



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



BRENO MATEUS LIMA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE ¼ DE
UMA SUSPENSÃO AUTOMOTIVA POR MEIO DO SOFTWARE
SCILAB**

OURO PRETO – MG

2023

BRENO MATEUS LIMA
brenomateus65@gmail.com

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE ¼ DE
UMA SUSPENSÃO AUTOMOTIVA POR MEIO DO SOFTWARE
SCILAB**

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. Ronilson Rocha

OURO PRETO – MG
2023



FOLHA DE APROVAÇÃO

Breno Mateus Lima

Modelagem e simulação computacional de 1/4 de uma suspensão automotiva por meio do software SCILAB

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 17 de março de 2023

Membros da banca

Dr. Ronilson Rocha - Orientador (Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. Gustavo Paulinelli Guimarães (Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto)
MSc. Sávio Sade Tayer (Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto)

Ronilson Rocha, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 24/03/2023



Documento assinado eletronicamente por **Ronilson Rocha, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/03/2023, às 11:59, 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 **0497492** e o código CRC **529EFF08**.

*A Deus por proporcionar tudo isso.
“Busquei ao Senhor e ele me respondeu: livrou-me de todos os meus temores.”
(Salmos 34:4)*

AGRADECIMENTO

A Deus por sempre providenciar tudo!

A Nossa Senhora Aparecida por sempre interceder por mim!

Aos meus pais Maria e Edmir.

Aos meus irmãos Bruna, Denis e Helen.

A todos os meus familiares.

Ao meu professor e orientador Ronilson Rocha, pelo incentivo e orientação neste trabalho.

A todos os professores do curso de Engenharia Mecânica por suas importantes contribuições para o desenvolvimento acadêmico.

A Amanda por me incentivar, não me permitir desistir me dar o melhor presente do mundo, a Maria Eduarda, amo vocês!

A todas as pessoas que conheci nessa jornada.

A todas as caronas dessas estradas.

A todas as empresas que trabalhei durante os estudos: RECAM, ESPRO, Itaú e a Robert BOSCH.

Aos amigos: Biel, Bruno César, Eduardo Siervi, Gabriel Prenazzi, Guilherme, Helmuth Morais, Igor Abreu, Pedro Vilaça, Renan Ruy, Samuel e todos que estiveram presentes nesses anos.

A Republica Pasargada: Ex-alunos e moradores.

A “Casa Burnout” e seus moradores.

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

Martin Luther King

RESUMO

Este trabalho apresenta a modelagem matemática e a simulação computacional de $\frac{1}{4}$ de uma suspensão automotiva por meio do software SCILAB. A simplificação de um carro para $\frac{1}{4}$ é possível, visto que a análise pode ser estendida para as demais rodas. O objetivo foi desenvolver um modelo matemático para um sistema de suspensão automotiva aplicando conceitos teóricos e realizar a sua simulação computacional com o uso de um software gratuito e acessível. A pesquisa se baseia no conhecimento dos componentes da suspensão e na necessidade de uma melhor compreensão dos fatores que determinam o seu desempenho, bem como na possibilidade de identificar oportunidades futuras para aprimorar projetos de um sistema de suspensão automotiva. O método utilizado para realizar a simulação foi o aplicativo XCOS do software SCILAB, que é um software gratuito e acessível, amplamente utilizado na engenharia automotiva para simulações precisas e eficientes. Esse modelo permitiu uma fácil e prática modelagem dos componentes envolvidos no sistema de amortecimento. Os resultados mostram um bom desempenho do sistema de suspensão considerado em termos de conforto e estabilidade, especialmente em condições com obstáculos. Neste contexto, esta pesquisa mostra que a simulação computacional utilizando o software SCILAB pode ser uma ferramenta útil para o projeto e a análise de sistemas de suspensão automotivos, permitindo a identificação de oportunidades para otimizar o desempenho e a segurança do veículo.

Palavras-chave: Suspensão automotiva, simulação computacional, amortecimento, software SCILAB, comportamento dinâmico.

ABSTRACT

This paper presents the mathematical modeling and computational simulation of $\frac{1}{4}$ of an automobile suspension using SCILAB software. The simplification of a car to $\frac{1}{4}$ is possible, since the analysis can be extended to the other wheels. The goal was to develop a mathematical model for an automotive suspension system by applying theoretical concepts and to perform its computational simulation using free and accessible software. The research is based on the knowledge of suspension components and the need for a better understanding of the factors that determine their performance, as well as the possibility of identifying future opportunities to improve the design of an automotive suspension system. The method used to perform the simulation was SCILAB's XCOS software application, which is a free and affordable software program widely used in automotive engineering for accurate and efficient simulations. This model allowed easy and practical modeling of the components involved in the damping system. The results show good performance of the considered suspension system in terms of comfort and stability, especially in obstacle conditions. In this context, this research shows that computer simulation using SCILAB software can be a useful tool for the design and analysis of automotive suspension systems, allowing the identification of opportunities to optimize vehicle performance and safety.

Keywords: *Automotive suspension, computer simulation, damping, SCILAB software, dynamic behavior.*

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Mola helicoidal | 10 |
| Figura 2 - Mola de lâmina | 10 |
| Figura 3 - Mola de ar | 11 |
| Figura 4- Amortecedores | 12 |
| Figura 5 - Braço oscilante..... | 14 |
| Figura 6 - Buchas de borracha..... | 15 |
| Figura 7 - Pivô | 16 |
| Figura 8 - Coxim | 16 |
| Figura 9 - Barra estabilizadora | 17 |
| Figura 10 - Suspensão McPherson | 18 |
| Figura 11 - Suspensão Double Wishbone | 20 |
| Figura 12 - Suspensão traseira multilink | 21 |
| Figura 13 - Suspensão de Eixo Rígido com feixe de molas | 23 |
| Figura 14 - Suspensão de Barra de Torsão | 24 |
| Figura 15 - Suspensão magnética | 25 |
| Figura 16- Suspensão a ar..... | 26 |
| Figura 17 - Estrutura dos pneus..... | 27 |
| Figura 18 - Materiais e métodos | 33 |
| Figura 19 - Carro e o esquema de suspensão do veículo..... | 36 |
| Figura 20 - Esquema de suspensão de ¼ do veículo | 37 |
| Figura 21 - Diagramas de corpo livre..... | 37 |
| Figura 22 – Frequências de amortecimento versos aceleração vertical..... | 40 |
| Figura 23 - Diagramas de blocos.XCOS no software SCILAB | 43 |
| Figura 24 – Perturbação gerada pelo obstáculo da estrada (entrada). | 43 |
| Figura 25 - Deslocamento vertical da roda (entrada) | 44 |
| Figura 26 - Velocidade vertical da roda (entrada)..... | 45 |
| Figura 27 - Aceleração vertical da roda (entrada) | 45 |
| Figura 28 - Métodos de integração numérica disponíveis no XCOS | 46 |
| Figura 29 - Aceleração vertical da roda (entrada) pelo método RK4..... | 46 |
| Figura 30 - Deslocamento vertical da carroceria (entrada) | 47 |
| Figura 31- Velocidade vertical da carroceria (entrada) | 48 |
| Figura 32 - Aceleração vertical da carroceria (entrada) | 48 |

| | |
|--|----|
| Figura 33 - Aceleração vertical da carroceria (entrada)..... | 49 |
| Figura 34 - Sinais de entrada para pista irregular em forma de pulsos frequentes | 50 |
| Figura 35 - Movimento da roda em pista irregular | 50 |
| Figura 36 - Movimento do carro em pista irregular..... | 51 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 -Varáveis e indicadores..... | 34 |
| Tabela 2 - Validação dos resultados | 53 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 | Formulação do Problema | 1 |
| 1.2 | Justificativa | 3 |
| 1.3 | Objetivos | 4 |
| 1.3.1 | Objetivo Geral..... | 4 |
| 1.3.2 | Objetivos Específicos..... | 4 |
| 1.4 | Estrutura do trabalho | 4 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 6 |
| 2.1 | Suspensão Automotiva..... | 6 |
| 2.1.1 | Evolução da suspensão..... | 7 |
| 2.1.2 | Tipos de mola..... | 8 |
| 2.1.3 | Amortecedores..... | 12 |
| 2.2 | Demais peças de suspensão..... | 14 |
| 2.2.1 | Braço oscilante..... | 14 |
| 2.2.2 | Buchas de borracha | 15 |
| 2.2.3 | Pivô | 15 |
| 2.2.4 | Coxim..... | 16 |
| 2.2.5 | Barra estabilizadora..... | 17 |
| 2.3 | Principais tipos de suspensão | 17 |
| 2.3.1 | Suspensão McPherson..... | 17 |
| 2.3.2 | Suspensão Double Wishbone..... | 19 |
| 2.3.3 | Suspensão Multilink..... | 21 |
| 2.3.4 | Suspensão de Eixo Rígido..... | 22 |
| 2.3.5 | Suspensão de Barra de Torsão | 23 |
| 2.3.6 | Suspensão magnética | 24 |
| 2.3.7 | Suspensão a ar | 25 |
| 2.3.8 | Pneu..... | 26 |
| 2.4 | Modelagem computacional | 27 |
| 2.5 | Software SCILAB | 29 |
| 3 | METODOLOGIA | 31 |
| 3.1 | Tipos de pesquisa | 31 |
| 3.2 | Materiais e métodos | 33 |
| 3.3 | Variáveis e indicadores | 33 |
| 3.4 | Instrumento de coleta de dados | 34 |
| 3.5 | Tabulação dos dados | 34 |
| 3.6 | Considerações finais do capítulo..... | 35 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 36 |
| 5 | CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES..... | 54 |
| 5.1 | Conclusões | 54 |
| 5.2 | Recomendações..... | 55 |
| | REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA | 57 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Formulação do Problema

A suspensão veicular é um sistema responsável por garantir a estabilidade, conforto e segurança durante a condução do veículo. Segundo Nise et al (2002), a suspensão pode ser dividida em dois sistemas: o sistema de suspensão e o sistema de direção. O sistema de suspensão é composto por molas e amortecedores, que atuam em conjunto para suavizar as irregularidades do terreno, enquanto o sistema de direção é responsável por permitir o controle do veículo.

De acordo com Ogata (2010), a escolha do tipo de suspensão deve levar em consideração diversos fatores, tais como: tipo de veículo, carga transportada, condições de uso, entre outros. Existem vários tipos de suspensão, como a suspensão independente, semi-independente e rígida. A suspensão independente, por exemplo, é capaz de oferecer maior conforto e estabilidade em curvas, uma vez que cada roda é capaz de se movimentar independentemente da outra. Já a suspensão semi-independente é uma opção mais econômica, já que as rodas são ligadas por um eixo rígido.

Além disso, Nise et al (2002) destacam que o sistema de suspensão deve ser projetado de forma a garantir a estabilidade do veículo em todas as condições de carga e velocidade. Para isso, é necessário que o projeto leve em consideração o centro de gravidade do veículo, a distribuição da carga, a geometria da suspensão, entre outros fatores. Já o sistema de direção deve ser projetado de forma a garantir a precisão e a segurança do veículo.

Ogata (2010) ressalta que, além de garantir a estabilidade e a segurança do veículo, a suspensão também pode afetar o consumo de combustível. Isso porque um sistema de suspensão mal projetado pode causar maior atrito com o solo, o que resulta em maior consumo de combustível. Portanto, é importante que o projeto leve em consideração não apenas a estabilidade e o conforto, mas também a eficiência energética.

Os autores Nise et al (2002) ainda enfatizam que o sistema de suspensão é um sistema complexo e que requer um projeto cuidadoso e preciso. Para garantir o desempenho adequado do sistema, é necessário realizar testes e ajustes, a fim de otimizar a geometria da suspensão, a rigidez das molas e a eficiência dos amortecedores. Somente com um projeto cuidadoso e uma

manutenção adequada é possível garantir a segurança, o conforto e a eficiência do sistema de suspensão veicular.

Para facilitar o projeto, a simulação computacional é uma técnica utilizada para modelar e analisar o comportamento de sistemas complexos, como é o caso da suspensão veicular. Segundo Wang et al. (2018), a simulação computacional permite a realização de testes virtuais em condições controladas, o que pode reduzir os custos e o tempo necessário para o desenvolvimento e aprimoramento dos sistemas.

De acordo com os autores, a simulação computacional permite a criação de modelos matemáticos dos sistemas e a realização de testes virtuais em diferentes condições de operação. Com isso, é possível simular o comportamento da suspensão veicular em diferentes condições de carga, velocidade e terreno.

Wang et al. (2018) destacam que a simulação computacional é uma ferramenta útil para a análise do desempenho da suspensão veicular em diferentes cenários. Com a simulação, é possível avaliar a eficiência dos amortecedores, a rigidez das molas e a geometria da suspensão, entre outros fatores. Além disso, é possível identificar e corrigir problemas no projeto antes mesmo da fabricação do veículo.

Outra vantagem da simulação computacional apontada pelos autores é a possibilidade de realizar testes em condições extremas, que seriam impraticáveis ou perigosas na vida real. Por exemplo, é possível simular a suspensão do veículo em condições de terreno muito acidentado ou em alta velocidade, a fim de avaliar a sua estabilidade e segurança nessas situações.

No entanto, Wang et al. (2018) destacam que a simulação computacional não é uma técnica infalível e que os resultados obtidos devem ser analisados com cuidado. É importante considerar as limitações do modelo matemático utilizado na simulação, assim como os possíveis erros introduzidos pelos parâmetros de entrada. Por isso, é importante validar os resultados da simulação por meio de testes experimentais em condições reais.

O software SCILAB é uma ferramenta de software livre e de código aberto que pode ser utilizada para a simulação computacional de sistemas. De acordo com Campos Filho (2010), o software SCILAB oferece uma ampla gama de recursos para modelagem, simulação e análise de sistemas, incluindo funções para a solução de equações diferenciais, otimização, processamento de sinais e controle.

Segundo o autor, o software SCILAB é especialmente útil para a simulação de sistemas dinâmicos, como é o caso da suspensão veicular, pois permite a criação de modelos matemáticos do sistema e a realização de testes virtuais em diferentes condições de operação.

Com o uso do software SCILAB, é possível simular o comportamento da suspensão veicular em diferentes condições de carga, velocidade e terreno.

Campos Filho (2010) ressalta que o software SCILAB possui uma interface gráfica intuitiva e fácil de usar, o que facilita a criação e a visualização dos modelos matemáticos. Além disso, o software SCILAB oferece uma ampla documentação e uma comunidade de usuários ativa, o que pode auxiliar na resolução de problemas e no aprimoramento do conhecimento.

Este trabalho está inserido na área de Engenharia Mecânica, que tem como objetivo estudar o comportamento, projeto e desenvolvimento de sistemas mecânicos, tais como sistemas de suspensão, entre outros. A área específica é a suspensão automotiva, que é um importante componente para o funcionamento do veículo.

Nesta área de atuação, a indústria automotiva, a qualidade e o desempenho da suspensão são fatores críticos para a competitividade e a segurança dos produtos produzidos. A relação entre as áreas de Engenharia Mecânica e Computação se dá pela necessidade de compreender o comportamento dinâmico da suspensão automotiva. A Engenharia Mecânica estuda o comportamento dinâmico do veículo, incluindo a suspensão. Nessa área, são aplicados princípios da física para analisar e modelar os movimentos do veículo, bem como para prever e otimizar o seu desempenho. O objetivo é projetar e desenvolver sistemas mecânicos, enquanto a Computação oferece ferramentas poderosas para análise e simulação de sistemas complexos.

Com tantos benefícios ao se usar o software SCILAB para simular computacionalmente um modelo de sistema de suspensão veicular, o estudo visa solucionar a seguinte problemática:

Como realizar a simulação computacional de $\frac{1}{4}$ de uma suspensão automotiva por meio do software SCILAB?

1.2 Justificativa

A suspensão automotiva é fundamental para proporcionar conforto e estabilidade ao veículo, permitindo a absorção de impactos e sensações durante a condução. Além disso, contribui para a segurança, garantindo a estabilidade da carroceria em curvas e o risco de capotamento. A melhoria da suspensão contribui para a redução de acidentes e para a eficiência energética dos veículos, sendo assim, uma tecnologia de grande importância para a sociedade. A simulação computacional de suspensões automotivas através do software SCILAB pode

contribuir para a criação de modelos mais precisos e espontâneos, atendendo a necessidade de testes físicos e, conseqüentemente, os custos e tempo de desenvolvimento.

Portanto, a justificativa para a escolha do tema "Modelagem e simulação computacional de $\frac{1}{4}$ de uma suspensão automotiva por meio do software SCILAB" é fundamentada na conversão do assunto para a engenharia mecânica e automotiva, nos benefícios oferecidos pelo software SCILAB como ferramenta de simulação, nas contribuições para a solução da pergunta-problema e para o setor de atuação.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Aprimorar o conhecimento sobre o funcionamento e as características do sistema de suspensão automotiva e estabelecer uma análise para a simulação computacional do amortecimento de sistemas de suspensões automotivas utilizando o software SCILAB com a finalidade de obter resultados acurados e analisar o desempenho e comportamento dinâmico do sistema de suspensão.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre suspensões automotivas e simulação computacional;
- Apresentar o modelo matemático de uma suspensão automotiva;
- Desenvolver um modelo no software SCILAB, para simular a atuação da suspensão;

1.4 Estrutura do trabalho

O trabalho será organizado em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma introdução ao tema e o problema de pesquisa, justificando a escolha do tema e os objetivos do

trabalho. O segundo capítulo aborda uma revisão bibliográfica sobre os conceitos de suspensão automotiva, tipos de suspensão, características e desempenho, simulação computacional e Software SCILAB. O terceiro capítulo descreve a análise utilizada para a simulação computacional do amortecimento da suspensão automotiva, detalhando as etapas do processo e as condições de simulação. O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos com as simulações realizadas, com uma análise crítica e interpretação dos resultados. O quinto e último capítulo conclui o trabalho, propondo ainda indicações para trabalhos futuros relacionados ao tema.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo busca apresentar uma revisão da literatura disponível, destacando os aspectos principais para o desenvolvimento deste trabalho que serão abordados ao longo do texto.

2.1 Suspensão Automotiva

De forma primária a suspensão veicular é um componente importante no desempenho e segurança dos veículos, pois é responsável por garantir a estabilidade e conforto ao dirigir.

De acordo com Ogata (2018, p. 100), a suspensão veicular é um sistema mecânico responsável por absorver as irregularidades do terreno e manter o conforto dos passageiros durante o trajeto. Além disso, a suspensão é essencial para garantir a estabilidade do veículo em curvas e frenagens bruscas, contribuindo para a segurança no trânsito.

Gillespie (1992, p. 35) reforça a importância da suspensão veicular como um sistema que impacta diretamente na dirigibilidade e na estabilidade do veículo. O autor destaca que a suspensão é um componente complexo, que envolve diversos elementos como molas, amortecedores, braços de suspensão, barras estabilizadoras, entre outros.

Seguindo a mesma linha de pensamento, Cunha e Silva (2017, p. 3) afirmam que a suspensão é um componente fundamental para o desempenho dinâmico de um veículo, sendo responsável por manter a estabilidade e a aderência dos pneus ao solo. Segundo os autores, uma suspensão mal projetada pode comprometer não apenas o conforto dos passageiros, mas também a dirigibilidade e a segurança do veículo.

De acordo com Menezes et al. (2012), a suspensão é responsável por assegurar a segurança do veículo, evitando perda de controle e acidentes em situações de curvas, frenagens e desníveis de pista. Ainda, segundo os autores, a suspensão deve ser projetada de forma a garantir a estabilidade em diferentes condições de carga e manter as características de dirigibilidade do veículo ao longo do tempo de uso.

A suspensão veicular automotiva é um objeto de estudo também na área de engenharia de sistemas mecatrônicos. Segundo Karnopp et al. (2012), a suspensão é um sistema dinâmico não linear que pode ser modelado matematicamente para análise e simulação. A modelagem

pode ser utilizada para o projeto de controladores para a suspensão, visando melhorar o desempenho e o conforto do veículo.

Dessa forma, a simulação computacional de 1/4 de uma suspensão veicular através do software SCILAB é uma ferramenta valiosa para a análise do comportamento dinâmico desse sistema, permitindo a avaliação de diferentes configurações e parâmetros de amortecimento. Segundo Ogata (2018, p. 102), a modelagem matemática da suspensão veicular pode ser realizada a partir de equações diferenciais que descrevem as forças envolvidas no sistema, tais como a força de mola e a força de amortecimento.

Nesse sentido, a utilização do software SCILAB permite a implementação dessas equações em um modelo de simulação, que pode ser utilizado para avaliar o desempenho do amortecimento. Além disso, a simulação computacional também pode ser utilizada para otimizar o projeto da suspensão, buscando-se um compromisso entre o conforto dos passageiros e a estabilidade do veículo.

2.1.1 Evolução da suspensão

A história da suspensão veicular é marcada pela evolução constante dos sistemas de amortecimento e da carroceria dos veículos, buscando sempre aprimorar a dirigibilidade, a segurança e o conforto dos passageiros. Desde os primeiros veículos de tração animal até os veículos elétricos, a suspensão tem sido um dos componentes fundamentais do veículo.

Segundo Souza e outros (2014), a suspensão veicular começou a ser desenvolvida no final do século XIX com a invenção da mola de lâminas. Antes disso, os carros eram embutidos com suspensão rígida, o que tornava a viagem extremamente desconfortável. Com a mola de lâminas, os carros passaram a ter um nível de conforto muito maior, pois a mola absorveu parte dos choques e vibrações da estrada. A partir daí, a suspensão veicular evoluiu rapidamente, com o surgimento de novos tipos de molas, como a mola helicoidal e a mola pneumática.

De acordo com Baker (2015), a história da suspensão veicular pode ser dividida em três fases principais: a fase da mola, a fase da barra de torção e a fase dos sistemas independentes.

Segundo OGATA (2020):

"A introdução de uma mola no sistema de suspensão permite que o veículo absorva as vibrações causadas pelas irregularidades da estrada. A fase da mola é uma das fases mais importantes na suspensão, pois determina a capacidade de absorção de impactos e vibrações do veículo" (OGATA, 2010, p. 560).

Na fase da mola, as primeiras suspensões eram compostas por molas simples colocadas entre a carroceria e a roda. A barra de torção foi introduzida na segunda fase, permitindo uma maior estabilidade e uma melhor absorção de impactos. Por fim, a terceira fase trouxe consigo a popularização dos sistemas independentes, que permitem ao veículo se adaptar a diferentes superfícies da estrada e oferecer uma dirigibilidade mais suave e precisa.

GILLESPIE (1992), sobre a fase da barra de torção:

"A barra de torção é um componente essencial nas suspensões veiculares, sendo responsável por absorver os impactos das rodas e manter a estabilidade do veículo. A fase da barra de torção é fundamental para garantir a eficiência do sistema de suspensão e proporcionar uma condução suave e segura" (GILLESPIE, 1992, p. 151).

Oliveira (2017) destaca a importância dos avanços tecnológicos na evolução da suspensão veicular. Com o desenvolvimento de novos materiais, como aço de alta resistência e compósitos leves, e a utilização de tecnologias avançadas, como sistemas eletrônicos de controle e sensores, os veículos modernos contam com sistemas de suspensão mais avançados e eficientes. Esses avanços têm permitido não somente melhorar o conforto dos passageiros, mas também aumentar a segurança em caso de colisão.

Karnopp et al. (2012) apontam que a evolução da suspensão veicular continua até os dias de hoje, com a introdução de novas tecnologias, como a suspensão ativa e a suspensão adaptativa. A suspensão ativa utiliza sensores para monitorar as condições da estrada e ajusta a suspensão de acordo com essas condições, garantindo uma viagem extremamente confortável. A suspensão adaptativa, por sua vez, permite que o motorista ajuste a suspensão de acordo com suas preferências de condução, oferecendo uma experiência de direção personalizada.

2.1.2 Tipos de mola

Segundo Souza e outros. (2014), a suspensão é composta por molas, barras estabilizadoras, pivôs, buchas, braços de controle, dentre outros componentes. Esses elementos trabalham em conjunto para suportar o peso do veículo e absorver as irregularidades do terreno, mantendo o contato dos pneus com o solo e proporcionando conforto aos ocupantes.

De acordo com o artigo "Suspensão Veicular: Tipos e Aplicações" (Lima, 2018), é importante destacar que a escolha do tipo de suspensão ideal depende das necessidades e objetivos de cada veículo, levando em consideração fatores como o tipo de uso, o tipo de

terreno, a performance e o conforto desejados. Por isso, é fundamental conhecer as diferentes classificações da suspensão veicular para escolher a opção mais adequada para cada situação.

É importante destacar que diferentes tipos de amortecimento dependem de diferentes tipos de mola e de amortecedores, que oferecem diferentes níveis de conforto e estabilidade, por isso é fundamental conhecer as diferentes classificações da suspensão veicular para escolher a opção mais adequada para cada situação.

Conforme Heywood (2018):

"as molas são componentes essenciais das suspensões veiculares, pois são responsáveis por absorver e dissipar a energia cinética do veículo ao se deslocar sobre superfícies irregulares. Elas são capazes de armazenar energia potencial elástica quando comprimidas, e liberá-la gradualmente quando a força é removida, permitindo que o veículo mantenha sua estabilidade e conforto em diferentes condições de operação." (Heywood 2018, p. 364):

Segundo Milliken e Milliken (2002), as molas das suspensões veiculares devem ser dimensionadas de acordo com a massa do veículo, suas características dinâmicas, e as condições de operação às quais serão mantidos. As molas também devem ser projetadas para resistir à fadiga, resistência e deformação permanente, garantindo a durabilidade e confiabilidade do sistema de suspensão.

De acordo com Crolla (2006), as molas das suspensões veiculares são projetadas para trabalhar em conjunto com outros componentes, como os choques e os pneus, a fim de garantir a estabilidade e segurança do veículo. As molas também têm um papel importante na distribuição do peso entre as rodas do veículo, influenciando diretamente sua capacidade de tração, aderência e frenagem.

De acordo com o artigo "Classificação da Suspensão Veicular" (Santos, 2020), a suspensão veicular pode ser classificada de diversas formas, sendo as mais comuns: por tipo de mola e a classificação por tipo de braço.

Na classificação por tipo de mola, as suspensões são divididas em três tipos: mola helicoidal, mola de lâmina e mola a ar.

Observa-se a mola helicoidal na figura 1:



Figura 1 - Mola helicoidal

Fonte: Cofap (2022)

De acordo com Gillespie (1992), a mola helicoidal é um tipo de mola bastante utilizado em suspensões veiculares. Suas principais vantagens são a simplicidade construtiva, menor peso e menor espaço ocupado em comparação com as molas de lâmina. Além disso, a mola helicoidal proporciona um movimento mais suave e contínuo do veículo, o que aumenta o conforto dos ocupantes.

Por outro lado, as desvantagens da mola helicoidal incluem a dificuldade de ajuste da altura do veículo, pois isso requer a troca da mola ou o uso de acessórios adicionais. Além disso, a mola helicoidal tende a ter uma vida útil mais curta do que as molas de lâmina, especialmente quando sujeitas a cargas cíclicas intensas. Por fim, a mola helicoidal é mais suscetível a falhas por fadiga e deformação plástica do que as molas de lâmina (figura 2), devido à sua menor capacidade de absorção de energia.



Figura 2 - Mola de lâmina

Fonte: Mecânica (2012)

De acordo com Gillespie (1992), a mola de lâmina apresenta como principal vantagem a capacidade de suportar grandes cargas e fornecer uma rigidez longitudinal ao veículo, o que é importante em aplicações comerciais e veículos off-road. Além disso, é uma opção mais econômica em relação a outras molas, pois pode ser fabricada com materiais de menor custo.

Por outro lado, as desvantagens da mola de lâmina incluem sua sensibilidade às condições de temperatura e umidade, o que pode comprometer sua durabilidade e eficiência ao longo do tempo. Além disso, a rigidez da mola pode tornar o passeio menos confortável para os passageiros, especialmente em superfícies irregulares. Outro fator a ser considerado é o peso adicional que as molas de lâmina acrescentam ao veículo, o que pode afetar negativamente o desempenho e o consumo de combustível.

Por fim, a mola de ar mostrada na figura 3 é composta por uma bolsa de ar pressurizada e é usada principalmente em veículos esportivos e de alta performance.



Figura 3 - Mola de ar

Fonte: Top da Boleia - Peças e Acessórios (2023)

De acordo com Gillespie (1992), a mola de ar tem algumas vantagens em relação às molas de lâmina e helicoidal, tais como uma maior flexibilidade para a configuração da suspensão, ajuste da altura do veículo, melhor absorção de impactos e vibrações e uma resposta mais rápida às mudanças nas condições de condução. Além disso, a mola de ar pode ser usada em diferentes tipos de veículos, desde carros de passeio até ônibus e caminhões.

No entanto, Gillespie (1992) aponta algumas desvantagens da mola de ar, como a necessidade de um sistema de controle eletrônico mais sofisticado e sensível para manter a pressão correta nos pneus e na mola, o que aumenta o custo e a complexidade do sistema de

suspensão. Além disso, a mola de ar pode ter uma vida útil mais curta em comparação com as molas de lâmina e helicoidal, especialmente em condições de uso mais severas.

2.1.3 Amortecedores

Os amortecedores são componentes responsáveis por controlar a oscilação da mola e manter o pneu em contato constante com o solo, proporcionando estabilidade e conforto ao veículo. Eles funcionam através do movimento do pistão dentro de um tubo cheio de óleo. A resistência gerada pelo pistão controla a oscilação da mola e impede que o veículo pule ou vibre excessivamente (SANTOS et al., 2021).

De acordo com Morsch et al. (2019), os amortecedores hidráulicos possuem diferentes tipos de configurações, como o amortecedor de simples ação, o amortecedor de dupla ação e o amortecedor de dupla ação com câmara separada. Abaixo na figura 4, temos exemplos de amortecedores.



Figura 4– Amortecedores

Fonte: Karvi (2021)

As molas e os amortecedores são os principais componentes da suspensão, mas por si só não são capazes de classifica-las individualmente. Uma categorização muito aceita se dá pelo tipo de braço.

De acordo com Gillespie (1992), existem diversos tipos de suspensões por braço, cada um com suas características e limitações.

Na classificação por tipo de braço, as suspensões são divididas em três tipos: suspensão tipo barra de torção, suspensão independente e suspensão semi-independente.

Gillespie (1992) explica que a suspensão tipo barra de torção é um tipo de suspensão que usa uma barra de torção para conectar as rodas direita e esquerda de um eixo.

Ogata (2014) descreve a suspensão tipo barra de torção como um tipo de suspensão que usa uma barra de torção para suportar a carga do veículo e fornece flexibilidade. Ele menciona que "a suspensão de barra de torção é caracterizada pela suspensão de um eixo em um ponto da barra de torção, enquanto o outro ponto é fixado ao chassi. A torção da barra de torção é usada para acomodar as variações da estrada e para absorver as vibrações do veículo"(OGATA, 2014, p.553).

A suspensão independente é composta por braços ou hastes que trabalham independentemente, proporcionando maior estabilidade e conforto ao veículo.

Gillespie (1992) destaca a importância da suspensão independente, afirmando que "a suspensão independente permite que as rodas do veículo se movam independentemente, melhorando a estabilidade em curvas e reduzindo a transferência de carga entre as rodas, resultando em uma dirigibilidade mais precisa" (GILLESPIE 1992, p. 176)

De acordo com Ogata (2010), "a suspensão independente é amplamente utilizada nos veículos modernos, pois permite melhorar o desempenho de dirigibilidade, estabilidade, conforto e segurança" (OGATA 2010 p. 492).

Já a suspensão semi-independente é composta por braços ou hastes que trabalham de forma conjunta, proporcionando uma combinação de estabilidade e conforto.

De acordo com Ogata (2004), a suspensão semi-independente é uma variação da suspensão rígida, onde uma barra de torção ou uma mola helicoidal é adicionada para proporcionar flexibilidade vertical. Já Gillespie (1992) destaca que a suspensão semi-independente é uma mistura entre a suspensão rígida e a suspensão independente, onde o eixo de torção é dividido em duas partes, uma fixa à carroceria e outra às rodas. Essa configuração permite algum grau de movimento independente entre as rodas, mas ainda há conexão entre elas por meio da barra de torção ou mola helicoidal.

Ogata (2004) destaca que a suspensão semi-independente é uma opção mais econômica em comparação com a suspensão independente, pois possui menos componentes e é mais fácil de fabricar. Para se atender a tantas variáveis, o estudo aprofundado das suspensões veiculares é de extrema importância.

O estudo da suspensão veicular também é importante para o desenvolvimento de veículos mais seguros e confortáveis, bem como para aprimorar as tecnologias envolvidas nesse sistema mecânico.

2.2 Demais peças de suspensão

Apesar de existirem vários tipos de sistema de suspensão, há componentes comuns entre eles, variando a forma das peças e a quantidade envolvida no projeto. Veja a seguir os elementos de suspensão que equipam o sistema de amortecimento.

2.2.1 Braço oscilante

Algumas peças possuem diferentes nomes dependendo da região. O braço oscilante mostrado na Figura 5, por exemplo, também pode ser chamado de bandeja da suspensão.



Figura 5 - Braço oscilante

Fonte: Hiper (2023)

Ele é responsável por ligar a coluna (onde se encontram o amortecedor, a mola e outras peças) ao chassi do veículo. Ele é o ponto de apoio inferior para a suspensão executar seu movimento oscilatório de subida e descida.

2.2.2 Buchas de borracha

As buchas são responsáveis por impedir o atrito de ferro com ferro. Além disso, elas permitem que o braço oscilante realize seu movimento sem gerar ruído. Veja na figura 6:



Figura 6 - Buchas de borracha

Fonte: PecaHoje (2023)

Por ser um componente de borracha, é comum o seu desgaste, principalmente se o motor tiver algum vazamento de óleo que passe por elas.

2.2.3 Pivô

O pivô, que também é conhecido pelo nome de junta esférica, é responsável por fazer com que a coluna da suspensão gire em seu próprio eixo, permitindo que a caixa de direção empurre as rodas e execute as manobras de direção.

O defeito mais comum do pivô é a folga, que pode ser identificada no alinhamento. Nesse caso, é preciso realizar a substituição, pois um pivô com folga não deixa o carro segurar o alinhamento por muito tempo. A figura 7 destaca o pivô:



Figura 7 - Pivô

Fonte: Hiper (2023)

2.2.4 Coxim

O coxim do amortecedor é uma peça de metal revestida por uma borracha. Sua função é fixar o amortecedor no monobloco. Observe na figura 8:



Figura 8 - Coxim

Fonte: Cofap (2023)

É ele que recebe os impactos do amortecedor, além de permitir que a coluna da suspensão rotacione com o movimento do volante. Por ser envolvido em borracha, o coxim passa por desgastes e pode produzir barulhos ao passar em buracos.

2.2.5 Barra estabilizadora

A barra estabilizadora liga as duas colunas de suspensão, permitindo maior estabilidade ao carro, além de transferir igualmente a força entre as rodas. Conforme podemos observar na figura 9.

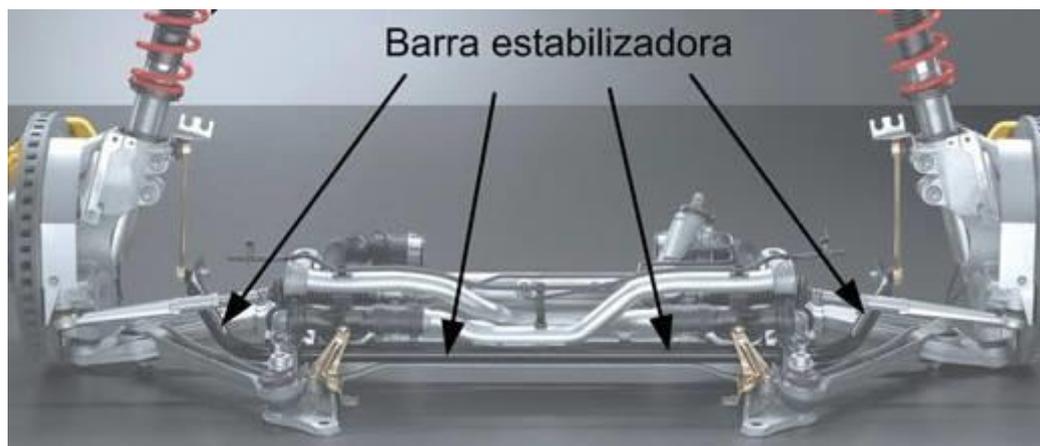


Figura 9 - Barra estabilizadora

Fonte: Cultura (2015)

Essa barra é fixada na carroceria com o auxílio de buchas e as colunas são ligadas a ela por meio de bieletas.

2.3 Principais tipos de suspensão

2.3.1 Suspensão McPherson

A suspensão McPherson é um sistema de suspensão independente, que utiliza um único braço oscilante, fixado a uma torre superior e conectado a uma junta esférica na extremidade inferior.

Segundo Gillespie (1992), a suspensão McPherson é um tipo de suspensão independente amplamente utilizada em veículos de passeio. Nesse tipo de suspensão, a roda é fixada em um

conjunto de suspensão, que é preso à carroceria do veículo por meio de um suporte vertical. A parte superior desse suporte é conectada à carroceria por meio de um coxim elástico, permitindo a absorção de vibrações e impactos.

Entre as vantagens da suspensão McPherson, Gillespie (1992, p. 181) destaca a simplicidade do projeto, o baixo custo de produção, a facilidade de manutenção e a leveza do sistema, o que contribui para o baixo consumo de combustível do veículo. Além disso, a suspensão McPherson permite uma boa estabilidade lateral do veículo, o que é importante para a segurança durante as curvas.

No entanto, Gillespie (1992) também aponta algumas desvantagens da suspensão McPherson. Uma delas é a limitação da amplitude de movimento da roda, o que pode afetar o conforto dos passageiros em superfícies irregulares. Além disso, a suspensão McPherson não é adequada para veículos de grande porte, pois não apresenta resistência suficiente para suportar cargas pesadas.

Abaixo na figura 10, a ilustração dessa suspensão:



Figura 10 - Suspensão McPherson

Fonte: Antimpacto (2018)

Ogata (2010) apresenta a suspensão McPherson como um dos tipos mais comuns de suspensão para veículos. Segundo o autor, a suspensão McPherson tem a vantagem de possuir um projeto simples e de baixo custo, além de proporcionar um bom equilíbrio entre conforto e estabilidade do veículo. No entanto, Ogata ressalta que a suspensão McPherson apresenta algumas desvantagens, como a possibilidade de desgaste irregular dos pneus, devido à

inclinação da roda durante a compressão da suspensão, e o fato de a geometria da suspensão afetar o alinhamento das rodas.

2.3.2 Suspensão Double Wishbone

Já a suspensão Double Wishbone (também chamada de duplo triângulo ou duplo A) é outro sistema de suspensão independente, que utiliza dois braços oscilantes em forma de “V” para controlar o movimento vertical da roda.

Segundo Gillespie (1992), a suspensão Double Wishbone, também conhecida como suspensão de braços duplos, é amplamente utilizada em veículos de alto desempenho, como carros de corrida e esportivos. Essa suspensão é caracterizada por possuir dois braços triangulares, um superior e outro inferior, conectados ao chassi do veículo e à roda. O braço superior é mais curto que o inferior e ambos são ligados à roda através de pivôs.

Entre as vantagens da suspensão Double Wishbone, Gillespie (1992) destaca a estabilidade e a precisão na condução, devido à geometria dos braços que proporciona uma maior variação da inclinação da roda em relação ao solo, reduzindo assim a transferência de peso em curvas e melhorando a aderência dos pneus. Além disso, essa suspensão permite uma ampla faixa de ajuste para o ajuste da geometria da suspensão, como caster, camber e toe, possibilitando uma maior personalização para cada tipo de condução.

Por outro lado, Gillespie (1992) menciona que a suspensão Double Wishbone pode ser mais complexa e cara em comparação com outros tipos de suspensão, devido ao maior número de componentes e sua complexidade na fabricação. Além disso, a suspensão Double Wishbone

pode ocupar mais espaço, o que pode ser uma limitação em veículos menores ou com espaço limitado para a suspensão. A figura 11 mostra os detalhes:



Figura 11 - Suspensão Double Wishbone

Fonte: Antimpacto (2018)

Ogata (2014, p. 220) descreve que a suspensão Double Wishbone, é uma configuração que apresenta duas ligações triangulares ou "braços" que conectam o cubo da roda à carroceria do veículo. Segundo o autor, essa suspensão permite uma maior liberdade na escolha da geometria e cinemática da suspensão, o que possibilita a obtenção de um maior controle sobre a rotação e movimentação das rodas.

Entre as vantagens da suspensão Double Wishbone, Ogata (2014, p. 220) destaca que ela apresenta um melhor controle do movimento vertical da roda, garantindo uma maior estabilidade e um melhor desempenho em curvas e manobras. Além disso, essa suspensão também permite uma melhor distribuição da carga nas rodas e uma redução da tendência do veículo em "mergulhar" ou "afundar" nas frenagens.

Por outro lado, Ogata (2014) ressalta que a suspensão Double Wishbone é uma configuração mais complexa e que exige um maior espaço físico, o que pode limitar sua aplicação em determinados tipos de veículos. Além disso, a maior quantidade de componentes pode aumentar o custo de produção e manutenção do sistema.

2.3.3 Suspensão Multilink

A suspensão Multilink, também conhecida como suspensão de braços múltiplos, é um tipo de sistema de suspensão que utiliza diversos braços de controle (de 3 a 5) para conectar a roda ao chassi do veículo, conforme a figura 12. De acordo com Gillespie (1992), a suspensão Multilink é um sistema sofisticado que oferece um bom equilíbrio entre conforto e desempenho, sendo amplamente utilizado em veículos de alto desempenho e de luxo.



Figura 12 - Suspensão traseira multilink

Fonte: Quatro Rodas (2021)

Ogata (2014) destaca que a suspensão Multilink é um sistema mais complexo e difícil de ser modelado matematicamente em comparação com outros tipos de suspensão, como a suspensão McPherson. No entanto, sua complexidade permite uma maior flexibilidade no ajuste da geometria de suspensão, permitindo um melhor controle do comportamento dinâmico do veículo.

Segundo Ogata (2014), "a suspensão Multilink permite que a geometria de suspensão seja ajustada com maior precisão, o que pode resultar em melhorias significativas no comportamento dinâmico do veículo, como maior estabilidade e menor rolagem em curvas" (OGATA, 2014, p. 218).

Gillespie (1992) ressalta que uma das principais vantagens da suspensão Multilink é a sua capacidade de controlar o movimento das rodas independentemente umas das outras, o que

permite uma melhor adaptação às diferentes condições de superfície e de carga. Além disso, a suspensão Multilink oferece uma maior capacidade de ajuste da geometria de suspensão em relação a outros tipos de suspensão, permitindo uma melhor adaptação às diferentes necessidades do veículo e do condutor.

No entanto, Gillespie (1992) destaca que a suspensão Multilink também apresenta algumas desvantagens em relação a outros tipos de suspensão, como a maior complexidade e custo de produção. Além disso, a suspensão Multilink pode ser mais sensível às variações nas condições de carga e nas características da superfície, o que pode afetar seu desempenho em determinadas situações.

Portanto, a suspensão Multilink é um sistema sofisticado e complexo que oferece um bom equilíbrio entre conforto e desempenho. Embora sua complexidade possa tornar a modelagem matemática mais desafiadora, sua capacidade de ajuste da geometria de suspensão permite uma melhor adaptação às diferentes condições de operação, resultando em melhorias significativas no comportamento dinâmico do veículo. No entanto, a suspensão Multilink também apresenta algumas desvantagens em relação a outros tipos de suspensão, como maior complexidade e custo de produção.

2.3.4 Suspensão de Eixo Rígido

Segundo Ogata (2014), a suspensão de eixo rígido é um tipo de suspensão usada em veículos mais pesados, como caminhões e ônibus. Nesse tipo de suspensão, o eixo é fixo ao chassi do veículo, e as rodas são presas diretamente ao eixo, sem a utilização de articulações ou elementos de ligação-conforme mostra a figura 13.



Figura 13 - Suspensão de Eixo Rígido com feixe de molas

Fonte: Parecer automotivo (2014)

Já Gillespie (1992) destaca que a suspensão de eixo rígido apresenta como principal vantagem a sua simplicidade, o que resulta em menor custo e facilidade de manutenção. No entanto, essa simplicidade traz como desvantagem a baixa capacidade de absorção de impactos, o que pode comprometer o conforto dos passageiros e a segurança do veículo em superfícies irregulares.

Ogata (2014) complementa essa ideia, ressaltando que a suspensão de eixo rígido é adequada para veículos que circulam em terrenos planos e uniformes, pois sua rigidez permite melhor estabilidade em altas velocidades. Entretanto, em terrenos acidentados ou irregulares, a falta de articulações e a limitação da suspensão podem resultar em maior desgaste dos pneus e do veículo como um todo.

Portanto, é importante considerar as características do veículo e as condições de uso para avaliar a adequação da suspensão de eixo rígido em cada caso, pesando suas vantagens e desvantagens, como afirmam Ogata (2014) e Gillespie (1992).

2.3.5 Suspensão de Barra de Torsão

A suspensão de barra de torção é um tipo de suspensão muito utilizado em veículos de pequeno porte e com menor peso. De acordo com Ogata (2001), a suspensão de barra de torção

é composta por uma barra que conecta as duas rodas e que possui uma característica elástica conforme mostra a figura 14. Quando uma roda se movimenta em relação ao chassi, a barra torce, gerando uma força de reação na outra roda.



Figura 14 - Suspensão de Barra de Torsão

Fonte: Quatro rodas (2016)

Gillespie (1992) complementa que a suspensão de barra de torção é uma solução simples e econômica para veículos leves. Além disso, possui uma boa eficiência na absorção de impactos e na estabilidade direcional. Por outro lado, Gillespie (1992) destaca que a suspensão de barra de torção pode gerar uma rigidez lateral excessiva, o que pode levar a uma sensação de desconforto ao dirigir em superfícies irregulares.

Sendo assim, a suspensão de barra de torção é uma opção interessante para veículos leves que não necessitam de alto desempenho, porém pode não ser adequada para veículos que exigem maior estabilidade e conforto ao dirigir.

2.3.6 Suspensão magnética

Existem ainda tipos mais modernos, como a recém criada suspensão magnética mostrada na figura 15. De acordo com Ogata, a suspensão magnética utiliza ímãs eletromagnéticos para suspender a carroceria do veículo. Essa tecnologia é capaz de proporcionar uma condução suave, sem os movimentos oscilatórios da carroceria que ocorrem

em outras suspensões. Além disso, essa suspensão permite o controle da altura do veículo e a absorção de choques.

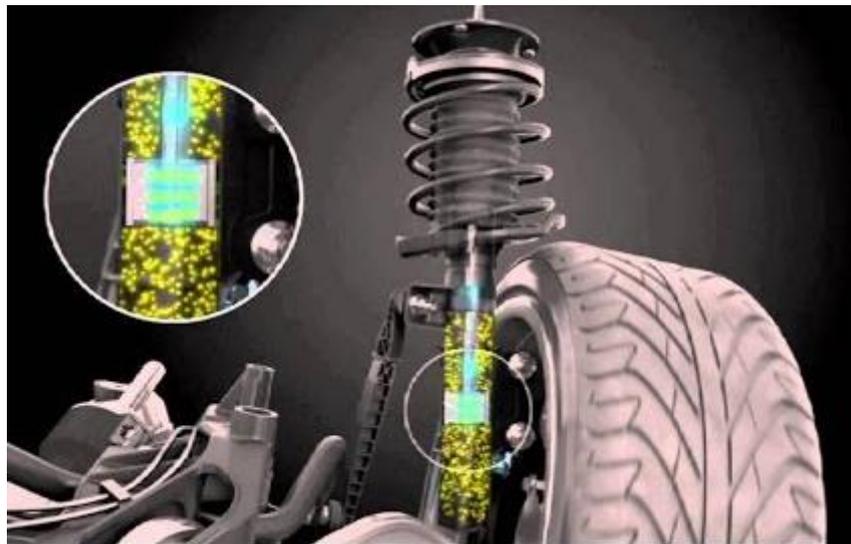


Figura 15 - Suspensão magnética

Fonte: Cadillac(2013)

Gillespie também aborda a suspensão magnética, destacando que ela é uma das mais avançadas tecnologias de suspensão disponíveis. Segundo ele, a suspensão magnética utiliza sensores para medir a posição e a velocidade do veículo, que são enviados para um sistema de controle que ajusta a força magnética nas bobinas. Dessa forma, a suspensão é capaz de se adaptar às condições da estrada em tempo real, proporcionando um alto nível de conforto e estabilidade.

Embora a suspensão magnética ofereça muitas vantagens, ela também apresenta alguns desafios. De acordo com Gillespie, o maior obstáculo é o custo, pois a tecnologia é muito cara de ser implementada. Além disso, a manutenção também pode ser um desafio, uma vez que a suspensão magnética é mais complexa do que outras suspensões convencionais.

2.3.7 Suspensão a ar

Segundo Gillespie (1992), a suspensão a ar é uma opção para veículos pesados que precisam de ajuste rápido de altura, tais como ônibus e caminhões. Ele explica que a suspensão a ar utiliza um compressor para inflar bolsas de ar, que substituem as molas convencionais.

Dessa forma, é possível ajustar a altura do veículo de forma rápida e fácil, bem como a rigidez da suspensão.

Além disso, Gillespie (1992) ressalta que a suspensão a ar proporciona um conforto superior em relação a outros tipos de suspensão, devido à sua capacidade de absorver impactos e vibrações. Entretanto, ele também aponta que a suspensão a ar tem uma maior complexidade e custo em relação a outras opções de suspensão. O sistema de suspensão a ar é mostrado na figura 16:

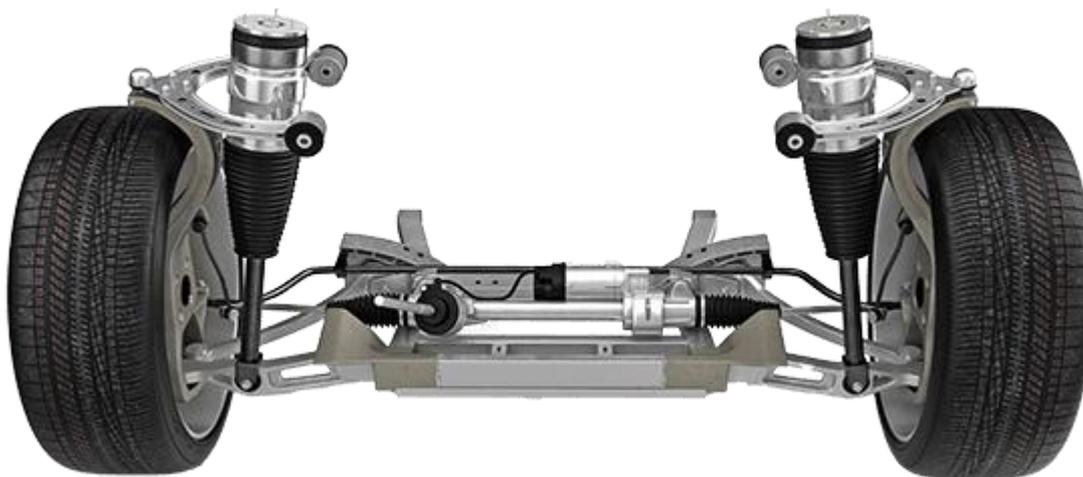


Figura 16- Suspensão a ar

Fonte: Mecânica (2021)

2.3.8 Pneu

Além dos componentes propriamente ditos, há de se considerar o pneu como elemento de amortecimento.

De acordo com Ogata (2014, p. 630), "o pneu é um elemento importante na dinâmica de um veículo, uma vez que o contato pneu-estrada é a única ligação do veículo com o solo". Gillespie (1992, p. 272) complementa, afirmando que "o pneu também pode ser considerado um elemento de amortecimento, uma vez que sua estrutura elástica é capaz de absorver energia durante deformações sob carga".

É importante ressaltar que a deformação do pneu sob carga é altamente não linear e depende de diversos fatores, como a pressão do pneu, o tipo de construção, a banda de rodagem, entre outros (OGATA, 2014, p. 630). Além disso, o pneu também pode sofrer deformações

dinâmicas em altas velocidades, o que pode afetar sua capacidade de amortecimento (GILLESPIE, 1992, p. 273).

Dessa forma, fica evidente a importância do estudo do pneu na dinâmica veicular, especialmente no que diz respeito ao amortecimento. Compreender a relação entre a deformação do pneu e a absorção de energia pode contribuir para o projeto de sistemas de suspensão mais eficientes e seguros.

Por sua influência na dinâmica veicular, o pneu é um elemento que merece destaque no projeto de suspensão. A Figura 17 contém os elementos que constituem a estrutura do pneu:

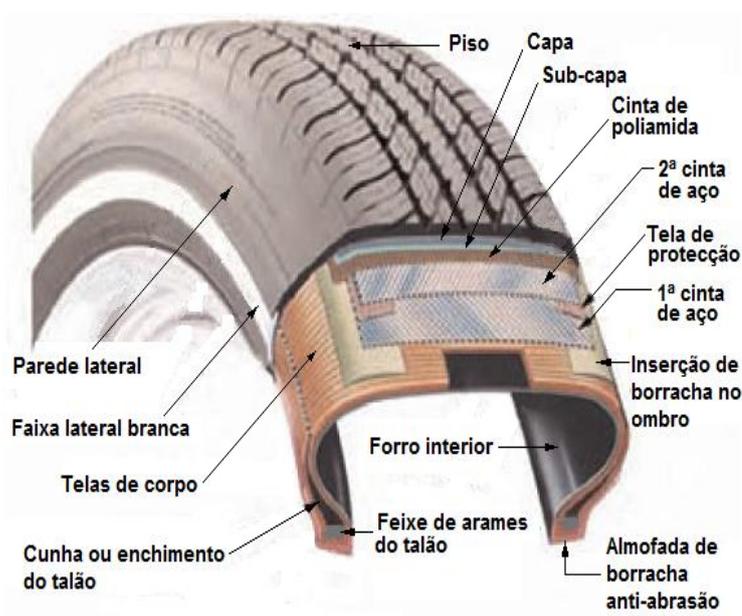


Figura 17 - Estrutura dos pneus

Fonte: Caetano (2012)

2.4 Modelagem computacional

"A suspensão veicular é um sistema de controle, no qual a dinâmica do veículo é modelada matematicamente para permitir o projeto de controladores que possam melhorar o desempenho do veículo." (OGATA, 2014, p. 212).

Para garantir o bom funcionamento da suspensão, é fundamental considerar a modelagem computacional do sistema. Segundo Ogata (2014), a modelagem computacional é uma ferramenta poderosa para analisar o comportamento do sistema e prever seu desempenho

em diferentes condições de operação. "O uso de técnicas de controle para a suspensão veicular requer a modelagem matemática precisa do sistema, que deve levar em conta as características dinâmicas do veículo e da suspensão." (OGATA, 2014, p. 214).

Gillespie (1992) destaca que a modelagem computacional permite simular o comportamento do sistema sob diferentes condições, como diferentes tipos de superfícies, velocidades e cargas, facilitando a identificação de possíveis problemas e permitindo o ajuste do sistema para melhorar seu desempenho.

A escolha do tipo de suspensão também é um fator importante a ser considerado na modelagem computacional. Gillespie (1992) destaca que a escolha do tipo de suspensão deve levar em conta o tipo de veículo e suas condições de uso, bem como os custos envolvidos na sua implementação.

Além disso, a escolha dos componentes da suspensão, como as molas e os amortecedores, também é fundamental para garantir o bom funcionamento do sistema. Segundo Ogata (2014), a escolha adequada dos componentes deve levar em conta fatores como o peso do veículo, o tipo de terreno e as condições de uso. Gillespie (1992) destaca que a escolha dos componentes também deve levar em conta a durabilidade e o custo, de forma a garantir a eficiência do sistema sem comprometer a sua viabilidade econômica.

Gillespie também ressalta a importância da modelagem matemática, afirmando que "a análise matemática é a ferramenta básica para se entender o comportamento dinâmico do veículo e para se projetar sistemas de suspensão" (GILLESPIE, 1992, p. 2).

Para se chegar à um sistema eficiente para cada aplicação, é natural se recorrer a simulações que demonstrem o desempenho e a atuação em cada aplicação. A modelagem computacional da suspensão veicular tem sido objeto de pesquisas e estudos em diversos campos, incluindo a mecânica, a engenharia automotiva e a engenharia computacional.

De acordo com (JOHNSON; MERIAM, 2014), a modelagem matemática da suspensão veicular é uma técnica que permite a análise da dinâmica do sistema a partir da representação matemática de suas equações de movimento. Essa abordagem possibilita a simulação e previsão do comportamento do sistema, o que é útil para o projeto e otimização da suspensão.

Johnson e Meriam, dizem que a modelagem matemática pode ser dividida em duas etapas: a primeira envolve a formulação de equações básicas, que descrevem as leis físicas que governam o sistema. A segunda etapa envolve a solução dessas equações para obter uma solução numérica, gráfica ou analítica que permita uma melhor compreensão do comportamento do sistema.

Outra aplicação importante da modelagem computacional da suspensão veicular é na avaliação de diferentes configurações e componentes de suspensão, de acordo com o estudo de Wang et al. (2018). A utilização de modelos matemáticos e simulações computacionais permite a avaliação do comportamento da suspensão em diferentes condições de funcionamento, possibilitando a escolha da melhor configuração para atender às necessidades do veículo.

Além disso, a modelagem computacional da suspensão veicular é importante na validação de protótipos, de acordo com o estudo de Kim et al. (2019). Antes de serem produzidos em larga escala, os componentes de suspensão são submetidos a rigorosos testes computacionais, permitindo a verificação da viabilidade do projeto e a correção de possíveis problemas antes da produção em massa.

Por fim, a modelagem computacional da suspensão veicular tem várias aplicações importantes na indústria automotiva, incluindo análise detalhada do comportamento dinâmico, avaliação de diferentes configurações e componentes, e validação de protótipos. Essa técnica tem se mostrado fundamental para otimizar o desempenho dos veículos e garantir a segurança e conforto dos usuários.

Neste trabalho será analisado o sistema de suspensão de um quarto do veículo, ou seja, um quarto da massa do carro com roda e sistema de suspensão. A simplificação anterior é possível, visto que a análise pode ser estendida para as demais rodas (NISE, 2002, p. 106).

2.5 Software SCILAB

O software SCILAB é um software livre de computação científica, projetado para a análise numérica e simulação de sistemas dinâmicos. Segundo Campos Filho (2010), o software SCILAB é uma ferramenta computacional que possui diversas vantagens em relação a outras ferramentas disponíveis no mercado. Uma das principais vantagens é o fato de ser um software livre, o que permite que o usuário tenha acesso ao código-fonte e possa modificar o programa de acordo com suas necessidades. Além disso, o software SCILAB é compatível com diversas plataformas e sistemas operacionais, tornando-o acessível a uma grande variedade de usuários.

O software SCILAB possui diversas aplicações em áreas como engenharia, física, matemática, entre outras. Segundo Campos Filho (2010), o software SCILAB é capaz de realizar operações matemáticas avançadas, como álgebra linear, cálculo numérico, análise de dados, entre outras. O software SCILAB também é capaz de realizar simulações de sistemas dinâmicos, como sistemas elétricos, mecânicos, hidráulicos, térmicos, entre outros. Além disso,

o software SCILAB possui diversas ferramentas para visualização de dados, como gráficos 2D e 3D, o que permite uma melhor compreensão dos resultados obtidos.

Outra vantagem do software SCILAB é a facilidade de utilização. Segundo Campos Filho (2010), o software SCILAB possui uma sintaxe simples e intuitiva, o que torna a programação mais fácil e rápida. Além disso, o software SCILAB possui diversas ferramentas para depuração de código, o que facilita a identificação e correção de erros.

O software SCILAB é uma ferramenta extremamente útil para a simulação de sistemas dinâmicos. Segundo Campos Filho (2020), o software SCILAB possui diversas ferramentas para a modelagem de sistemas dinâmicos, como a criação de equações diferenciais e a utilização de modelos de blocos. O software SCILAB também possui diversas ferramentas para a simulação de sistemas dinâmicos, como a resolução de equações diferenciais, a análise de estabilidade, entre outras.

Ainda, o software SCILAB é uma ferramenta muito útil para a análise e processamento de dados. Segundo Campos Filho (2020), o software SCILAB possui diversas ferramentas para a análise de dados, como a criação de histogramas, a realização de testes estatísticos, entre outras. Além disso, o software SCILAB possui diversas ferramentas para o processamento de sinais, como a realização de filtragem e a análise espectral.

3 METODOLOGIA

O objetivo deste capítulo é descrever detalhadamente a análise utilizada para conduzir a pesquisa, que envolve os seguintes tópicos: definição do tipo de pesquisa, descrição dos materiais e métodos utilizados, seleção das variáveis e indicadores relevantes, escolha dos instrumentos de coleta de dados apropriados e por fim, a tabulação dos dados obtidos.

3.1 Tipos de pesquisa

De acordo com Mascarenhas (2012), "a pesquisa quantitativa se caracteriza pela coleta de dados numéricos, os quais são analisados por meio de técnicas estatísticas. Seu principal objetivo é o de mensurar e/ou quantificar relações entre variáveis, bem como aferir a presença ou intensidade de fenômenos sociais" (Mascarenhas 2012, p. 46).

O objetivo principal é obter informações precisas e objetivas sobre uma população ou fenômeno, geralmente usando padrões ou outras formas de coleta de dados protegidos. A pesquisa quantitativa utiliza métodos estatísticos para analisar os dados, permitindo que sejam restritas correlações entre variáveis e generalizações para a população.

Para Mascarenhas (2012, p. 49):

"a pesquisa qualitativa é caracterizada pela busca da compreensão aprofundada de fenômenos sociais complexos, por meio da coleta de dados não estruturados, como entrevistas, observações e registros em diários. Seu principal objetivo é o de explorar as relações e significados construídos pelos sujeitos pesquisados, sem a necessidade de mensuração numérica ou estatística."

A pesquisa qualitativa é usada para explorar e compreender fenômenos complexos e subjetivos, geralmente através de dados não numéricos. O objetivo principal é obter informações ricas e diferenciadas sobre como ocorre, experiências e crenças das pessoas sobre um fenômeno ou problema. A pesquisa qualitativa geralmente utiliza métodos de análise de dados descritivos e interpretativos, em vez de estatísticos, para identificar padrões e tendências.

Sendo assim, este trabalho é uma pesquisa quantitativa, com o intuito de estipular, através da simulação computacional, como é possível simular o amortecimento de uma suspensão veicular através do software SCILAB.

Segundo Gil (2002), é possível classificar as pesquisas em três grandes grupos, sendo eles: exploratórias, descritivas e explicativas.

"As pesquisas exploratórias têm como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo explícito ou a construir hipóteses" (GIL, 2002, p. 41).

Ela é usada para investigar um problema ou questão pouco conhecida ou estudada. O objetivo principal é obter informações preliminares sobre o tema de interesse, identificar possíveis hipóteses e estabelecer uma base para pesquisas futuras. As técnicas utilizadas nesse tipo de pesquisa incluem entrevistas, observação, análise de documentos e revisão bibliográfica. Geralmente, uma pesquisa exploratória é realizada no início do processo de pesquisa, antes de se formular hipóteses e objetivos específicos.

"As pesquisas descritivas têm como objetivo a descrição das características de determinada população ou fenômeno ou o estabelecimento de relações entre variáveis" (GIL, 2002, p. 42).

Já a pesquisa descritiva é utilizada para descrever e analisar fenômenos ou problemas existentes. O objetivo principal é descrever com precisão as características, comportamentos ou atitudes de uma população ou fenômeno, utilizando técnicas como treinos, entrevistas e observação sistemática. A pesquisa descritiva pode ser realizada em qualquer etapa do processo de pesquisa, e é útil para a identificação de associações e correlações entre variáveis.

"As pesquisas explicativas têm como objetivo identificar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos" (GIL, 2002, p. 42). Ela se difere das outras pois tem como objetivo principal explicar as relações causais entre variáveis. O objetivo é identificar as causas e efeitos de um determinado fenômeno ou problema, testando hipóteses e estabelecendo relações causais. A pesquisa explicativa geralmente envolve a manipulação de variáveis independentes e dependentes, e o uso de métodos estatísticos para análise dos resultados. A pesquisa explicativa é geralmente realizada após uma pesquisa descritiva e exploratória, quando já se tem uma base sólida de informações sobre o problema estudado.

Dessa forma, este trabalho pode ser classificado como uma pesquisa exploratória, por utilizar o método de pesquisa bibliográfica, utilizando como material de estudo artigos e trabalhos científicos. O trabalho também pode ser classificado como pesquisa explicativa, pois o objetivo principal é explicar como podemos simular o amortecimento da suspensão veicular no software SCILAB.

3.2 Materiais e métodos

Vejamos abaixo na figura 18, os materiais e métodos utilizados para realizar a simulação do amortecimento de $\frac{1}{4}$ de suspensão veicular através do software SCILAB.

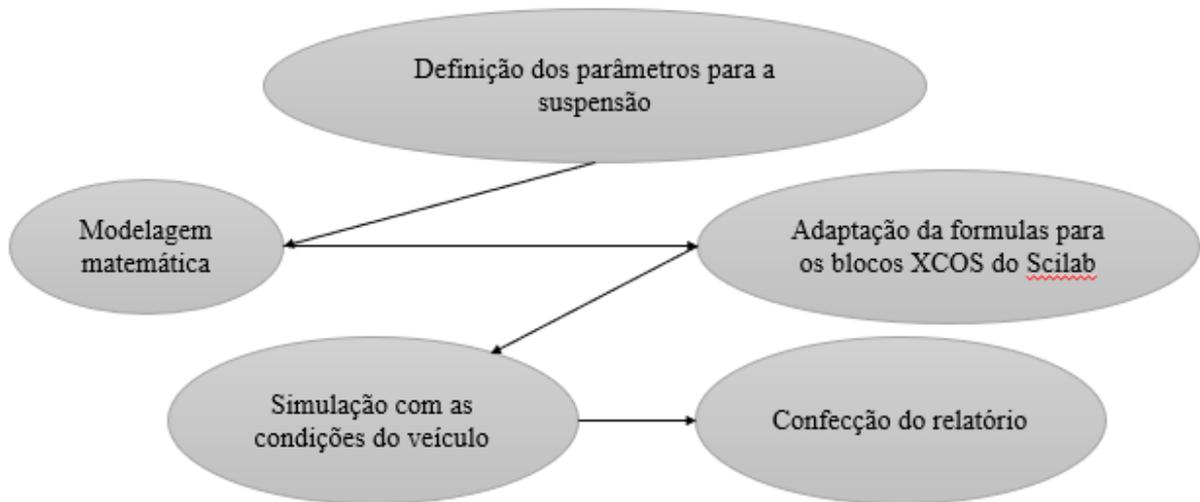


Figura 18 - Materiais e métodos

Fonte: Pesquisa direta

3.3 Variáveis e indicadores

A variável suspensão é influenciada por vários indicadores, conforme abaixo, na tabela 1. Os indicadores são as massas, constantes e deslocamentos envolvidos no sistema. Vejamos abaixo:

Tabela 1 -Varáveis e indicadores

| Variável | Indicador |
|----------------------|--|
| Suspensão automotiva | $m_2 = \frac{1}{4}$ da massa do carro; |
| | $m_1 =$ massa da roda; |
| | $k_2 =$ constante de mola do suporte; |
| | $k_1 =$ constante de mola do pneu; |
| | $b =$ constante de amortecimento do amortecedor; |
| | $u_{(t)} =$ perturbação da estrada (entrada); |
| | $x_{(t)} =$ deslocamento vertical da roda; |
| | $y_{(t)} =$ deslocamento vertical do carro; |

Fonte: Pesquisa direta (2023)

O sistema será simulado para uma perturbação na estrada na forma de pulsos. No próximo capítulo analisaremos os resultados.

3.4 Instrumento de coleta de dados

Para coletar os dados necessários para desenvolver o modelo matemático de 1/4 de uma suspensão veicular é necessário o uso de instrumentos, como, bibliografia especializada, pois a coleta de dados para a modelagem matemática também requer a revisão de artigos científicos, livros e outras publicações relevantes na área de dinâmica de veículos, suspensão veicular e análise de sistemas dinâmicos. Essas referências bibliográficas fornecem informações importantes sobre as propriedades dos materiais utilizados na suspensão, o comportamento dos pneus e outras características do sistema de suspensão.

Outro instrumento utilizado para o tratamento dos dados é o software SCILAB, que neste caso é a principal ferramenta utilizada para a simulação do amortecimento de 1/4 de uma suspensão veicular. Com ele, é possível simular o comportamento do sistema de suspensão a partir de modelos matemáticos.

3.5 Tabulação dos dados

A tabulação dos dados se dará através de gráficos e análises retiradas do software SCILAB.

3.6 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo foi apresentada a análise utilizada no desenvolvimento do trabalho, os parâmetros da simulação do amortecimento e as fórmulas inseridas no Software.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Observa-se a seguir, a aplicação das variáveis e indicadores usados para simular $\frac{1}{4}$ da suspensão veicular. Nesse modelo, analisa-se os efeitos dinâmicos associados a uma roda do veículo e um sistema de massas e molas. Esse sistema de massas e molas é formado pelas molas do pneu e da suspensão e das massas suspensa e não suspensa do eixo analisado (NICOLAZZI; LEAL; ROSA, 2012).

A figura 19, apresenta a vista lateral de meio carro sobre o solo e logo abaixo seu esquema de suspensão:

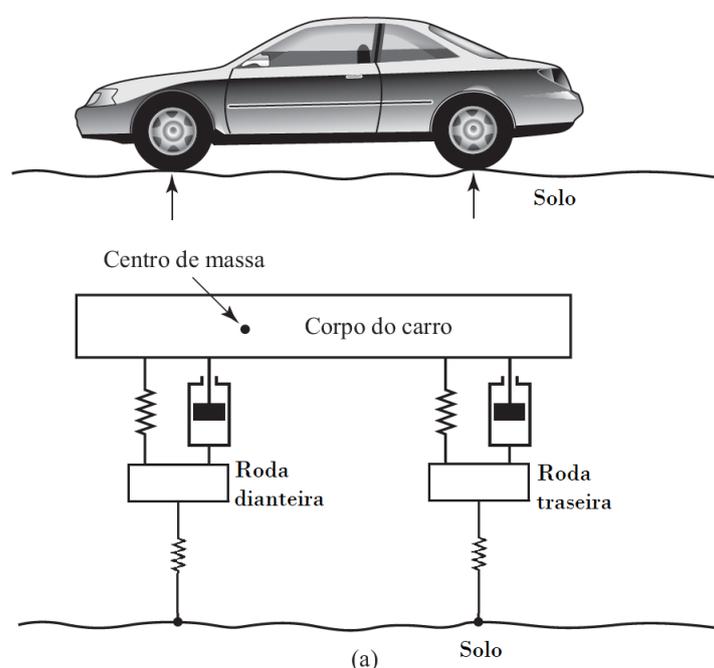


Figura 19 - Carro e o esquema de suspensão do veículo.

Fonte: Ogata (2010)

O modelo de $\frac{1}{4}$ de veículo é uma representação útil, onde o sistema é dividido em quatro partes consideradas independentes equivalentes às quatro rodas acopladas às respectivas suspensões (mola + amortecedor). Embora exista um vínculo entre as quatro rodas definido pelo sistema rígido do chassi do veículo, este é desconsiderado no modelo de $\frac{1}{4}$ de veículo.

O esquema de um quarto do veículo usada para modelagem e simulação pode ser visto na Figura 20 (OGATA, 2010, p. 76 e 77):

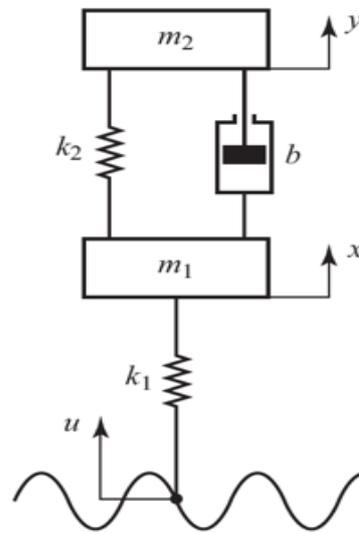


Figura 20 - Esquema de suspensão de 1/4 do veículo

Fonte: Ogata (2010)

O esquema de suspensão de 1/4 de veículo, como é demonstrado na Figura 20, é uma configuração de suspensão independente na qual cada roda dianteira ou traseira é montada em um braço oscilante ou uma junta esférica. Isso permite que cada roda se mova verticalmente independentemente da outra, proporcionando um maior controle sobre a dinâmica do veículo e melhorando a aderência e a estabilidade. Os diagramas de corpo livre das massas m_1 e m_2 , montados a partir da figura 21, podem ser vistos abaixo:

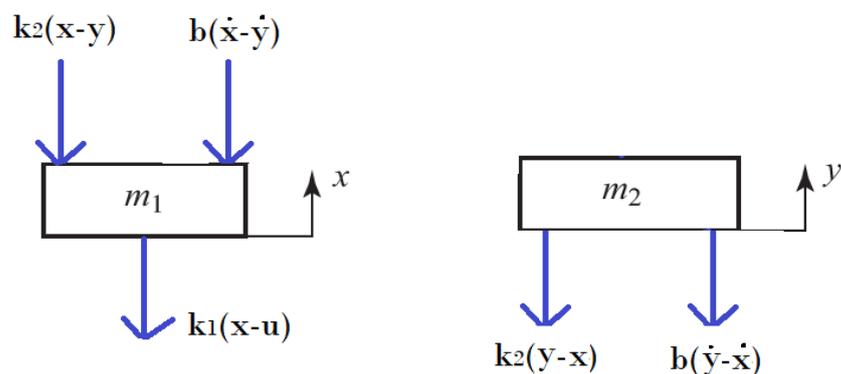


Figura 21 - Diagramas de corpo livre.

Fonte: Pesquisa direta (2023)

Os diagramas de corpo livre são diagramas que mostram todas as forças que atuam em um objeto livre ou isolado. Esses diagramas são usados para analisar o movimento de objetos

e calcular as forças resultantes. No caso das massas m_1 e m_2 , os diagramas de corpo livre representam as forças que atuam em cada uma dessas massas.

A partir dos diagramas de corpo livre e da aplicação da segunda Lei de Newton, é possível determinar as forças resultantes que atuam sobre as massas m_1 e m_2 em um sistema e, assim, analisar seu movimento. A 2ª Lei de Newton estabelece que a força resultante que atua em um objeto é igual à massa desse objeto multiplicada pela sua aceleração.

Matematicamente, isso pode ser expresso como $F = m * a$, onde F é a força resultante, m é a massa do objeto e a é sua aceleração. Aplicando esse conceito aos diagramas de m_1 e m_2 , podemos determinar a força resultante que atua em cada massa e, portanto, calcular sua aceleração.

Se m_1 estiver ligada a uma mola e suspensa em um sistema de pêndulo simples, podemos determinar a força resultante que atua sobre a massa m_1 , incluindo a força da gravidade e a força da mola. Em seguida, podemos aplicar a segunda Lei de Newton para determinar a aceleração de m_1 . De maneira semelhante, podemos determinar as forças resultantes que atuam sobre a massa m_2 e aplicar a segunda Lei de Newton para determinar sua aceleração.

A partir dos diagramas de corpo livre da Figura 21 e utilizando-se a 2ª lei de Newton, pode-se escrever as equações:

$$m_1 \ddot{x} = -k_1(x - u) - k_2(x - y) - b(\dot{x} - \dot{y}) \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{y} = -k_2(y - x) - b(\dot{y} - \dot{x}) \quad (2)$$

$$m_1 \ddot{x} + b\dot{x} + (k_1 + k_2)x = b\dot{y} + k_2y + k_1u \quad (3)$$

$$m_2 \ddot{y} + b\dot{y} + k_2y = b\dot{x} + k_2x \quad (4)$$

As equações (3) e (4) são as equações diferenciais que regem a dinâmica do sistema de suspensão veicular. Elas regem a dinâmica do sistema de suspensão veicular. As mesmas são acopladas e devem ser resolvidas simultaneamente para se obter os movimentos da roda (descrita pela função $x(t)$) e do carro (descrito pela função $y(t)$).

A solução analítica das equações (3) e (4) pode ser obtida aplicando-se a Transformada de Laplace nas respectivas funções. Aplicando a transformada de Laplace a cada termo e

usando o teorema do valor inicial, podemos obter a representação no domínio de Laplace das equações diferenciais. Da equação (3), obtemos:

$$m_1 s^2 X(s) + bs X(s) + (k_1 + k_2)X(s) = bs Y(s) + k_2 Y(s) + k_1 U(s).$$

Reorganizando os termos, obtemos:

$$X(s) = \frac{bs Y(s) + k_2 Y(s) + k_1 U(s)}{m_1 s^2 + bs + k_1 + k_2} \quad (5)$$

Analogamente, tomando a transformada de Laplace da Equação (4), obtemos:

$$m_2 s^2 Y(s) + bs Y(s) + k_2 Y(s) = bs X(s) + k_2 X(s)$$

que, após reorganização dos termos, resulta em

$$Y(s) = \frac{bs X(s) + k_2 X(s)}{m_2 s^2 + bs + k_2} \quad (6)$$

As equações acima são a representação no domínio da frequência das equações diferenciais em termos de $X(s)$ e $Y(s)$. Se mostram importantes para prever a eficiência do sistema de amortecimento em filtrar determinadas frequências e identificar a resposta do sistema a um sinal de entrada $u(t)$ ou $U(s)$.

No domínio da frequência, os sistemas de suspensão podem ser vistos como filtros passa-banda, que atuam ativa ou passivamente para eliminar tanto altas quanto baixas frequências e atenuar de maneira homogênea frequências intermediárias, como pode ser visto na Figura 22.

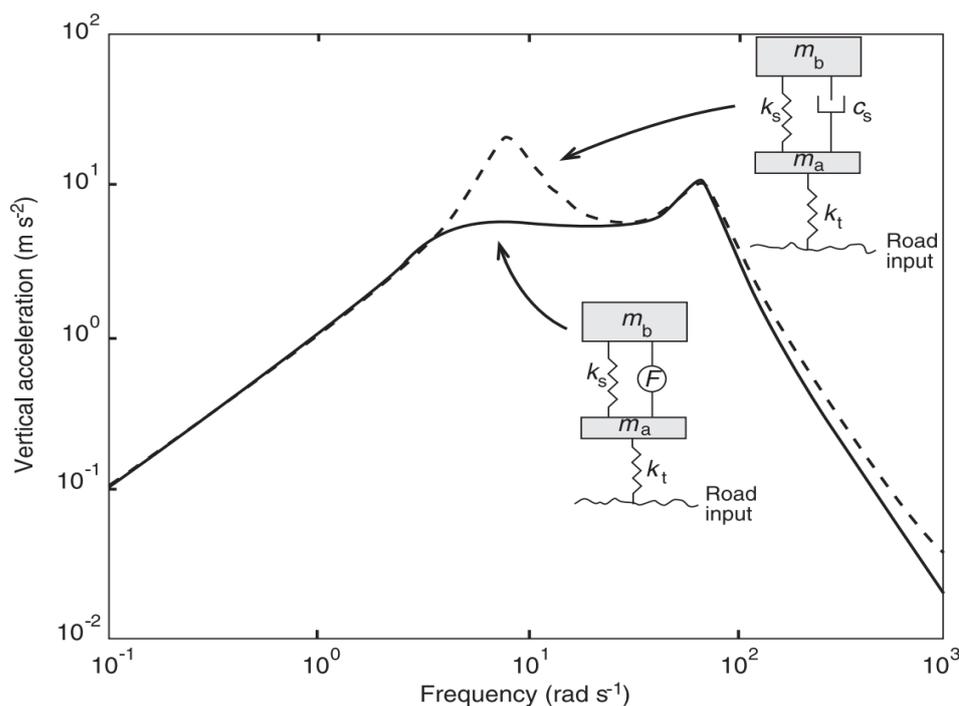


Figura 22 – Frequências de amortecimento versus aceleração vertical

Fonte: Ahmadian, M. (2001).

Nela também é possível identificar as frequências naturais de oscilação do sistema de amortecimento, representadas pelos dois picos: o primeiro de baixa frequência entre 1 e 10 Hz, e o segundo, de alta frequência, próximo de 100 Hz. O pico na aceleração vertical próximo às frequências naturais do sistema é resultado do fenômeno de ressonância, onde as duas partes acopladas pelo amortecedor oscilam com uma diferença de fase de 180 graus, causando uma interferência construtiva na amplitude do movimento.

Obtemos as equações para o movimento vertical do sistema em função do tempo aplicando-se a transformada de Laplace inversa nas Equações. (5) e (6). Começando com a Equação (5), podemos simplificar a expressão usando a decomposição de frações parciais:

$$X(s) = \frac{A}{(s - r_1)} + \frac{B}{(s - r_2)} + \frac{C}{(s - r_3)} + \frac{D}{(s - r_4)},$$

Onde r_1 , r_2 , r_3 e r_4 são as raízes do polinômio do denominador na Equação (5) e A , B , C e D são constantes que podem ser determinadas pela decomposição de fração parcial. Substituindo esta expressão de volta na Equação (5) e simplificando, obtemos:

$$X(s) = \frac{A(m_1s + r_2 + r_3) + B(m_1s + r_1 + r_3) + C(m_1s + r_1 + r_2) + D(bs + k_2)}{(m_1s^2 + bs + k_1 + k_2)(s - r_1)(s - r_2)(s - r_3)}$$

Tomando a transformada inversa de Laplace de ambos os lados da equação, obtemos:

$$x(t) = \frac{Ae^{r_1t} + Be^{r_2t} + Ce^{r_3t} + D u(t)}{m_1(r_1 - r_2)(r_1 - r_3)(r_2 - r_3)} \quad (7)$$

Onde as constantes A, B, C e D são determinadas pelas condições iniciais do sistema. A expressão no domínio do tempo para x(t) fornece o deslocamento vertical da roda em resposta ao distúrbio da estrada u(t). Da mesma forma, podemos aplicar a decomposição de frações parciais à Equação. (6):

$$Y(s) = \frac{E}{(s - r_5)} + \frac{F}{(s - r_6)},$$

Onde r5 e r6 são as raízes do polinômio do denominador na Eq. 6, e E e F são constantes que podem ser determinadas pela decomposição de frações parciais. Substituindo esta expressão de volta na Eq. 6 e simplificando, obtemos:

$$Y(s) = \frac{E(bs + k_2) + F(m_2s + bs + k_2)}{(m_2s^2 + bs + k_2)(s - r_5)(s - r_6)}$$

Tomando a transformada inversa de Laplace de ambos os lados da equação, obtemos:

$$y(t) = \frac{Ee^{r_5t} + Fe^{r_6t}}{m_2(r_5 - r_6)} \quad (8)$$

Onde as constantes E e F são determinadas pelas condições iniciais do sistema. A expressão no domínio do tempo para y(t) fornece o deslocamento vertical do carro em resposta ao deslocamento da roda x(t). O deslocamento vertical da roda e da carroceria podem ser modelados resolvendo as equações (7) e (8) para determinadas condições iniciais.

Para as simulações do sistema serão usados os blocos XCOS do software SCILAB. As equações (1) e (2) devem ser reescritas para serem implementadas no software, logo:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m_1} [-k_1(x - u) - k_2(x - y) - b(\dot{x} - \dot{y})] \quad (9)$$

$$\ddot{y} = \frac{1}{m_2} [-k_2(y - x) - b(\dot{y} - \dot{x})] = \frac{1}{m_2} [k_2(x - y) + b(\dot{x} - \dot{y})] \quad (10)$$

Para as simulações do sistema serão usados os blocos XCOS do software SCILAB, que permitem criar e simular sistemas dinâmicos. As equações (1) e (2) devem ser reescritas para serem implementadas no software, logo:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m_1} [-k_1(x - u) - k_2(x - y) - b(\dot{x} - \dot{y})] \quad (5)$$

$$\ddot{y} = \frac{1}{m_2} [-k_2(y - x) - b(\dot{y} - \dot{x})] = \frac{1}{m_2} [k_2(x - y) + b(\dot{x} - \dot{y})] \quad (6)$$

As equações (5) e (6) estão numa forma adequada para implementação no XCOS. A título de exemplo, será usado os seguintes valores para os parâmetros (SOUZA, 2017, p. 40):

$$m_1 = 50 \text{ kg (massa da roda);}$$

$$m_2 = 400 \text{ kg } \frac{1}{4} \text{ da massa do carro;}$$

$$k_1 = 250000 \text{ N/m constante de mola do pneu;}$$

$$k_2 = 20000 \text{ N/m constante de mola do suporte;}$$

$$b = 1000 \text{ constante de amortecimento do amortecedor;}$$

$$u(t) = \text{perturbação da estrada (entrada);}$$

$$x(t) = \text{deslocamento vertical da roda;}$$

$$y(t) = \text{deslocamento vertical do carro;}$$

Com esses valores de parâmetros e implementando as equações (5) e (6) no XCOS, o diagrama de blocos para simulação pode ser visto de forma detalhada na figura a seguir.

Cada bloco é uma função matemática que descreve como um determinado componente do sistema se comporta. As conexões entre os blocos representam as relações entre esses componentes, indicando como as saídas de um bloco afetam as entradas de outro bloco. Essas conexões podem ser lineares ou não-lineares. Vejamos a aplicação das formulas (5) e (6) no XCOS, na figura 23:

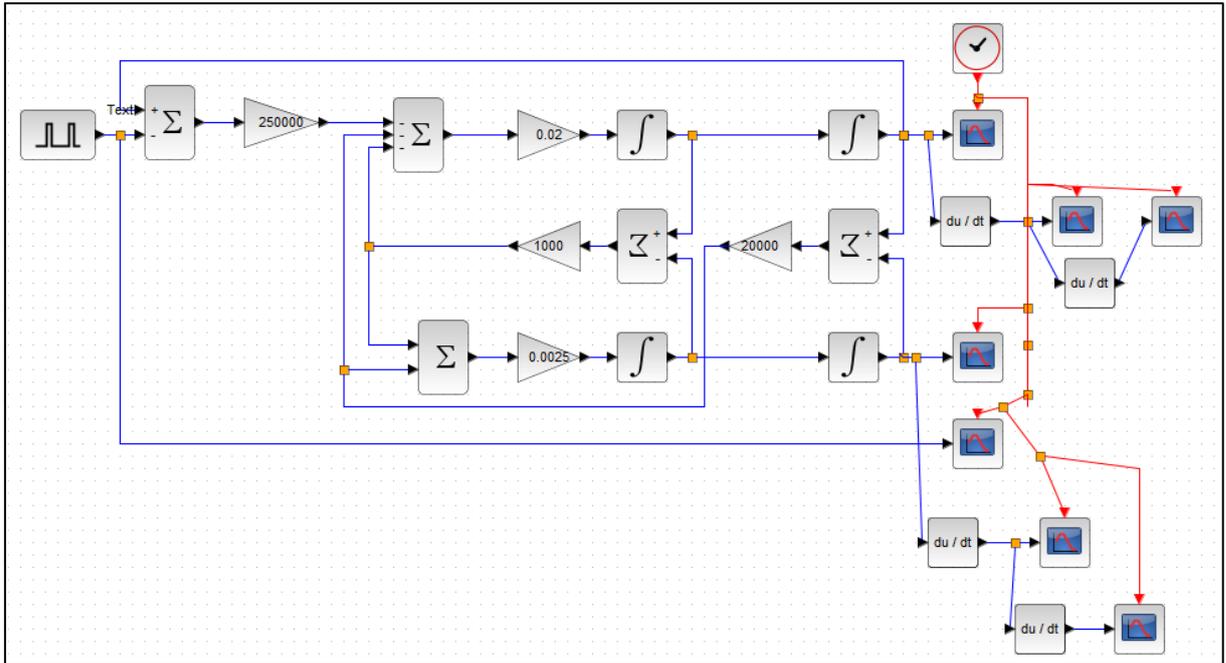


Figura 23 - Diagramas de blocos.XCOS no software SCILAB

Fonte: Pesquisa direta, 2023.

Na figura acima temos o diagrama de blocos no sistema XCOS do software SCILAB, onde o modelo é alimentado com um pulso quadrado de amplitude 0,2 metros e duração de 0,5 segundos, que se repete a cada 10 segundos. Neste diagrama, implementamos, além da saída das posições verticais da roda e da carroceria do veículo, as respectivas velocidades e acelerações de ambas as componentes do modelo. Observe o gráfico da figura 24:

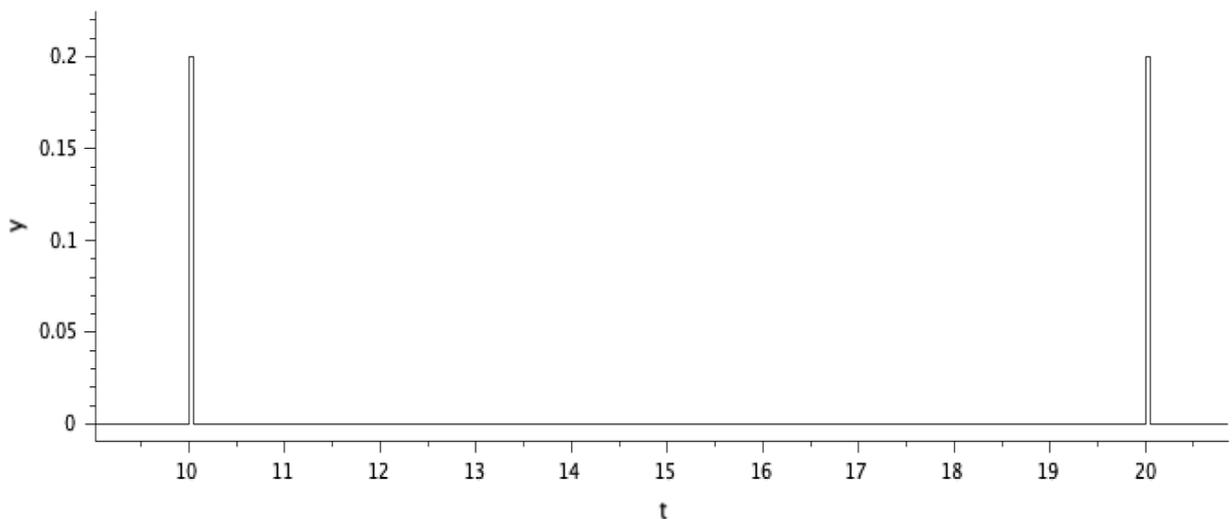


Figura 24 – Perturbação gerada pelo obstáculo da estrada (entrada).

Fonte: Pesquisa direta (2023)

Como a excitação do sistema é feita por um sinal que pode ser aproximado por um sinal unitário, esperamos que a resposta ocorra na forma de um sinal periódico amortecido, ou seja, que o sistema de amortecimento ativamente atenua o sinal. Na figura 25 temos a resposta do movimento na roda ao pulso de entrada.

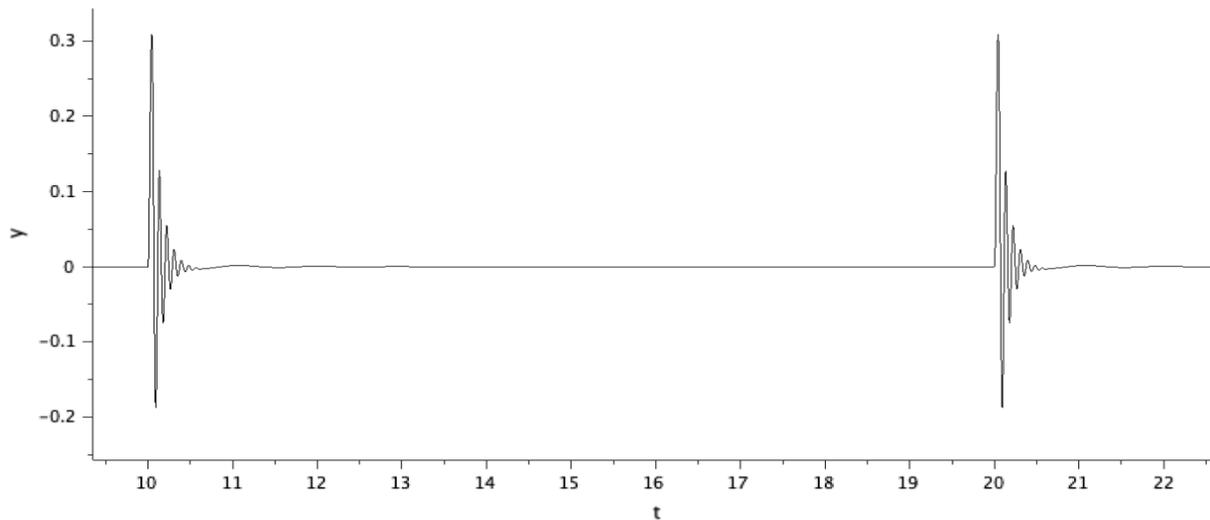


Figura 25 - Deslocamento vertical da roda (entrada)

Fonte: Pesquisa Direta (2023)

Como podemos observar, o resultado é compatível com um oscilador harmônico amortecido, sendo o gráfico dominado por uma função senoidal modulada por uma atenuação exponencial. As frequências naturais da mola definem a frequência natural enquanto os coeficientes de amortecimento determinam a atenuação da curva.

No gráfico da figura 25, nota-se o deslocamento da roda devido aos obstáculos. A roda chega a se deslocar 30,05 centímetros para a irregularidade de 20 centímetros. Ou seja, o seu deslocamento é pouco mais de 50% maior que a dimensão do desnível. Isso se deve à inércia do peso do conjunto acima do sistema de suspensão que contribui com o aumento do deslocamento da roda. Esse tipo de curva é chamada de sistema subamortecido, onde a amplitude do deslocamento reduz progressivamente.

Através do deslocamento o software nos mostra pelo gráfico da figura 26, a velocidade vertical da roda.

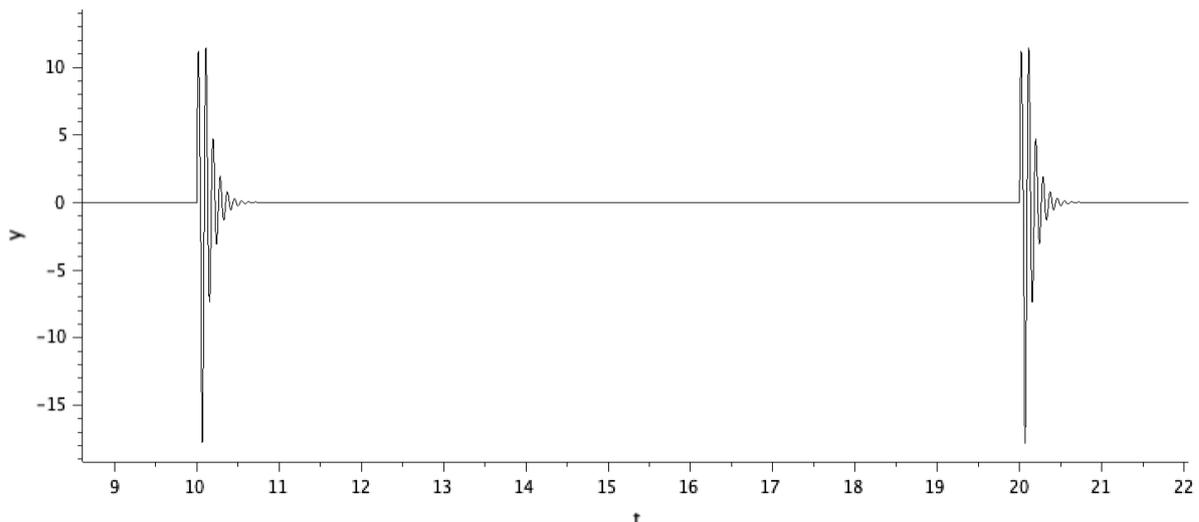


Figura 26 - Velocidade vertical da roda (entrada)

Fonte: Pesquisa direta (2023)

Sendo a velocidade a derivada temporal do deslocamento vertical, o gráfico da figura 26 apresentará a mesma característica oscilatória com atenuação exponencial.

Na figura 27 temos o resultado da aceleração vertical da roda do veículo, que apresenta valores não compatíveis com o esperado para o sistema de amortecimento.

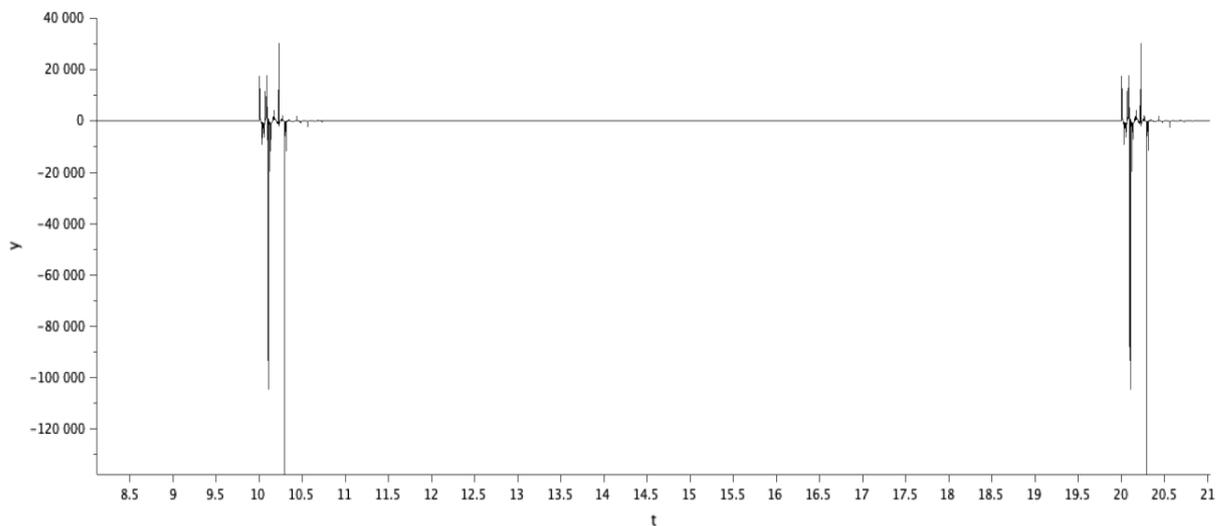


Figura 27 - Aceleração vertical da roda (entrada)

Fonte: Pesquisa direta (2023)

Entretanto, ao se analisar a simulação, identificamos que a mesma é feita pela integração numérica das equações do movimento que resolvem o sistema de equações diferenciais. Desta maneira, o XCOS utiliza como padrão o método de Newton, que tem precisão de ordem 3.

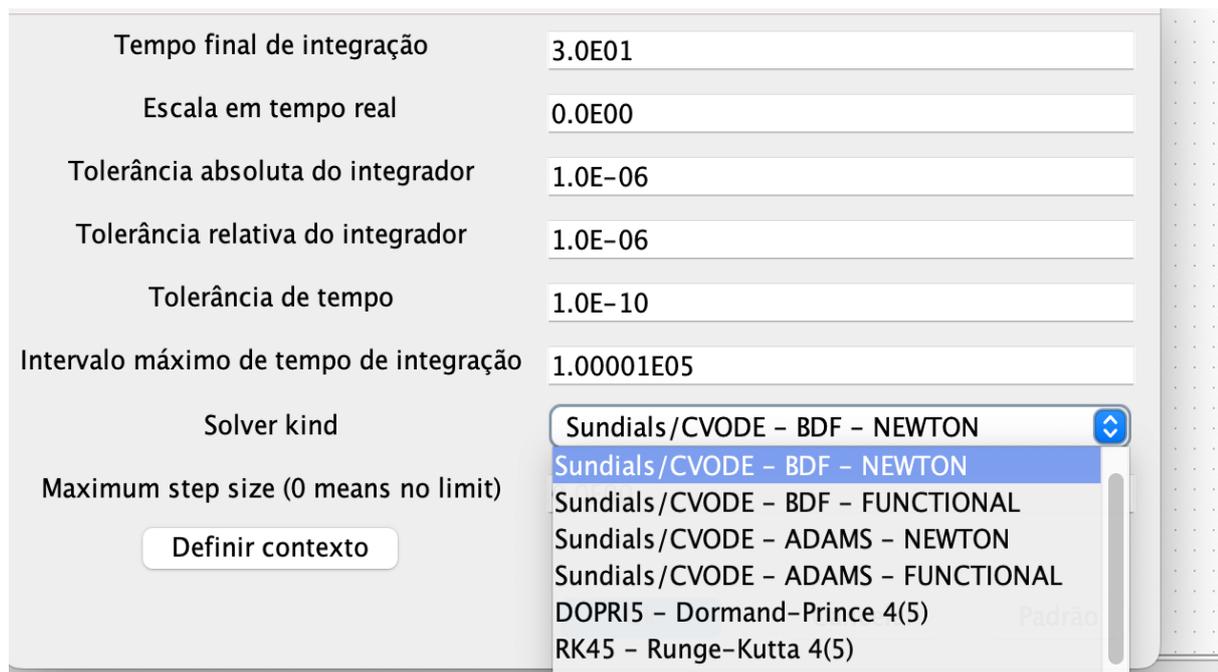


Figura 28 - Métodos de integração numérica disponíveis no XCOS

Fonte: Pesquisa direta (2023)

Conforme pode ser visto na Figura 28, o XCOS possui outros métodos de integração mais precisos. Desta maneira, ao selecionarmos o método de Runge-Kutta de quarta ordem RK45, que possui precisão superior ao método de Newton, o resultado, apresentado na Figura 29 para a aceleração da roda, é compatível com o que se espera do modelo.

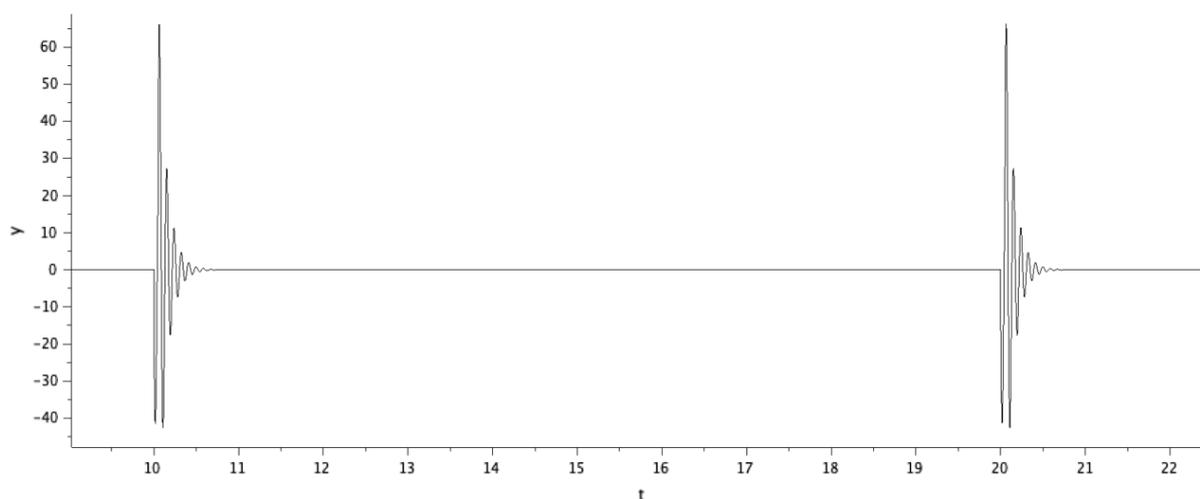


Figura 29 - Aceleração vertical da roda (entrada) pelo método RK4

Fonte: Pesquisa direta (2023)

Pela figura 29, é possível verificar a compatibilidade do modelo.

Quanto à carroceria, a resposta ao pulso é também um oscilador amortecido, porém com uma frequência de oscilação menor que da roda, haja visto que o veículo possui uma massa substancialmente maior que a massa da roda. Analogamente, a atenuação é exponencial. Conforme figura 30:

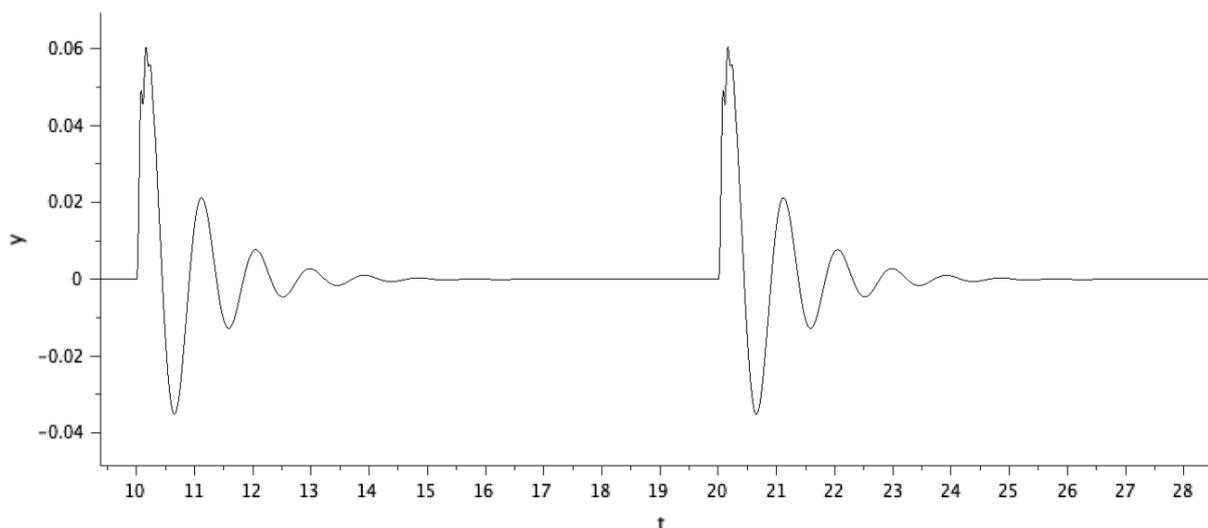


Figura 30 - Deslocamento vertical da carroceria (entrada)

Fonte: Pesquisa direta (2023)

É possível ver que o deslocamento $y(t)$ do carro apresenta um comportamento oscilatório após a perturbação na estrada.

Isso ocorre porque a suspensão está atuando para minimizar o impacto do obstáculo e retornar o sistema à posição de equilíbrio. Podemos observar que o deslocamento máximo do carro é de aproximadamente 6,8 cm acima da posição de equilíbrio. Esse valor é influenciado pelos parâmetros do sistema, como as constantes elásticas das molas e o coeficiente de amortecimento, além da massa da roda e do carro. Quanto maiores forem esses parâmetros, maior será a capacidade da suspensão em minimizar impactos.

Também podemos observar que o tempo de vibração do sistema, ou seja, o tempo que o sistema leva para retornar à posição de equilíbrio após o impacto, é de aproximadamente 2 segundos. Esse valor é influenciado principalmente pela constante elástica das molas e pelo coeficiente de amortecimento, já que esses parâmetros afetam a capacidade do sistema em dissipar energia. Essa análise também se aplica a figura 31:

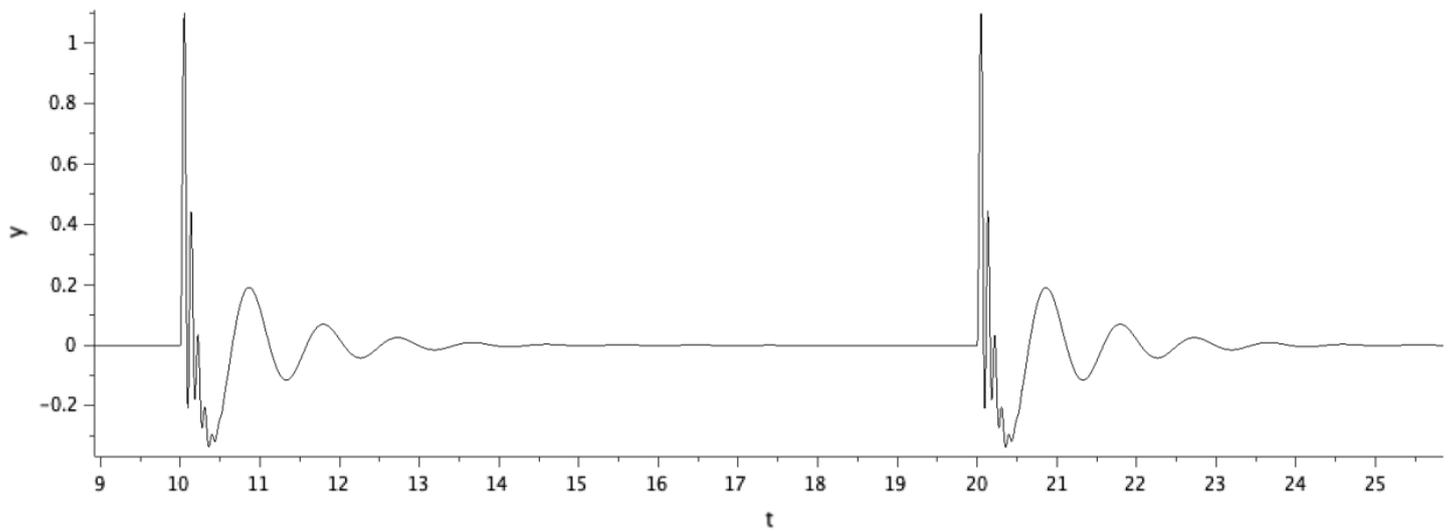


Figura 31- Velocidade vertical da carroceria (entrada)

Fonte: Pesquisa direta (2023)

A velocidade vertical da roda apresenta um comportamento oscilatório, igualmente ao deslocamento mostrado anteriormente, após a perturbação na estrada.

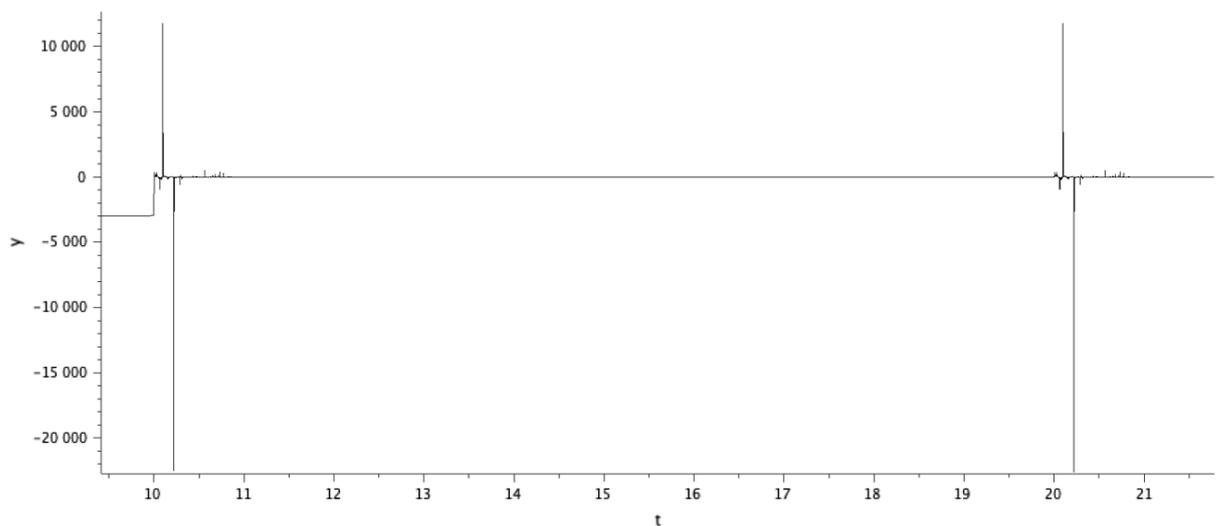


Figura 32 - Aceleração vertical da carroceria (entrada)

Fonte: Pesquisa direta (2023)

Analogamente, na Figura 35 também temos o resultado da aceleração vertical da carroceria do veículo, que apresenta valores não compatíveis com o esperado para o sistema de amortecimento. Desta maneira, ao selecionarmos o método de Runge-Kutta de quarta ordem

RK45, que possui precisão superior ao método de Newton, o resultado, apresentado na Figura 33 para a aceleração da carroceria, é compatível com o que se espera do modelo.

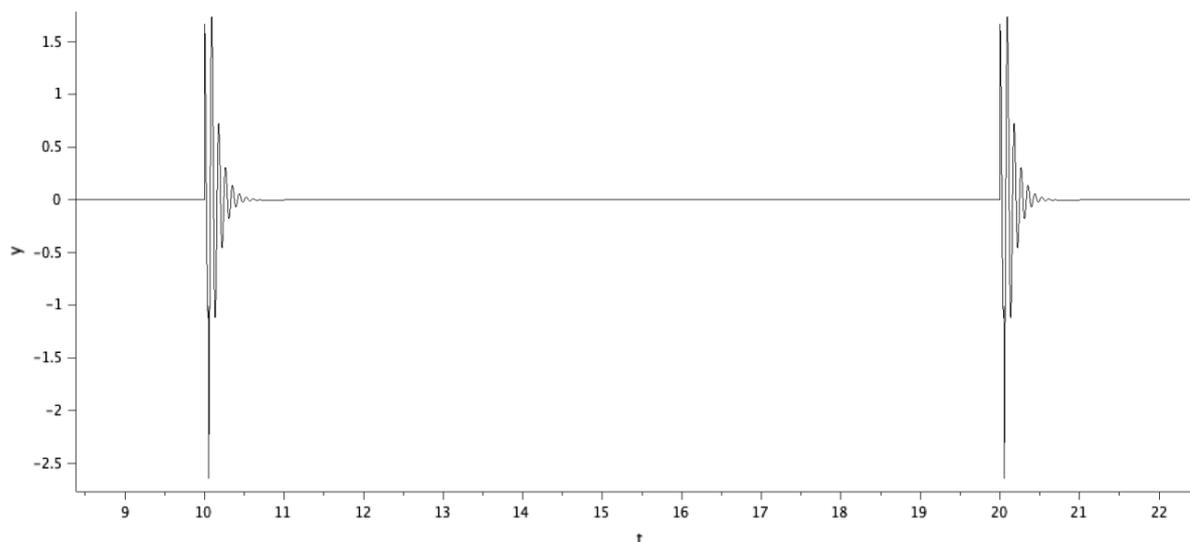


Figura 33 - Aceleração vertical da carroceria (entrada)

Fonte: Pesquisa direta (2023)

Uma aplicação bem prática que pode ser feita nesse modelo, e de grande importância é quando o veículo percorre um trajeto irregular, de forma semelhante ao primeiro trajeto estudado com 20cm de irregularidade. Basta então mudar os tipos de sinais de entrada, que podem ser em forma de uma função trigonométrica ou em forma de pulsos. Sabendo que a função resposta é semelhante (no tipo de função) à função excitante, será analisado uma forma de pulso e ela será comparada à resposta. Os parâmetros considerados são:

- Delay de 1 segundo;
- Amplitude de 5centímetros, ou -0,05metros;
- Intervalo de tempo em que surge a irregularidade: 3 segundos;
- Período de atuação do pulso de: $3 * 33,333\% = 1$ segundo;

Ou seja, o veículo percorre pela lacuna em 1 segundos e depois volta ao nível normal do solo. Pode-se observar essa ação na figura 34:

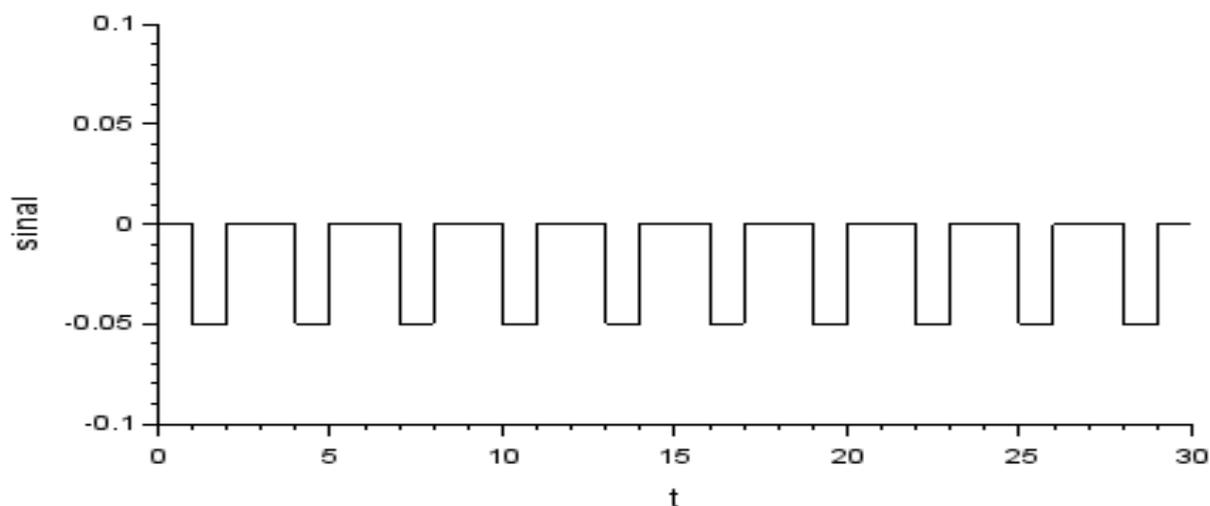


Figura 34 - Sinais de entrada para pista irregular em forma de pulsos frequentes

Fonte: Pesquisa direta (2023)

Na figura 34 observou-se o comportamento do deslocamento e na figura 35 vemos o movimento da roda nessa superfície irregular:

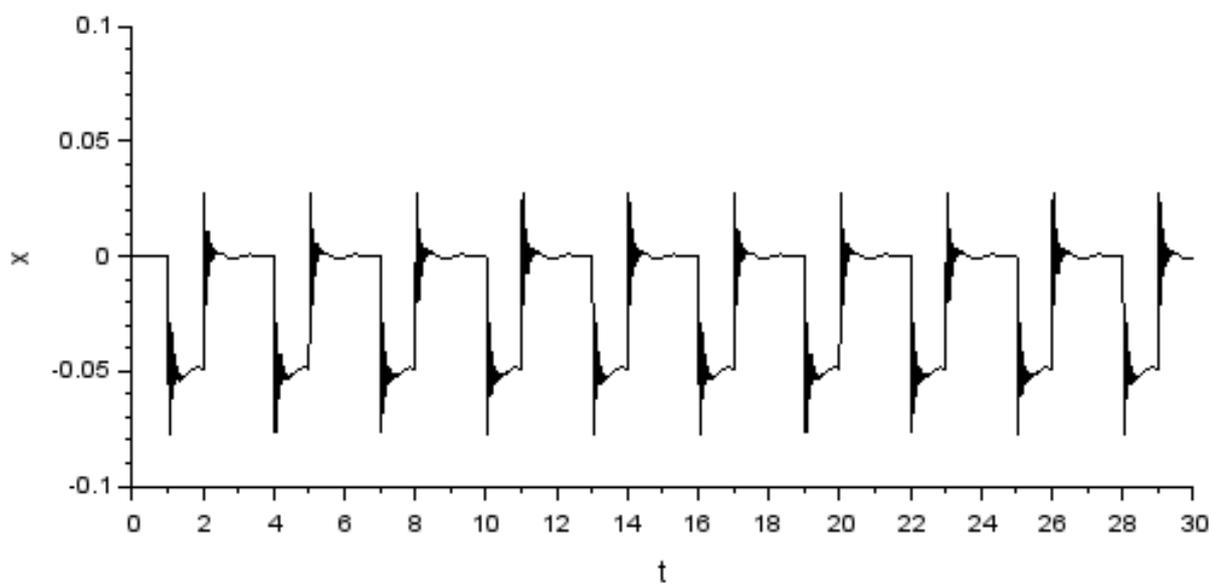


Figura 35 - Movimento da roda em pista irregular

Fonte: Pesquisa direta (2023)

Na figura 35, da mesma forma como o pulso, que está alternando entre -5cm e zero, nota-se que o deslocamento da roda também alterna para estas regiões de deslocamento. Quando o pulso é de -0,05m a roda desloca até aproximadamente -0,08m, estabiliza sua

oscilação rapidamente (em 0,5 segundos) e logo alterna para a região próximo a 0m. Comparando com uma pista irregular real, com rachaduras com dimensão de uma roda, ora a roda está completamente dentro (quando o pulso é -0,05m) e ora, completamente fora (quando o pulso é 0m). Na figura 36, têm-se o movimento do carro nessa pista irregular:

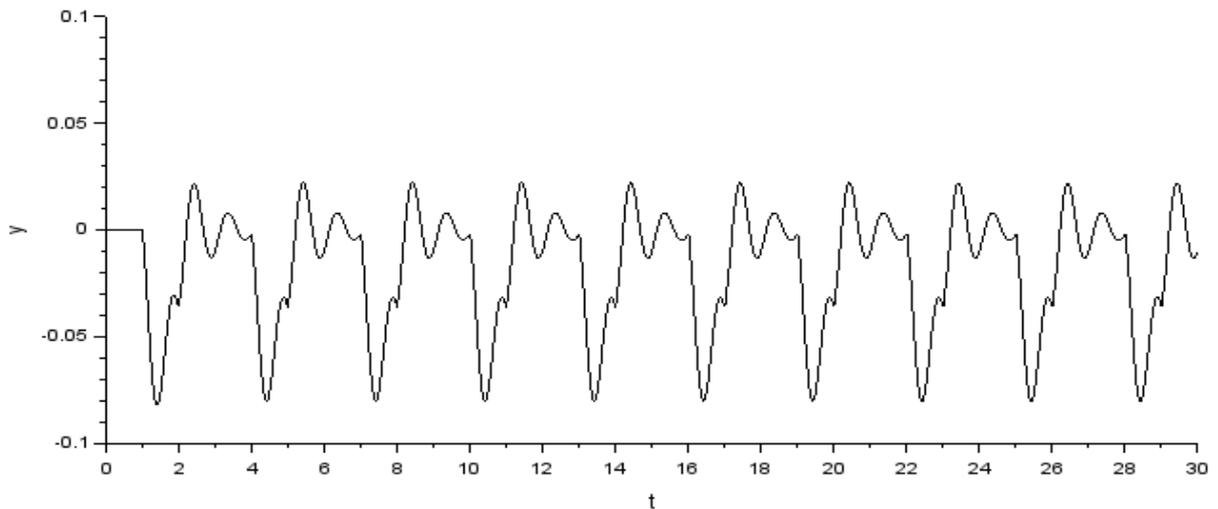


Figura 36 - Movimento do carro em pista irregular

Fonte: Pesquisa direta (2023)

A figura 36 demonstra o comportamento do carro ao passar pela superfície irregular. Portanto, o software SCILAB nos proporciona aplicações práticas como essa. Para validar o sistema simulado, vamos resolver o conjunto analiticamente.

A partir das equações (3) e (4) citadas no início deste capítulo, monta-se o sistema na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b & -b \\ -b & b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 u \\ 0 \end{bmatrix}$$

Para verificar a precisão da simulação as frequências naturais do sistema podem ser determinadas e comparadas às encontradas pelos gráficos do XCOS. Da mesma forma como foi simulada a vibração livre, será feito nesta manipulação algébrica. Considera-se que o sistema não é amortecido e que não há forças externas atuando:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Na forma algébrica:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x} + (k_1 + k_2)x - k_2 y &= 0 \\ m_2 \ddot{y} + k_2 y - k_2 x &= 0 \end{aligned}$$

Realizando a seguinte substituição no sistema acima:

$$\begin{aligned} x(t) &= A \cos(\omega t + \varphi) & ; & \quad x''(t) = -A\omega^2 \cos(\omega t + \varphi) \\ y(t) &= B \cos(\omega t + \varphi) & ; & \quad y''(t) = -B\omega^2 \cos(\omega t + \varphi) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rightarrow -m_1 A \omega^2 \cos(\omega t + \varphi) + (k_1 + k_2) A \cos(\omega t + \varphi) - k_2 B \cos(\omega t + \varphi) &= 0 \\ -m_2 B \omega^2 \cos(\omega t + \varphi) + k_2 B \cos(\omega t + \varphi) - k_2 A \cos(\omega t + \varphi) &= 0 \end{aligned}$$

Eliminando o termo com cosseno:

$$\begin{aligned} -m_1 A \omega^2 + (k_1 + k_2) A - k_2 B &= 0 \\ -m_2 B \omega^2 + k_2 B - k_2 A &= 0 \end{aligned}$$

Agrupando os termos com A e com B:

$$\begin{aligned} [-m_1 \omega^2 + (k_1 + k_2)] A - k_2 B &= 0 \\ -k_2 A + (-m_2 \omega^2 + k_2) B &= 0 \end{aligned}$$

Na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} -m_1 \omega^2 + (k_1 + k_2) & -k_2 \\ -k_2 & -m_2 \omega^2 + k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Para que o sistema acima tenha soluções não triviais o determinante da matriz deve ser nulo. Calculando então o determinante substituindo os valores que se possui, temos a seguinte equação a ser resolvida:

$$20000\omega^4 - 1,09 * 10^8 \omega^2 + 5 * 10^9 = 0$$

Dividindo a equação por 20000 (constante de mola do suporte) e substituindo ω^4 por s^2 :

$$s^2 - 5450s + 250000 = 0 \rightarrow \begin{cases} s_1 = 5403,7 = \omega_{nx}^2 \\ s_2 = 46,3 = \omega_{ny}^2 \end{cases}$$

As frequências naturais são:

$$\begin{cases} \omega_{nx} = \sqrt{5403,7} = 73,5 \frac{rad}{s} \\ \omega_{ny} = \sqrt{46,3} = 6,8 \frac{rad}{s} \end{cases}$$

Comparando as frequências com aquelas encontradas nos gráficos da simulação:

Tabela 2 - Validação dos resultados

| Referência | XCOS | Analítica | Erro |
|------------|------|-----------|-------|
| Roda, x | 70 | 73,5 | 4,76% |
| Carro, y | 6,6 | 6,3 | 4,76% |

Fonte: Pesquisa direta (2023)

A partir dos gráficos obtidos para a simulação inicial do sistema nota-se que a roda realiza 4 ciclos em meio segundo, até seu deslocamento vertical se tornar desprezível. Isso mostra que para a roda o efeito dissipativo do amortecedor é muito maior que a função que a mola exerce de armazenar a energia. Sendo assim é razoável dizer que os efeitos da mola na roda são desprezíveis. Já para o carro, apesar de também ter realizado 4 ciclos de movimento vibracional, estes ciclos duraram aproximadamente 3,5 segundos, o que torna os efeitos das molas mais evidente.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

A análise matemática é uma ferramenta fundamental para a otimização de sistemas dinâmicos, como é o caso da suspensão veicular. Neste trabalho de conclusão de curso, foi modelado e simulado um sistema de suspensão veicular por meio do software SCILAB. A simulação foi realizada com sucesso, tendo como objetivo analisar o comportamento do sistema diante de uma perturbação na estrada na forma de pulsos e também em uma superfície irregular. Os resultados obtidos foram promissores, demonstrando que o sistema foi capaz de absorver as oscilações geradas pela perturbação, mantendo a roda em contato constante com o solo e garantindo o conforto dos passageiros.

Conforme os resultados alcançados por meio das simulações, verificou-se que o sistema de amortecimento amenizou consideravelmente o impacto sentido pelo passageiro. O deslocamento sentido pelo passageiro foi 3,3 vezes menor que a perturbação no solo. Além disso, pela mudança dos parâmetros da suspensão, seria ainda possível diminuir ainda mais o impacto sentido pelo passageiro.

Foi possível analisar ainda a influência dos parâmetros do sistema nas oscilações geradas pela perturbação. Foi verificado que o coeficiente de amortecimento (b) tem uma grande influência na absorção das oscilações, sendo responsável por dissipar a energia gerada pelas oscilações de forma mais eficiente. Já as constantes elásticas (k_1 e k_2) influenciam mais na frequência natural de oscilação do sistema, ou seja, na rapidez com que as oscilações diminuem.

A simulação computacional do amortecimento de 1/4 uma suspensão veicular através do software SCILAB foi bem-sucedida, demonstrando a capacidade do software em simular sistemas dinâmicos como esse. O uso de ferramentas computacionais para análise e simulação de sistemas é fundamental para a melhoria do desempenho dos veículos, garantindo a segurança e o conforto dos usuários.

Conclui-se, portanto, que a simulação computacional de uma suspensão veicular através do software SCILAB é uma ferramenta importante para a análise e otimização do sistema. A análise dos resultados obtidos mostrou que a suspensão foi capaz de absorver as oscilações geradas pela perturbação na estrada, garantindo a estabilidade e o conforto dos ocupantes. A

partir da análise dos parâmetros do sistema, foi possível verificar a influência de cada um deles nas oscilações geradas pelo sistema.

5.2 Recomendações

Com base na pesquisa realizada, algumas indicações para trabalhos futuros são:

- Estudo de outros tipos de suspensão automotiva: O trabalho realizado focou em uma suspensão de um quarto de veículo, mas existem outros tipos de suspensão que podem ser estudados e modelados. Dessa forma, é interessante que trabalhos futuros ampliem a análise para outros tipos de suspensão, como a suspensão dianteira e traseira completas.
- Análise de diferentes condições de carga: O trabalho abordou a análise da suspensão sem carga. Entretanto, as condições de carga podem afetar o comportamento da suspensão, podendo gerar alterações significativas no comportamento dinâmico do veículo. Portanto, seria interessante que trabalhos futuros analisassem o comportamento da suspensão em diferentes condições de carga.
- Utilização de outros softwares de simulação: O software SCILAB foi utilizado no trabalho atual para realizar a modelagem e simulação da suspensão. No entanto, existem outros softwares de simulação, como o MATLAB/Simulink e o Adams, que também podem ser utilizados para esse fim. Dessa forma, seria interessante comparar os resultados obtidos com diferentes softwares de simulação para avaliar a precisão e a eficácia dos resultados.
- Análise de diferentes materiais: O trabalho atual considerou apenas um tipo de material para a mola da suspensão. Entretanto, existem diferentes tipos de materiais que podem ser utilizados para a fabricação das molas, como aço, borracha e poliuretano, por exemplo. Sendo assim, seria interessante analisar o comportamento da suspensão com diferentes materiais de mola, a fim de avaliar as vantagens e desvantagens de cada material.
- Análise de diferentes condições de pista: As condições da pista são um fator importante que influencia o comportamento dinâmico do veículo. Portanto, seria interessante que trabalhos futuros considerassem diferentes condições de pista, como pavimento liso e irregular, para avaliar o comportamento da suspensão em diferentes condições de uso.
- Desenvolvimento de um protótipo: Com base nos resultados obtidos neste trabalho, seria interessante que trabalhos futuros desenvolvessem um protótipo da suspensão modelada e simulada no software. Dessa forma, seria possível avaliar na prática o comportamento da suspensão e validar os resultados obtidos na simulação.

- Análise de outros aspectos do sistema de suspensão: O sistema de suspensão automotiva é composto por vários componentes, como amortecedores, buchas, pivôs, entre outros. Portanto, seria interessante que trabalhos futuros analisassem outros aspectos do sistema de suspensão, além das molas, como o comportamento dos amortecedores, por exemplo.

Em suma, os trabalhos futuros podem se concentrar em uma variedade de tópicos para expandir o conhecimento sobre a modelagem e simulação computacional de suspensões automotivas. As indicações acima fornecem uma base para futuros estudos, bem como sugerem uma ampla gama de possibilidades de pesquisa dentro dessa área.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- AHMADIAN, M. (2001). **Active control of vehicle vibration**. Encyclopedia of Vibration 37–45.
- ANTIMPACTO. Tipo de suspensão. Jan.2018. Disponível em: <https://antimpacto.com.br/tipos-de-suspensao/>. Acesso em 05 MAR. 2023.
- CADILLAC. **Inside Magnetic Ride Control**. JÁN 2013. Disponível em: <https://media.gm.com/media/us/en/cadillac/vehicles/cts-v/2013.tab1.html>. Acesso em 05 MAR. 2023.
- CAETANO, Mário **O que é um pneu?** 2012. Disponível em: <<https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/aplicacoes/pneus/o-que-e-um-pneu/>> Acesso em 06 mar 2023
- CAMPOS FILHO, Frederico F. **Fundamentos de SCILAB**,. ago. 2010. Disponível em: <https://www.ime.unicamp.br/~encpos/VIII_EnCPos/Apostila_Scilab.pdf. > Acesso em: 19 mar. 2023. (p. 1-4)
- COFAP. **Molas helicoidais: O que são e quais suas funções**. Junho 2022. Disponível em: <https://blog.mmcofap.com.br/2022/06/06/molas-helicoidais-o-que-sao-e-quais-as-suas-funcoes/> Acesso em 05 MAR. 2023.
- CUNHA, C. F.; SILVA, J. R. A. **Análise do comportamento dinâmico de sistemas de suspensão veicular**. In: Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia de Sistemas Automotivos, 2017.
- CROLLA, D. A. **Vehicle suspension systems**. London: Butterworth-Heinemann, 2006. 384p.
- GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. 176p.
- GILLESPIE, T. D. **Fundamental of Vehicles Dynamics**. Warrendale, PA: Society ofAutomotiveEngineers, 1992, 470p
- KARNOPP, D. C.; MARGOLIS, D. L.; ROSENBERG, R. C. **System dynamics: a unified approach**. 3. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley& Sons, 2012, 666p
- HEYWOOD, J. B. **Internalcombustionenginefundamentals**. New York: McGraw-Hill Education, 2018. 947p.
- JOHNSON, D. A.; MERIAM, J. L. **Estática: mecânica para engenharia**. São Paulo: LTC, 2014. 440 p.
- LIMA, F. L. **Suspensão veicular: tipos e aplicações**. Revista Brasileira de Engenharia e Ciência, v. 4, n. 1, p. 27-34, 2018.
- KARVI. **Quais as melhores marcas de amortecedores**. MAR.2021 Disponível em: <https://www.karvi.com.br/blog/quais-as-melhores-marcas-de-amortecedores/> Acesso em 05 MAR
- KIM, T. et al. **Optimization design of a suspension system usingthe Response Surface Methodology**. JournalofMechanical Science and Technology, v. 33, n. 5, p. 2405-2411, 2019.
- MAGALHÃES, L. B. **Análise comparativa entre sistemas de suspensão automotiva**. Revista da Universidade Vale do Rio Verde, v. 13, n. 1, p. 691-703, 2015.
- MECANICA industrial. **USO DAS MOLAS DE LÂMINA**. MARÇO 2012 Disponível em: <https://www.mecanicaindustrial.com.br/388-uso-das-molas-de-lamina/>. Acesso em 05 MAR. 2023.
- MASCARENHAS, M. T. de. **Metodologia científica**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2012. 226p.
- MENEZES, A. et al. (2012). **A função da suspensão no desempenho e segurança veicular**. In: Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Automotiva, 10., 2012, São Paulo. São Paulo: SAE Brasil.

MORSCH, F. V. et al. **Análise comparativa entre amortecedores hidráulicos de simples e dupla ação**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 24., 2019, Blumenau. Anais eletrônicos [...]. Blumenau: ABCM, 2019.

MILLIKEN, W. F.; MILLIKEN, D. L. **Vehicle dynamics**. Warrendale: SAE International, 2002. 1280p.

NASCIMENTO, P. et al. (2015). **Projeto de suspensão veicular: dirigibilidade, conforto e segurança**. In: Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Automotiva, 13., 2015, São Paulo. São Paulo: SAE Brasil.

NICOLAZZI, F.; LEAL, E.; ROSA, J. L. **Modelagem dinâmica de suspensões veiculares**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 23., 2012, Gramado. Anais... Gramado: ABCM, 2012. p. 1-10.

NISE, N. S. **Engenharia de Sistemas de Controle**. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 774p.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 4ª ed. São Paulo: Pearson, 2010. 904p.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5ª ed. São Paulo: Pearson, 2014.984p.

OLIVEIRA, R. A. **Suspensão veicular: a importância dos avanços tecnológicos**. Revista Científica Interdisciplinar, v. 4, n. 1, p. 57-64, 2017.

QUADRO rodas. **Multilink ou eixo de torção: qual a melhor suspensão para seu uso?** NOV. 2016 Disponível em: <https://quatorrodas.abril.com.br/noticias/multilink-ou-eixo-de-torca-qual-a-melhor-suspensao-para-seu-uso/> Acesso em 05 MAR. 2023.

QUADRO rodas. **Qual a diferença entre suspensão multilink e por eixo de torção?**. MAI 2021 Disponível em: <https://quatorrodas.abril.com.br/auto-servico/qual-a-diferenca-entre-suspensao-multilink-e-por-eixo-de-torca/Acesso em 05 MAR. 2023>.

SANTOS, A. B. dos et al. **A importância dos amortecedores no sistema de suspensão veicular**. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2021

SOUZA, A. C. A.; COSTA, D. P.; LORENZETTI, D. C.; PELLISARI, E. R.; ALMEIDA, F. T.; DE LAZZER, J. P.; SILVA, L. C. M.; FERREIRA, M. R.; FERREIRA, P. H. B. M. **Mecânica Veicular**. São Paulo: Pearson, 2014

TOP da boleia peças e acessórios. **Bolsa Mola Pneumática para Suspensão a Ar Caminhão**. Mar 2023. Disponível em: https://www.topdabileia.com.br/acessorios-para-caminhao/bolsa-mola-pneumatica-para-suspensao-a-ar-caminhao_ Acesso em 05 MAR. 2023.

WANG, Y. et al. **Modeling and simulation of vehicles uspension system with MATLAB/Simulink**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 421, n. 4, p. 042052, 2018.