina final do chassi da picape, quando o movimento era bem expressivo. Com o intuito de manter a fidelidade do estudo e da geometria dos componentes, foi adicionado um contato de componente do tipo permitir penetração, apresentado na Figura 33, entre as faces superiores do jumelo e a face inferior da longarina do chassi.

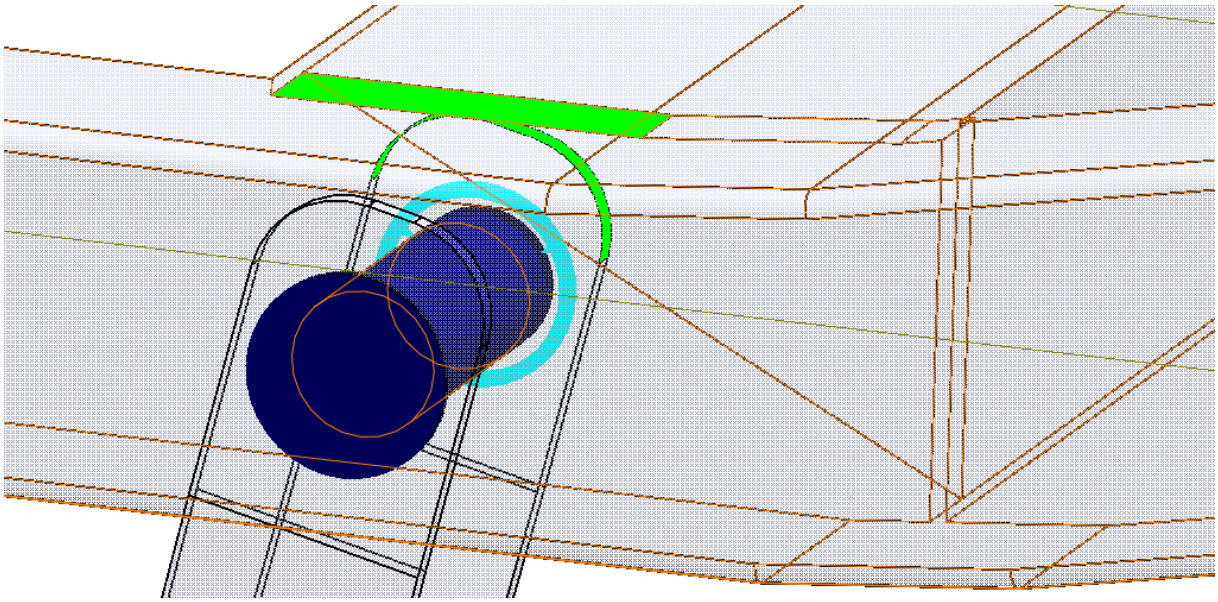

Figura 33: Adição do contato de componente do tipo permitir penetração entre o jumelo e a longarina.
Fonte: Autor (2022).

A partir disto é necessário definir uma conexão mecânica nos pontos de fixação do conjunto de suspensão ao chassi, ou seja, nas rótulas das extremidades de feixe de molas e jumelo. Desta maneira, foram definidas conexões mecânicas de pinos, para permitir a rotação dos elementos ilustrada na Figura 34.

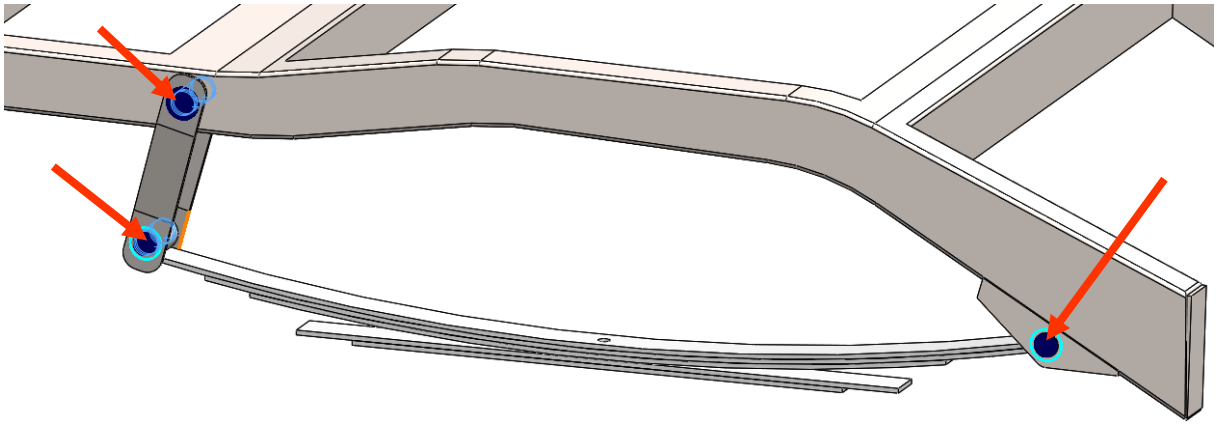

Figura 34: Conexões mecânicas de pinos.
Fonte: Autor (2022).

As conexões mecânicas de pino, mostrada na Figura 34, foram posicionadas nas extremidades do feixe de molas e jumelo, realçadas com setas em vermelho, onde o sistema realiza a rotação durante seu funcionamento. Estas conexões possuem anéis de retenção, impossibilitando a translação do sistema e permitindo a livre rotação do mesmo.

Por informações divulgadas pela Chevrolet, a S10 do ano de conta com carga útil na média de 1000 Kg e a sua massa total de 1700Kg. Para fornecer um estudo com maior coerência com a realidade e com o intuito de diminuir as frequências naturais na análise

modal, com o chassi no modo livre-livre, foi aplicada uma massa distribuída na simulação, mostrada na Figura 35.

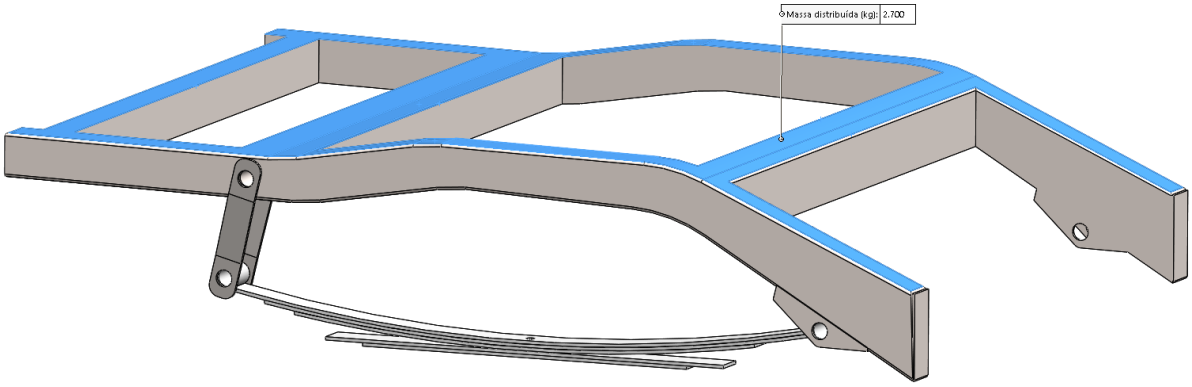

Figura 35: Massa distribuída aplicada ao chassi.
Fonte: Autor (2022).

Como mostrado na Figura 35, foi aplicada uma massa distribuída ao longo da superfície superior do chassi, totalizando 2700 Kg, sendo este, a soma da carga útil e peso do veículo. O peso da picape aplicada sobre o chassi, pode interferir dentro da simulação em vista que a S10 tem massa em diferentes pontos de sua construção como massa suspensa e não suspensa. Assim, a frequência natural descoberta pela análise pode não representar a real do veículo.

Para melhor definição do modelo geométrico analisado é necessário a determinação da malha. Esta, quanto mais fina, ou seja, menores elementos mais exatos os resultados com um pesar no tempo do processamento. A malha gerada é demonstrada na Figura 36.

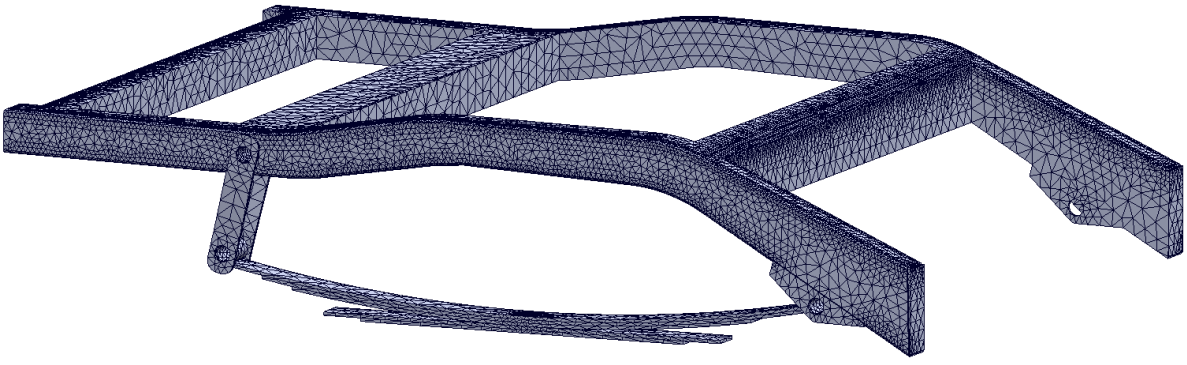

Figura 36: Malha aplicada ao modelo 3D.
Fonte: Autor (2022).

A malha utilizada, ilustrada na Figura 36, foi selecionada com base na curvatura do modelo, com densidade mais fina disponibilizada pelo *SolidWorks*, levando em consideração a geometria complexa do sistema, esta também apresentou valores de tamanho máximo e

mínimo de elemento, respectivamente, de 33,48mm e 6,69mm, número mínimo de elementos em um círculo de 8 e 1,4 como taxa de crescimento de elemento.

3.2.8 Ambiente de simulação

3.2.8.1 Forma Modal

Para as definições das propriedades do estudo dentro do *software SolidWorks*, do conjunto original, foram necessárias definições dentro do ambiente de simulação utilizando o suplemento de frequência. Estas são evidenciadas na Figura 37.

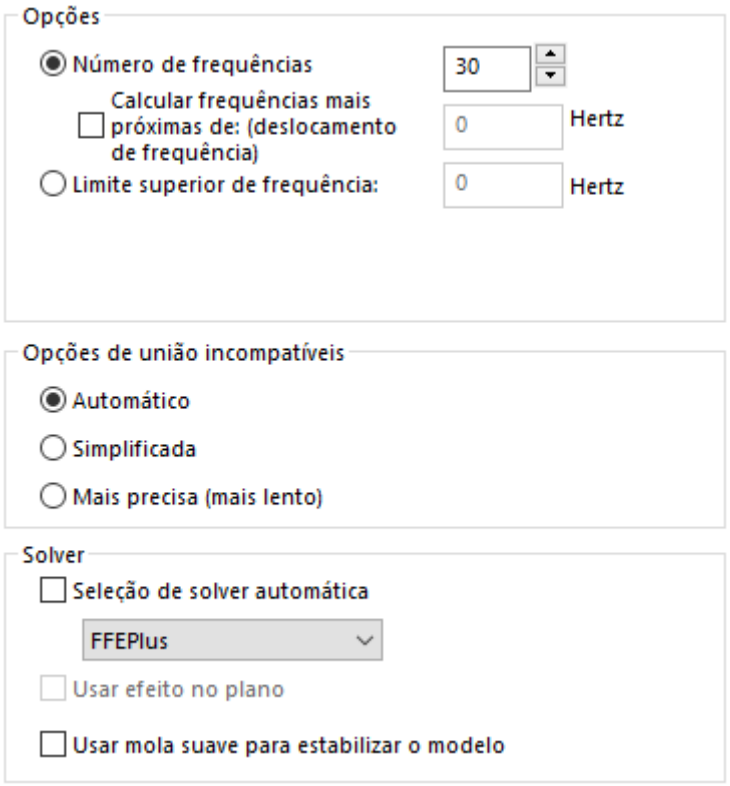

Figura 37: Propriedades do estudo de forma modal.
Fonte: Autor (2022).

A Figura 37, descreve as propriedades selecionadas do estudo de forma modal onde é selecionada manualmente o número de 30 frequências naturais, sem limites, juntamente com a opção automática para resolução de união incompatíveis. Também foi determinado o solver FFEPlus, que no geral, é mais rápido na solução de grandes problemas, se tornando mais eficiente para montagens com grandes dimensões.

Para o conjunto do jumelo articulado, foram utilizadas as mesmas propriedades mostradas na Figura 37, com exceção do número de frequências, alterada para 15, devido ao alto tempo de processamento do primeiro conjunto.

3.2.8.2 Análise harmônica

O estudo da análise harmônica define cargas aleatórias em função da frequência e avalia a resposta de pico, seja ele tensão ou deslocamento, para várias frequências operacionais. Para determinar o seu espectro e descobrir a amplitude do sistema, o conjunto original foi submetido ao estudo harmônico dentro do *SolidWorks*, com as propriedades definidas na Figura 38.

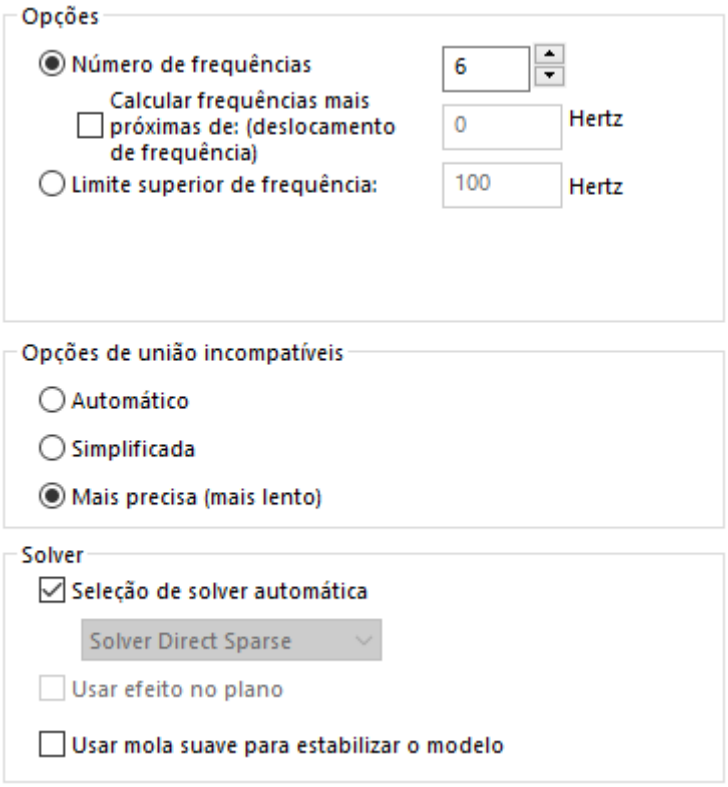

Figura 38: Propriedades do estudo da análise harmônica.
Fonte: Autor (2022).

As propriedades da análise harmônica, mostrada na Figura 38, foram definidas com um intervalo de frequência de limite 6, abrangendo a frequência natural do conjunto, onde é esperado o maior pico de amplitude. Na solução de união incompatíveis, diferente da forma modal evidenciada na Figura 37, foi utilizado o método mais preciso, visando a maior complexidade da simulação e a diferença da percepção de amplitude do movimento pelo *software*, mas com a consequência do alto tempo de processamento. Para utilização do solver, devido a complexidade do estudo, o *FFEPlus* não solucionou o estudo, onde foi necessário a escolha automática do *SolidWorks*, sendo definido o *Direct Sparse*, utilizado para resoluções de problemas com alto grau de processamento físico.

Para o conjunto do jumelo articulado, foram utilizadas as mesmas propriedades de estudo mostradas na Figura 38.

3.3 Variáveis e indicadores

Marconi e Lakatos (2022) considera uma variável, como um termo que define uma classificação ou medida, um conceito operacional ou um aspecto que define uma pesquisa. Gerhardt & Silveira (2009), explica que as variáveis são a presença e/ou ausência de um fenômeno inserido na realidade da pesquisa, onde o pesquisador possa dissertar adequadamente sobre suas características.

As variáveis se diferenciam entre independentes e dependentes. As variáveis independentes, influenciam, determinam ou afetam outra variável, sendo fator determinante, condição ou causa para determinado resultado (MARCONI e LAKATOS, 2022). A autora complementa que variáveis dependentes são as que consistem em valores a serem explicados ou descobertos, sendo influenciados pelas variáveis independentes ligadas a ela.

Segundo Gil (2022, p. 109) os indicadores são definidos como “uma medida quantitativa que informa acerca de algum aspecto da realidade que está sendo estudada”. O autor complementa que as escolhas dos indicadores devem ser simples, mas realizada com cuidado pois um trabalho de pesquisa pode existir vários indicadores para uma mesma variável de estudo.

A Tabela 2 apresenta de maneira resumida as variáveis e indicadores pertinentes a este trabalho.

Tabela 2: Variáveis e indicadores do estudo.

Etapa	Váriaveis	Indicadores
Modelagem do conjunto	- Seleção do modelo do veículo e dimensionamento do sistema de suspensão;	- Modelo 3d apropriado do conjunto em relação ao veículo selecionado;
	- Dimensionamento a partir do modelo comercial do jumelo articulado, de acordo com os materiais do conjunto.	- Definição de parâmetros de simulação, próximos ao real do elemento.
Simulação multi-corpos	- Dimensionamento do elemento de malha;	- Construção da malha propriamente refinada com elementos suficientemente pequenos;
	- Determinação dos parâmetros de simulação.	- Análise da amplitude de deslocamento no eixo Y do conjunto, rigidez do sistema e frequência natural do conjunto.

Fonte: Pesquisa direta (2022).

3.4 Instrumento de coleta de dados

A simulação Multi-corpos será realizada pelo *software SolidWorks*, em sua versão estudantil, a partir do suplemento de simulação de frequência.

A máquina utilizada é um computador com processador AMD *Ryzen* 7 4800h de 2,9 GHz, podendo ser acelerado a até 4,2 GHz, possuindo placa de vídeo *NVIDIA GeForce* GTX 1650 com 4GB de memória VRAM dedicada, memória RAM DDR4 de 3200 MHz e 512 GB de armazenamento SSD M2, rodando o sistema operacional *Microsoft Windows* 11.

3.5 Tabulação de dados

A tabulação de dados do dimensionamento será feita de forma manual, utilizando equipamentos de medição adequados, se possível por desenhos técnicos do veículo, sendo armazenados no *software Microsoft Excel*, em formato de planilhas para melhor visualização e acesso.

Após a simulação, o *SolidWorks* apresenta o desenho da deformação do sistema em escala de cores e os gráficos de movimento do sistema, facilitando a visualização do estudo.

3.6 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentadas todas as ferramentas utilizadas para a elaboração da pesquisa proposto neste documento, sendo toda a metodologia escolhida coerente com a mesma.

No capítulo seguinte são apresentadas as análises dos resultados dos métodos de pesquisa utilizados.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com o desenvolvimento da pesquisa, apresentando os dados gerados pelos cálculos realizados no *software SolidWorks* e *Microsoft Excel*. Com estes resultados, será possível analisar qual a real eficácia do estudo em questão.

4.1 Análise do conjunto original

4.1.1 Forma modal

Com base no modelo 3D definido e configurado, exibido na Figura 29, foi executado o estudo das formas modais referentes as frequências ressonantes do sistema, quando este está na condição livre-livre, ou seja, sem fixação na estrutura.

As frequências ressonantes de todo o conjunto são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Frequências ressonantes do sistema livre-livre.

Nº do modo	Frequência (Rad/s)	Frequência (Hertz)	Período (Segundos)
1	0	0	1,00E+32
2	0	0	1,00E+32
3	0,0010743	0,00017099	5848,4
4	0,0019999	0,00031829	3141,7
5	0,0028856	0,00045926	2177,4
6	0,0029995	0,00047738	2094,8
7	105,19	16,742	0,05973
8	160,44	25,535	0,039163
9	181,19	28,838	0,034677
10	256,79	40,869	0,024468
11	278,98	44,401	0,022522
12	318,88	50,751	0,019704
13	321,02	51,091	0,019573
14	328,54	52,289	0,019124
15	350,06	55,714	0,017949
16	412,18	65,6	0,015244
17	444,36	70,722	0,01414
18	501,34	79,791	0,012533
19	525,03	83,561	0,011967
20	558,4	88,873	0,011252
21	596,64	94,958	0,010531
22	721,71	114,86	0,008706
23	772,23	122,9	0,0081365
24	796,43	126,76	0,0078892
25	815,35	129,77	0,0077061
26	839,38	133,59	0,0074855
27	862,31	137,24	0,0072864
28	966,82	153,87	0,0064988
29	1032,1	164,27	0,0060877
30	1139,8	181,41	0,0055124

Fonte: Autor (2022).

Com os resultados indicados pela Tabela 3, os seis primeiros modos, próximos de 0, são modos de corpo rígido sem deformação do modelo. A primeira frequência natural do sistema começa no sétimo modo equivalente a 16,74 Hz, mas somente no décimo modo com frequência de 40,8 Hz, temos o resultado deformado da forma modal o deslocamento da suspensão do veículo, mostrado na Figura 39.

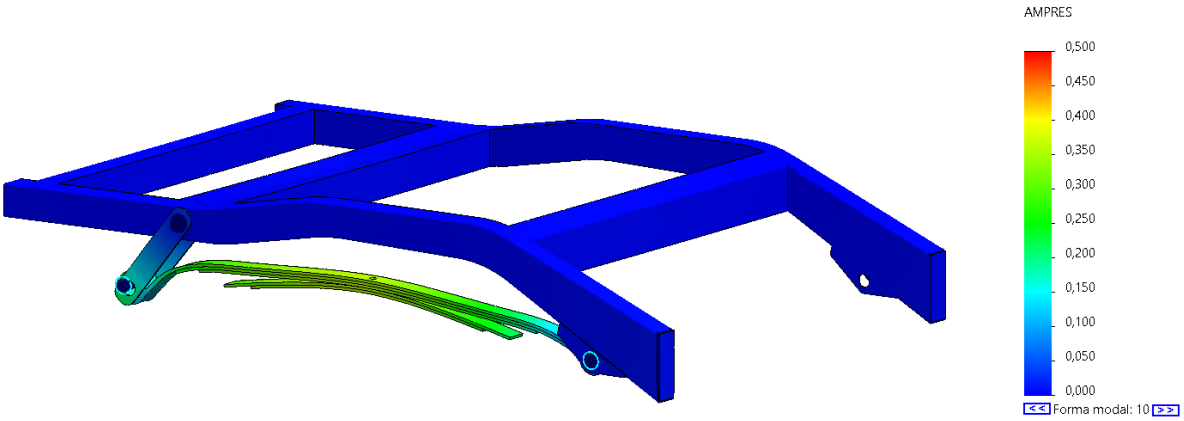

Figura 39: Décima forma modal deformada do sistema.
Fonte: Autor (2022).

A partir da resposta obtida na Figura 39, é possível observar que a décima frequência natural de 40,8 Hz, foi a primeira a esboçar a deformação do feixe de molas, sendo possível concluir que nesta frequência será a maior deformação do conjunto na análise espectral.

4.1.2 Análise harmônica

Para a análise harmônica do conjunto e obtenção do espectro, utilizou-se os parâmetros definidos e configurados no tópico anterior neste estudo da simulação, como malha e conjuntos de contatos.

Para a detecção da amplitude de movimento no espectro do chassi do veículo, foi necessário a adição de uma força concentrada no feixe de molas do veículo, representando um desnível no solo ao movimento de rodar do veículo.

A aplicação da força é ilustrada na Figura 40.

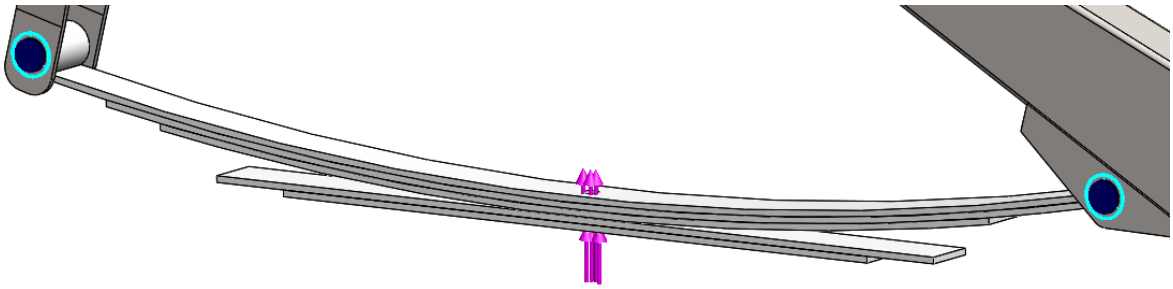

Figura 40: Aplicação da força no feixe de molas.
Fonte: Autor (2022).

Analisando a Figura 40, foi aplicada a força na região da fixação do eixo no feixe de molas, representando um desnível sentido pelo eixo, transferido para o sistema de suspensão do veículo de 1700N, escolhida arbitrariamente.

O *software SolidWorks* em análises harmônicas, não consegue solucionar simulações com elementos livre-livre, solicitando uma geometria de fixação para o mesmo. Na Figura 41 é apresentada a fixação definida para o chassi do veículo.

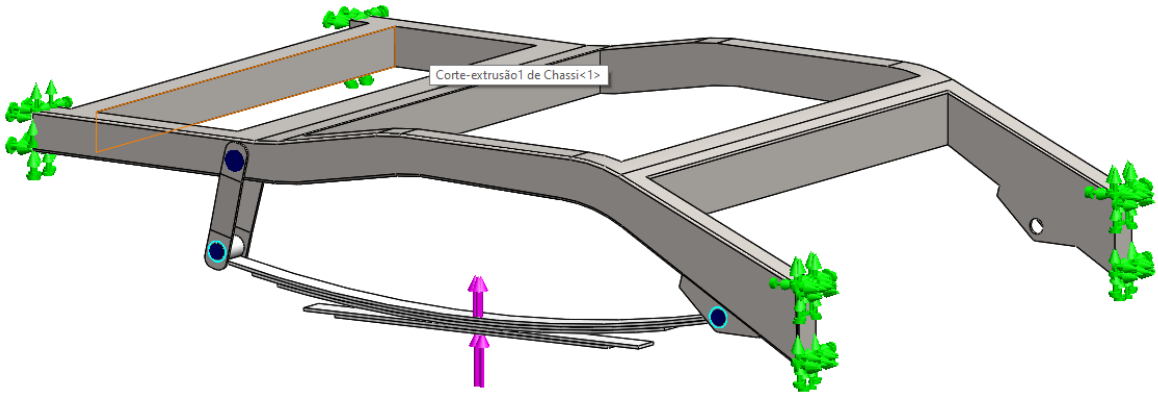

Figura 41: Fixação da geometria do chassi.
Fonte: Autor (2022).

A Figura 41 demonstra em setas de coloração verde, as fixações do chassi como geometria fixa definidas para a realização da simulação. Estas foram selecionadas nas extremidades do mesmo, pois foi necessário possibilitar a área entre o feixe de molas livre para detecção da amplitude.

Com as determinações das condições de simulação foi determinado um ponto de análise de resposta para geração do espectro, apresentado na Figura 42.

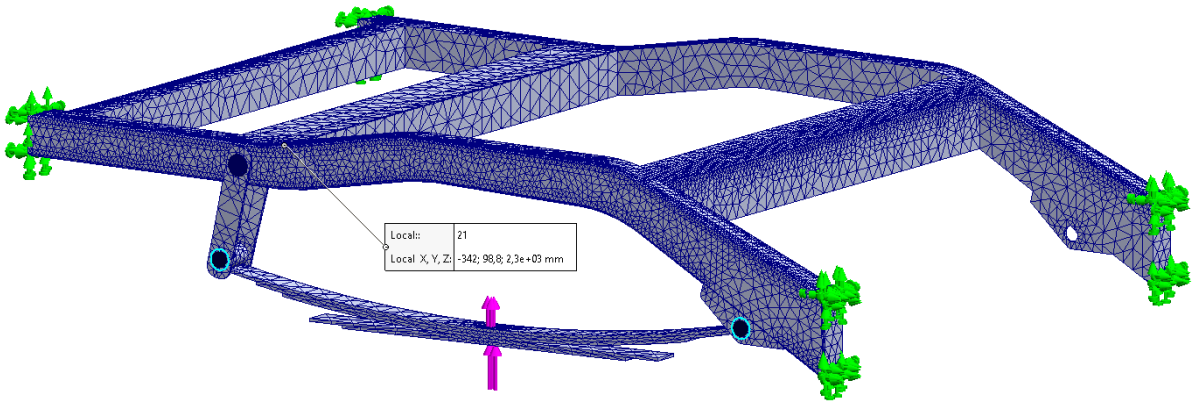

Figura 42: Determinação do nó de análise de amplitude.
Fonte: Autor (2022).

A Figura 42 determina o nó de análise para geração do gráfico de resposta juntamente com suas coordenadas no modelo 3D, denominado pelo *SolidWorks* como nó 21. Este foi escolhido especialmente pela sua posição no chassi próxima do jumelo a ser analisado, gerando uma resposta de amplitude fidedigna, apresentada na Figura 43.

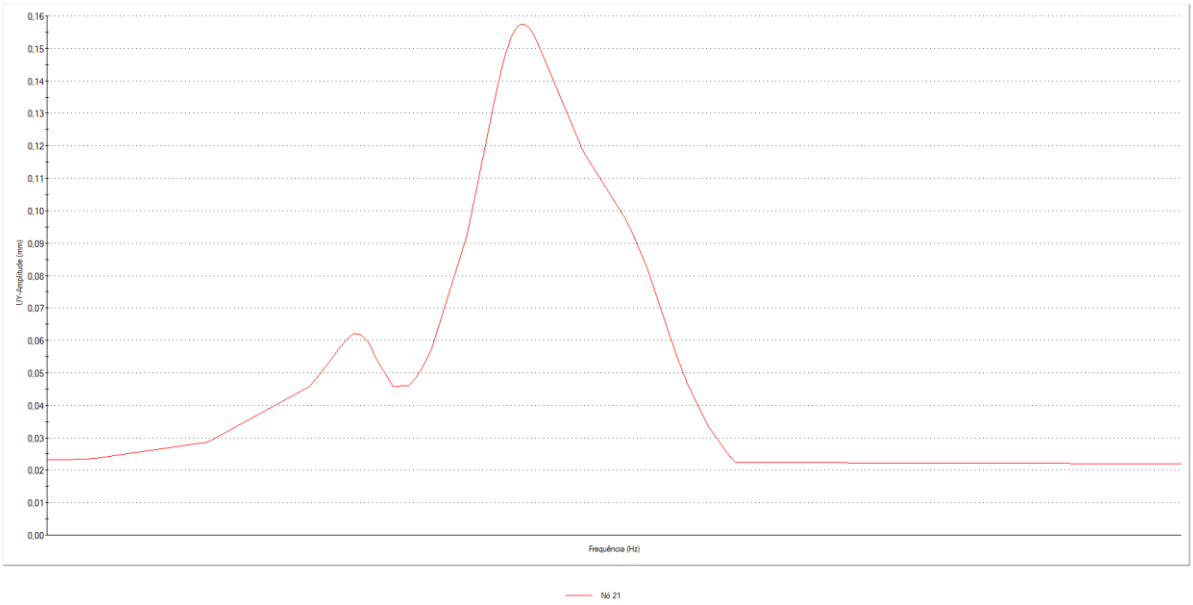

Figura 43: Espectro de frequência do jumelo original.
Fonte: Autor (2022).

Com os estudos realizados, a Figura 43 apresenta um espectro de frequência do sistema de suspensão da Chevrolet S10 onde, no eixo X é representado a frequência em Hz e no eixo Y o deslocamento vertical em mm. Esta resposta de amplitude variou de 0 a 100 Hz apresentando picos de amplitude nas frequências de 27,15 Hz, com amplitude de 0,062mm, e 41,6 Hz, com amplitude de 0,15mm, como esperado na deformação da forma modal apresentada na Figura 39.

4.2 Análise do conjunto com o jumelo articulado

4.2.1 Preparação do conjunto

Para a elaboração do modelo 3D do sistema de suspensão utilizando o jumelo articulado, foram utilizados os mesmos parâmetros de montagem do sistema original como conjunto de contato de componentes, chassi, feixe de molas, malha de simulação, massa distribuída e conexões mecânicas.

O sistema com o novo componente teve uma adição em suas conexões mecânicas, apresentada na Figura 44.

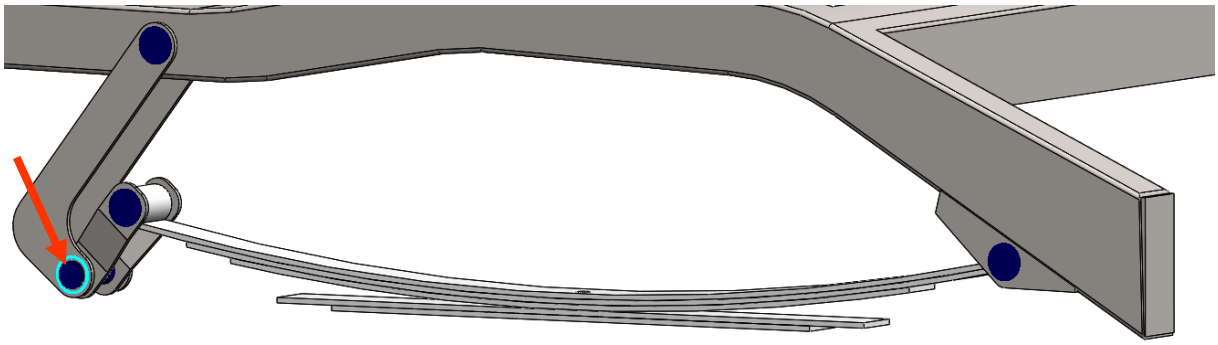

Figura 44: Adição das conexões de pino no jumelo articulado.
Fonte: Autor (2022).

A adição de uma conexão mecânica do tipo pino com anel de retenção, mostrada na Figura 44 e realçada com a seta em vermelho, foi necessária devido a articulação extra do novo jumelo, promovendo ao sistema mais um grau de liberdade de movimento, ou seja, a rotação.

4.2.2 Forma modal

Com base no modelo 3D definido e configurado do sistema com o jumelo articulado, foi executado o estudo das formas modais referentes as frequências ressonantes do sistema, quando este está na condição livre-livre, ou seja, sem fixação na estrutura.

As frequências ressonantes de todo o conjunto são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Frequências ressonantes do sistema com jumelo articulado livre-livre.

Nº do modo	Frequência (Rad/s)	Frequência (Hertz)	Período (Segundos)
1	0	0	1,00E+32
2	0	0	1,00E+32
3	0,0012163	0,00019358	5165,9
4	0,0019666	0,000313	3194,9
5	0,0025507	0,00040596	2463,3
6	0,0033428	0,00053202	1879,6
7	0,66539	0,1059	9,4428
8	105,12	16,73	0,059772
9	160,33	25,517	0,03919
10	181	28,808	0,034713
11	223,77	35,614	0,028079
12	251,59	40,042	0,024974
13	280,72	44,679	0,022382
14	319,06	50,781	0,019693
15	322,97	51,403	0,019454

Fonte: Autor (2022).

Com os resultados indicados pela Tabela 4, os seis primeiros modos, próximos de 0, são modos de corpo rígido sem deformação do modelo. Nota-se que o jumelo articulado criou uma primeira frequência natural do sistema no sétimo modo, de baixo valor equivalente a 0,1 Hz, mas somente no décimo segundo modo com frequência de 40 Hz, temos o resultado deformado da forma modal o deslocamento da suspensão do veículo, mostrado na Figura 45.

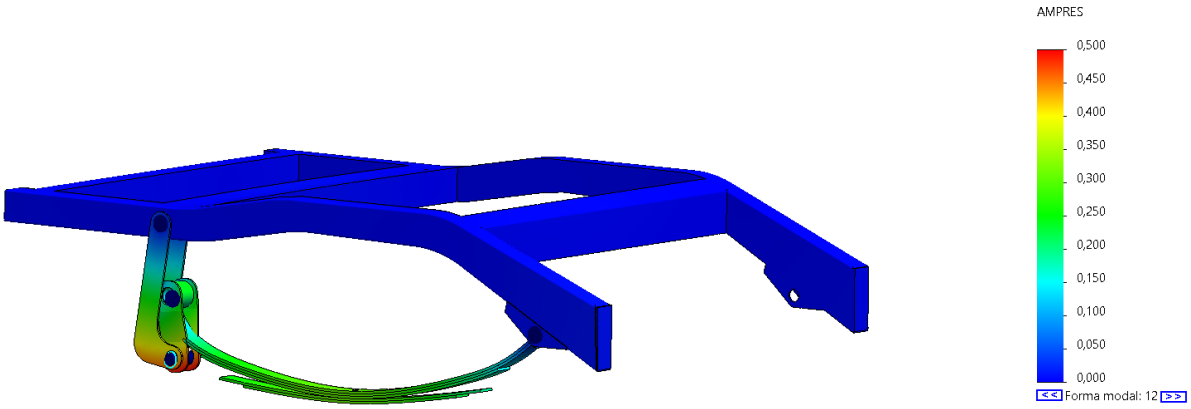

Figura 45: Décima segunda forma modal deformada do sistema com o jumelo articulado.
Fonte: Autor (2022).

A partir da resposta obtida na Figura 45, é possível observar que a décima segunda frequência natural de 40 Hz, foi a primeira a esboçar a deformação do feixe de molas, sendo possível concluir que nesta frequência será a maior deformação do conjunto na análise espectral.

4.2.3 Análise harmônica

Para a resposta espectral do sistema com o jumelo articulado, foram utilizados os mesmos parâmetros de força, fixação de geometria e nó de análise do modelo convencional, gerando uma resposta mostrada na Figura 46.

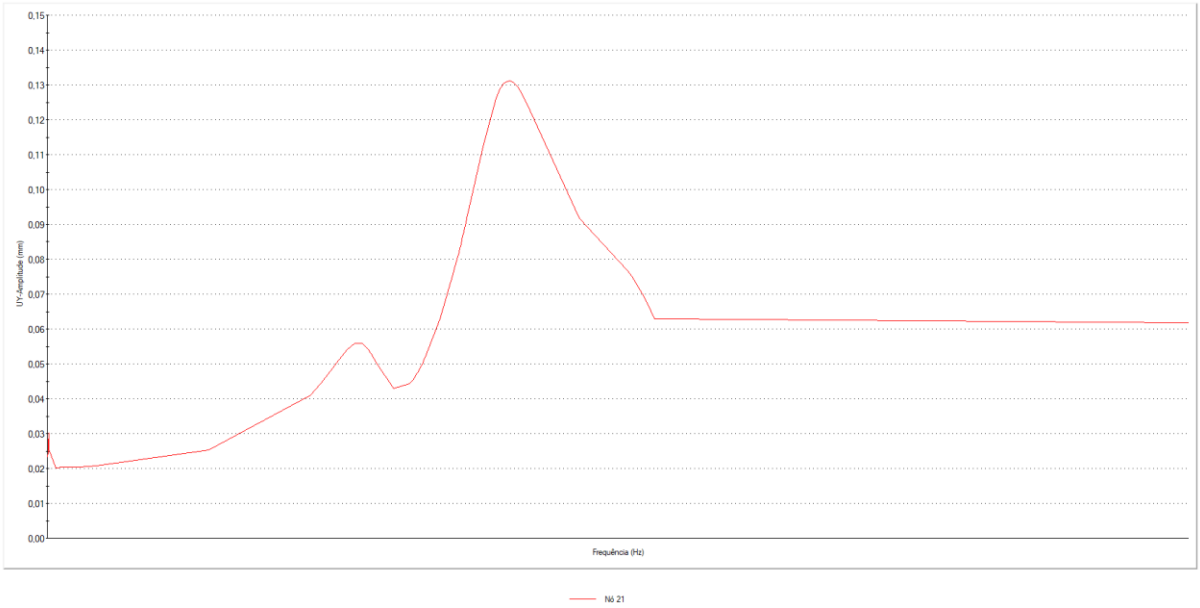

Figura 46: Espectro de frequência do jumelo articulado.
Fonte: Autor (2022).

Com os estudos realizados, a Figura 46 apresenta um espectro de frequência do sistema de suspensão da Chevrolet S10 onde, no eixo X é representado a frequência em Hz e no eixo Y o deslocamento vertical em mm. Esta resposta de amplitude variou de 0 a 100 Hz apresentando picos de amplitude nas frequências de 26,86 Hz, com amplitude de 0,056mm, e 40,35 Hz, com amplitude de 0,13mm, como esperado na deformação da forma modal apresentada na Figura 45. Como o jumelo articulado apresentou uma primeira frequência natural baixa, é possível observar também um pico no espectro na faixa 0,1 Hz com amplitude de 0,02mm, que não será analisado no estudo.

4.3 Comparação dos resultados

Após a obtenção dos espectros de frequência dos dois conjuntos dinâmicos aplicados na picape Chevrolet S10, os dados foram compilados e convertidos para o *software Microsoft Excel*, para ser realizada suas comparações.

A compilação das respostas é apresentada na Figura 47.

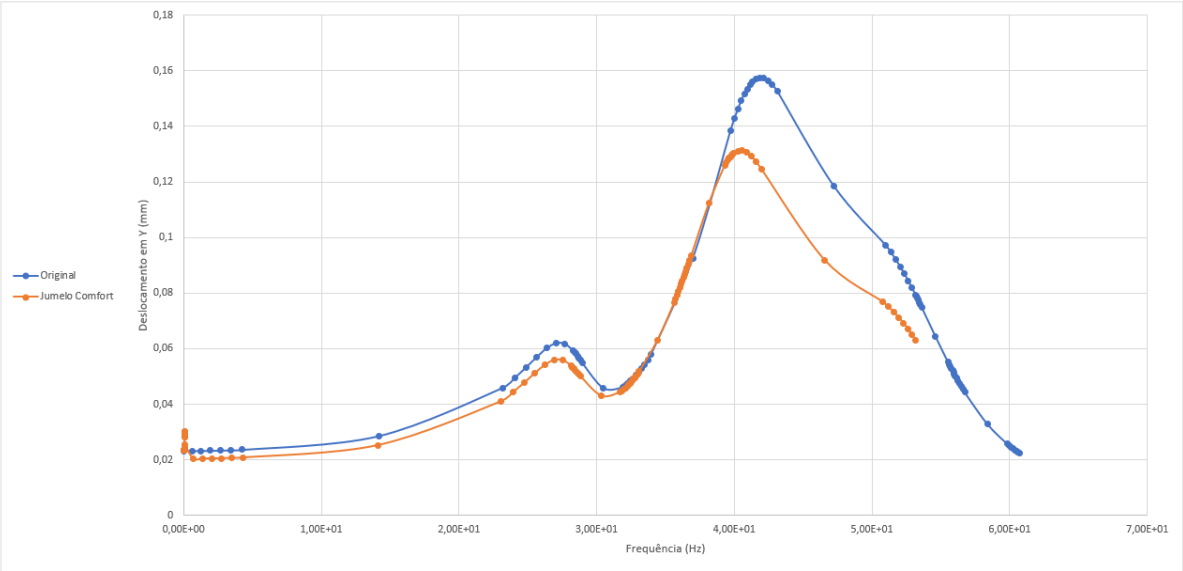

Figura 47: Comparação dos espectros de frequência.
Fonte: Autor (2022).

A Figura 47 representa a comparação dos espectros de frequência entre o jumelo original (linha azul) e o jumelo articulado (linha laranja), sendo o eixo X a frequência em Hz e o Y o deslocamento vertical ou amplitude.

Inicialmente, com a análise do gráfico ilustrado na Figura 47, foi possível observar o surgimento, na curva dos dois jumelos, dois picos de amplitude máxima quando somente era esperado o pico na faixa de 40 Hz. Este comportamento se faz entender que em ambos os casos, o jumelo tem como função principal realizar o trabalho de um absorvedor dinâmico de vibrações, reduzindo assim as vibrações mecânicas percebidas pelo chassi.

Outro ponto observado é a diminuição da frequência nos picos de máxima amplitude oferecidos pelo jumelo articulado, movimentando o pico da curva para a esquerda no eixo X, exercendo o papel de amortecedor para o sistema, assim garantindo a diminuição dos picos de amplitude máxima e deixando menos perceptível em termos de dinâmica veicular, as irregularidades da pista aos condutores.

No aspecto geral, o jumelo articulado diminuiu a amplitude máxima percebida no chassi de 0,15mm para 0,13mm, ou seja, uma redução de 13,3% do deslocamento do sistema. Este valor é uma melhoria considerável em termos de dinâmica veicular, possibilitando maior conforto para os condutores, além de deslocar os valores de amplitude de máxima das frequências naturais da picape, diminuindo o efeito de ressonância dentro do veículo nestas faixas de frequência.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo principal estudar a melhoria da percepção de conforto de um jumelo articulado aplicado em uma picape Chevrolet S10 ano 2017, por meio do Método de Elementos Finitos através da aplicação comercial *SolidWorks*. O valor encontrado foi definido a partir de diversas configurações do modelo 3D do veículo, encontrando um valor de 13,3% de diminuição da amplitude sentida pelo chassi.

Os resultados obtidos com a alteração do jumelo original obtiveram uma considerável diminuição da amplitude do sistema, com a redução de 0,15mm para 0,13mm, representando a redução de 13,3%, conferindo ao equipamento uma possível melhora no conforto, visando que a percepção de *ride* do condutor de um veículo é representada pela resposta em excitação do sistema de suspensão, em forma de amplitude. A nova geometria também apresentou fatores adicionais dentro do sistema, como amortecimento, que influenciam dentro da percepção de conforto na dinâmica veicular.

É necessário ressaltar que os valores encontrados nas simulações precisam de validação por meio de ensaios físicos no veículo, com o auxílio de acelerômetros. Os valores reais possivelmente sofrerão interferência no modo como o chassi trabalha nas suas aplicações de força e rodagem. É valido, também, levar em consideração que o *software SolidWorks*, não consegue propor um ambiente com condições de simulação mais próximas da dinâmica veicular.

5.2 Trabalhos futuros

Portanto, os próximos trabalhos terão um desafio em mãos para elaborar um estudo mais preciso, realizando o uso de acelerômetros para construir um ambiente de teste físico em um circuito controlado, observando o funcionamento e resposta real do sistema.

Com isto, também é necessário a utilização de um novo ambiente de simulação para o modelo 3D, onde seja possível aplicar condições de contorno mais próximas da dinâmica veicular real do veículo, como o *Ansys* ou *AdamsCar*. Além disto, com os novos ambientes de simulação elaborar testes de resistência mecânica e fadiga dos componentes utilizados, visando descobrir a segurança do sistema, já que o mesmo faz parte de um sistema estrutural do veículo.

Com os testes realizados, por fim, é possível elaborar um novo modelo de jumelo articulado, onde com a geometria, alcance o maior nível de conforto e segurança aos condutores, com embasamento científico e homologação de produto.

6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BARROS, P. H. B. D.; BAGGIO, I. S. Uma análise espacial da malha rodoviária brasileira: relações com o desenvolvimento econômico regional. **ResearchGate**, São Paulo, Janeiro 2022.

BOSCH, R. **Manual de tecnologia automotiva**. 25ª. ed. São Paulo: Edgard Blücher, v. Único, 2004.

DALFOVO, M. S.; LANA, R. A.; SILVEIRA, A. Métodos quantitativos e qualitativos: um resgate teórico. **Revista Interdisciplinar Científica Aplicada**, Blumenau, v. II, n. 4, p. 01-13, Janeiro 2008. ISSN 1980-7031.

DINIZ, D. D. S. **Estudo da dinâmica vertical em suspensão duplo A de um veículo off-road tipo baja**. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, p. 134. 2014.

DISHANT; SINGH, P.; SHARMA, M. Suspension system: A review. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, v. IV, n. 4, p. 1377-1382, Abril 2017. ISSN 2395-0056.

FIALHO, A. B. **COSMOS:** Plataforma CAE do SolidWorks. 1ª. ed. São Paulo: Editora Érica, v. Único, 2008.

FILHO, A. A. **Elementos Finitos:** A base da tecnologia CAE. 6ª. ed. São Paulo: Editora Érica, v. Único, 2013.

FREITAS JÚNIOR, L. M. P. **Estudo da dinâmica vertical de uma suspensão veicular do tipo Macpherson**. Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 139. 2006.

GAVIRAGHI, D. L. **Metodologia de desenvolvimento de um anteprojeto para veículos leves e médios**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 127. 2005.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de pesquisa**. 1ª. ed. Porto Alegre: UFRGS, v. Único, 2009.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 7ª. ed. Rio de Janeiro: Atlas, v. Único, 2022.

GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of vehicles dynamics**. 1ª. ed. Warrendale: SAE International, v. Único, 1992.

GUERRA, M. V. R. **Desenvolvimento e Análise de um projeto de feixe de molas**. Universidade de Brasília. Brasília, p. 102. 2016.

JACOBSON, B. **Vehycle Dynamics**. 1ª. ed. Gotemburgo: Chalmers, v. Único, 2016.

JAZAR, R. N. **Vehycle Dynamics:** Theory and Applications. 1ª. ed. Riverdale: Springer, v. Único, 2008.

KONDO, R. T. **Animação de simulações de sistems mecânicos multicorpos**. Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 116. 1997.

LIMA, L. F. C. Conforto Veicular em um veículo toyota Etios na cidade universitária Armando de Salles Oliveira - USP, São Paulo. 10.

LOZADA, G.; NUNES, K. D. S. **Metodologia científica**. 1ª. ed. Porto Alegre: Sagah, v. Único, 2018.

MARCONI, M. D. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 9ª. ed. São Paulo: Atlas, v. Único, 2022.

MILLIKEN, W. F.; MILLIKEN, D. L. **Race Car Vehicle Dynamics**. 1ª. ed. Warrendale: SAE International, v. Único, 1995.

PEDERSETTI, D. F. Z. **Medição experimental e identificação de parâmetros de suspensão de um caminhão**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre , p. 28. 2021.

RAO, S. **Vibrações mecânicas**. 4ª. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, v. Único, 2008.

REIMPELL, J.; STOLL, H.; BETZLER, J. W. **The Automotive Chassis:** Engineering Principles. 2ª. ed. Warrendale: SAE International, v. Único, 2001.

RODRIGUES, J. F. S. **Cálculo e avaliação dos parâmetros da rigidez auxiliar à rolagem de uma suspensão dianteira mecânica**. Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 81. 2005.

RUTHES, J. P. **Análise de sensibilidade de suspensão veicular**. Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, p. 56. 2016.

SANTOS, J. A.; FILHO, D. P. **Metodologia científica**. 2ª. ed. São Paulo: Cengage Learning, v. Único, 2011.

SCHROEDER, É. M.; CASTRO, J. C. D. Transporte rodoviário de carga: Situação atual e perspectivas. **Revista do BNDS**, Rio de Janeiro, v. III, n. 6, p. 173-187, Janeiro 1996.

SCURACCHIO, B. G. **Tensões residuais induzidas por shot-peening e durabilidade de molas em lâmina**. Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 130. 2012.

SHIOTSUKI, R. D. **Análise do efeito da suspensão traseira de veículo rodoviário de carga no desempenho de pavimentos flexíveis**. Centro Universitário da Fundação Educacional Inaciana Pe. Sabóia de Medeiros. São Bernardo do Campo, p. 115. 2009.

SILVA, M. M. M.; SILVA, V. R. M.; COSTA, Y. V. Modelagem numérmica em lâmina de mola semielíptica. **ResearchGate**, Teresina, 08 Agosto 2016. 8.

STONE, R.; BALL, J. K. **Automotive Engineering Fundamentals**. 1ª. ed. Warrendale: SAE International, v. Único, 2004.

VIEIRA, J. L. M. **Estudo de dirigibilidade de veículos longos combinados**. Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 116. 2010.

WINKLER, C. B.; ERVIN, R. D. **Rollover of Heavy Commercial Vehicles**. Universidade de Michigan. Michigan, p. 64. 1999.