



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS  
MESTRADO PROFISSIONAL

## **MODELAGEM E ANÁLISE DO SISTEMA DE SUSPENSÃO DIANTEIRA DE UMA MOTOCICLETA AO FREAR**

**Braz da Costa Andrade Júnior**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos – Mestrado Profissional, PPGEP/ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos.

Orientador: Eduardo de Magalhães Braga

Belém

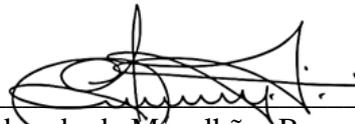
Agosto de 2021

**MODELAGEM E ANÁLISE DO SISTEMA DE SUSPENSÃO DIANTEIRA DE  
UMA MOTOCICLETA AO FREAR**

Braz da Costa Andrade Júnior

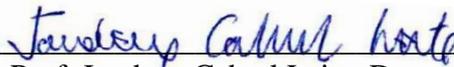
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA PROCESSOS – MESTRADO PROFISSIONAL (PPGEP/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA DE PROCESSOS.

Examinada por:



---

Prof. Eduardo de Magalhães Braga, Dr.  
(PPGEP/ITEC/UFPA-Orientador)



---

Prof. Jandecy Cabral Leite, Dr.  
(PPGEP/ITEC/UFPA-Membro)



---

Prof. Ednelson da Silva Costa, Dr.  
(PPGEP/ITEC/UFPA-Membro)

BELÉM, PA - BRASIL

AGOSTO DE 2021

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Sistema de Bibliotecas da UFPA**

---

Andrade Júnior, Braz da Costa, 1980-  
Modelagem e análise do sistema de suspensão dianteira de  
uma motocicleta ao frear / Braz da Costa Andrade Júnior -  
2021.

Orientador: Eduardo de Magalhães Braga

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal  
do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia de Processos, 2021.

1. Motocicleta 2. Suspensão dianteira 3. Dinâmica da  
frenagem 4. Lombada 5. Simulação I. Título

CDD 670.42.

---

*Este trabalho é dedicado ao meu pai  
(Braz da Costa Andrade), in memoriam,  
ribeirinho com grande gosto pela leitura,  
curiosidade e inventividade e que serviu  
como modelo de cientista para este autor.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que ajudaram direta ou indiretamente na evolução deste trabalho, com especial destaque:

Ao Professor Doutor Eduardo de Magalhães Braga, orientador, responsável por aconselhar e nortear esta dissertação de mestrado;

Ao Professor Doutor Mauro Speranza Neto, que em seus ensinamentos plantou no autor a semente da Dinâmica e Simulação de Sistemas;

Ao Professor Doutor Jandecy Cabral Leite, pelas ajudas durante a pesquisa desta dissertação;

À minha mãe, minha esposa e filhos (Walmira, Tatiana, Antônio e André) pela compreensão durante as ausências e o tempo dedicado a este trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGEP/UFPA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Processos (M. Eng.)

## **MODELAGEM E ANÁLISE DO SISTEMA DE SUSPENSÃO DIANTEIRA DE UMA MOTOCICLETA AO FREAR**

**Braz da Costa Andrade Júnior**

Agosto/2021

Orientador: Eduardo de Magalhães Braga

Área de Concentração: Engenharia de Processos

Este trabalho descreve um estudo da dinâmica de um veículo terrestre com dois graus de liberdade, no qual inicialmente foi feita uma breve revisão dos conceitos históricos das suspensões e de seu uso nas motocicletas, dando especial atenção à suspensão dianteira. Em seguida, foram explanados os principais elementos que compõem o sistema de suspensão, nominalmente: a mola, responsável por absorver os impactos produzidos pelo contato do pavimento com os pneus, e o amortecedor, o qual dissipa a energia destes impactos e impede que a mola se distenda e comprima indefinidamente. Foram analisadas a fundo as irregularidades no pavimento, com um enfoque maior àquela denominada lombada, definindo suas características principais e obtendo suas equações. Os efeitos da frenagem, bem como os efeitos da transferência dinâmica de carga, aqueles devidos à rotação do veículo em torno do centro de gravidade oriundos da frenagem, foram revistos e analisados, sendo igualmente obtidas suas equações características. Finalmente, o modelo da suspensão dianteira da motocicleta foi criado em software de simulação computacional, tendo como equações de entrada as equações definidas nos capítulos anteriores, sendo a análise dos gráficos resultantes o principal produto desta dissertação.

Abstract of Dissertation presented to PPGE/UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Process Engineering (M. Eng.)

## **MODELING AND ANALYSIS OF THE FRONT SUSPENSION SYSTEM OF A MOTORCYCLE WHEN BRAKE**

**Braz da Costa Andrade Júnior**

August/2021

Advisor: Eduardo de Magalhães Braga

Research Area: Process Engineering

This work describes a study of the dynamics of a ground vehicle with two degrees of freedom, in which initially it was done a brief revision of the historical concepts of the suspensions and their use in the motorcycles, with special attention to the front suspension. Then after, they were explained the main elements which compose the suspension system, nominally: the spring, which is responsible for absorb the shocks produced for the contact with the ground, and the damper, which dissipate the energy of this shocks and don't allow that the spring stretch out and compress indefinitely. They were analyzed the irregularities of the ground deeply, with a larger focus in that denominated speed bump, defining its main characteristics and obtaining its equations. The effects of the braking, as well as the effects of the dynamic transfer of load, those owed to the rotation of the vehicle around the center of gravity originating from of the braking, were reviewed and analyzed, being obtained its characteristic equations equally. Finally, the model of motorcycle front suspension was created in computational simulation, having as input equations the equations defined in the previous chapters, being the analysis of the resulting graphs the main product of this dissertation.

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</b>                            | <b>1</b>  |
| 1.1 - DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....                               | 1         |
| 1.2 - OBJETIVOS.....   | 3         |
| <b>1.2.1 - Objetivo geral.....</b>                             | <b>3</b>  |
| <b>1.2.2 - Objetivos específicos.....</b>                      | <b>3</b>  |
| 1.3 - MOTIVAÇÃO E IMPORTÂNCIA DO TRABALHO.....                 | 3         |
| 1.4 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....                             | 5         |
| <b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA.....</b>                 | <b>6</b>  |
| 2.1 - HISTÓRIA DAS MOTOCICLETAS.....                           | 6         |
| <b>2.1.1 - A primeira fábrica.....</b>                         | <b>8</b>  |
| <b>2.1.2 - A motocicleta no Brasil.....</b>                    | <b>9</b>  |
| 2.2 - CONCEITOS FUNDAMENTAIS DO SISTEMA DE SUSPENSÃO.....      | 10        |
| <b>2.2.1 - As Molas.....</b>                                   | <b>12</b> |
| 2.2.1.1 - Molas helicoidais.....                               | 14        |
| <b>2.2.2 - Os amortecedores.....</b>                           | <b>16</b> |
| 2.2.2.1 - Amortecedores ativos.....                            | 20        |
| 2.2.2.2 - Amortecedores semi-ativos.....                       | 21        |
| 2.2.2.3 - Amortecedores passivos.....                          | 22        |
| <b>2.2.3 - As massas suspensas e massas não suspensas.....</b> | <b>22</b> |
| <b>2.2.4 - Características do pneu.....</b>                    | <b>23</b> |
| 2.3 - CLASSIFICAÇÃO DAS SUSPENSÕES.....                        | 24        |
| <b>2.3.1 - Subdivisão dos sistemas de suspensão.....</b>       | <b>25</b> |
| 2.3.1.1 - Sistemas passivos.....                               | 26        |
| 2.3.1.2 - Sistemas ativos.....                                 | 26        |
| <b>2.3.2 - Suspensão nas motocicletas.....</b>                 | <b>26</b> |
| 2.3.2.1 - Suspensão dianteira da motocicleta.....              | 27        |
| 2.3.2.2 - Modificações nas suspensões dianteiras.....          | 28        |
| 2.4 - TRANSFERÊNCIA DINÂMICA DE CARGA.....                     | 29        |
| 2.5 - DINÂMICA DA FRENAGEM.....                                | 32        |
| <b>2.5.1 - Atrito superficial e rugosidade.....</b>            | <b>33</b> |
| <b>2.5.2 - Forças atuantes na frenagem da motocicleta.....</b> | <b>33</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.6 - IRREGULARIDADES NO PAVIMENTO.....                            | 36        |
| <b>2.6.1 - A lombada.....</b>                                      | <b>37</b> |
| 2.7 - CONCEITOS DE MODELAGEM MATEMÁTICA.....                       | 41        |
| <b>2.7.1 - Concepção de modelo.....</b>                            | <b>43</b> |
| <b>2.7.2 - Esquema representativo da dinâmica de veículos.....</b> | <b>44</b> |
| <b>CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                       | <b>47</b> |
| 3.1 - MODELAMENTO DA SUSPENSÃO DIANTEIRA.....                      | 47        |
| <b>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>                    | <b>57</b> |
| 4.1 - ANÁLISE DOS RESULTADOS.....                                  | 57        |
| <b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>                    | <b>64</b> |
| 5.1 - CONCLUSÕES.....  | 64        |
| 5.2 - SUGESTÕES.....   | 65        |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>                             | <b>66</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Figura 2.1  | Primeira motocicleta com motor de combustão interna.....                          | 7  |
| Figura 2.2  | Ciclomotor de 48cm <sup>3</sup> : primeiro modelo criado pela Honda, em 1948..... | 8  |
| Figura 2.3  | Propagação das ondas de impacto na roda dianteira.....                            | 11 |
| Figura 2.4  | Arranjo de molas helicoidais.....   | 14 |
| Figura 2.5  | Mola com diferentes formatos.....   | 15 |
| Figura 2.6  | Componentes do amortecedor.....   | 18 |
| Figura 2.7  | Ações da válvula.....   | 20 |
| Figura 2.8  | Motocicleta na condição estática.....   | 30 |
| Figura 2.9  | Motocicleta na condição de frenagem.....  | 30 |
| Figura 2.10 | Forças aplicadas e resultantes de frenagem.....                                   | 31 |
| Figura 2.11 | Representação de coordenadas padronizadas pela SAE.....                           | 32 |
| Figura 2.12 | Sistemas de forças atuantes numa frenagem em pavimento plano.....                 | 35 |
| Figura 2.13 | Lombada de acordo com artigo 3 da Resolução 39 do Contran..                       | 37 |
| Figura 2.14 | Modelo simplificado: suspensão antes de iniciar a ultrapassagem da lombada.....   | 38 |
| Figura 2.15 | Grafo de ligação da suspensão dianteira.....                                      | 39 |
| Figura 2.16 | Modelo da motocicleta com dois graus de liberdade.....                            | 44 |
| Figura 2.17 | Esquema representativo da dinâmica de veículos.....                               | 45 |
| Figura 3.1  | Par de integrais para as acelerações $a_1$ e $a_2$ .....                          | 48 |
| Figura 3.2  | Inclusão dos blocos Massa 1 e Massa 2 representando as massas do modelo.....      | 49 |
| Figura 3.3  | Inclusão dos amortecedores no modelo.....   | 49 |
| Figura 3.4  | Inclusão das constantes das molas.....  | 50 |
| Figura 3.5  | Componente vertical da transferência de cargas.....                               | 50 |
| Figura 3.6  | Componente horizontal da transferência dinâmica de cargas.....                    | 51 |
| Figura 3.7  | Somatória dos componentes horizontal e vertical.....                              | 51 |
| Figura 3.8  | Módulo completo da transferência dinâmica de cargas.....                          | 52 |
| Figura 3.9  | Inclusão do componente de transferência dinâmica de carga.....                    | 52 |
| Figura 3.10 | Componente que simula o pavimento e a lombada.....                                | 53 |

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Figura 3.11 | Bloco pavimento com incremento do bloco step.....  | 53 |
| Figura 3.12 | Utilização do sinal do bloco pavimento.....  | 54 |
| Figura 3.13 | Modelo completo da suspensão dianteira.....  | 54 |
| Figura 3.14 | Modelo completo da suspensão dianteira com saída de resultados.....                              | 55 |
| Figura 4.1  | Gráfico resultante da simulação da suspensão dianteira para SIM <sub>A1</sub> (v=2,77 m/s).....  | 57 |
| Figura 4.2  | Gráfico resultante da simulação da suspensão dianteira para SIM <sub>A2</sub> (v=5,55 m/s).....  | 58 |
| Figura 4.3  | Gráfico resultante da simulação da suspensão dianteira para SIM <sub>A3</sub> (v=8,33 m/s).....  | 59 |
| Figura 4.4  | Gráfico resultante da simulação da suspensão dianteira para SIM <sub>A4</sub> (v=11,11 m/s)..... | 60 |
| Figura 4.5  | Gráfico resultante da simulação da suspensão dianteira para SIM <sub>A5</sub> (v=13,9 m/s).....  | 61 |
| Figura 4.6  | Gráfico resultante da simulação da suspensão dianteira para SIM <sub>A6</sub> (v=16,67 m/s)..... | 62 |
| Figura 4.7  | Gráfico unificado resultante das simulações.....   | 62 |

## LISTA DE TABELAS

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Tabela 2.1 | Descrição das distâncias principais e das forças atuantes na frenagem..... | 36 |
| Tabela 3.1 | Variáveis da motocicleta.....  | 56 |
| Tabela 3.2 | Simulações variando a velocidade sobre uma lombada padrão..                | 56 |
| Tabela 4.1 | Características das ondas resultantes: resumo dos dimensionais             | 63 |

## NOMENCLATURA

|         |   |
|---------|---|
| ABNT    | ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS        |
| CG      | CENTRO DE GRAVIDADE                             |
| CONTRAN | CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO                   |
| IBGE    | INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA |
| SAE     | SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS                 |

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 - DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

As motocicletas modernas são produzidas dentro de rígidas normas de segurança e qualidade (PAKDIL, 2017). Entretanto, em alguns países como o Brasil, a má qualidade das vias leva os requisitos de projeto ao extremo: desníveis no asfalto, valetas e lombadas desproporcionais e feitas sem método (seja com altura excessiva ou comprimento exagerado), sujeira na pista, animais de pequeno porte como cães e gatos trafegando livremente nas vias, drenagem insuficiente, buracos, etc. Todos esses fatores citados têm sua parcela de contribuição nos índices de acidentes com motocicletas (SILVA, 2018).

No comando da motocicleta, o piloto não conta com muitos dos acessórios de segurança que hoje equipam os veículos de quatro rodas (RÖBGER, 2017), tais como barras de proteção lateral, *airbags*, além de não contar com a própria proteção do chassi, visto que uma das características da motocicleta é ser um veículo “enxuto” e leve, e por isso são pouquíssimas as que possuem um chassi que envolva completamente o piloto, e na maioria das vezes, são motocicletas ainda em fase experimental (NAUDE, 2003). Em vista disso, o mais importante para o piloto de motocicletas é evitar os acidentes, pois estes têm graves consequências (WU, 2018).

Portanto, é de grande interesse dos projetistas e fabricantes conhecer o comportamento dinâmico das motocicletas em resposta às excitações impostas pelos locais em que trafegam. Isso torna possível a otimização dos componentes absorvedores de vibração das motocicletas (PERAZZO, 2018).

Diversos pesquisadores no mundo utilizam técnicas de modelamento matemático e de simulação computacional para ensaiar situações específicas na dinâmica das motocicletas (SPERANZA, 2005). Estes estudos visam ampliar a gama de conhecimentos sobre este veículo de duas rodas. Quanto maior o conhecimento do comportamento da motocicleta nos diversos carregamentos ao qual está sujeita, mais simples e intuitivo será projetar motocicletas seguras e confiáveis de se pilotar (KOOIJMAN, 2013).

Um dos sistemas críticos da motocicleta é a suspensão. É ela quem recebe as cargas e solicitações vindas do pavimento e transmitidas pelos pneus aos eixos dianteiro e traseiro (JIMENEZ, 2009). A pilotagem do veículo e o conforto do passageiro dependem do sistema de suspensão. A suspensão é que garante o contato entre os pneus do veículo e estrada, e ao mesmo tempo isola o condutor das irregularidades do pavimento (CARRATÙ, 2017).

Pretende-se neste trabalho modelar e estudar um sistema de suspensão veicular dianteira. A suspensão dianteira da motocicleta que será analisada vai ser modelada em um sistema não linear, a ser baseado no equilíbrio de forças e momentos, com dois graus de liberdade.

Faz-se necessário entender quais os efeitos e as consequências resultantes da dinâmica da frenagem, conhecida como transferência dinâmica de carga, para a dirigibilidade da motocicleta. Afinal, ao se deparar com um obstáculo na pista, o condutor deve ou não acionar os freios ao passar sobre o obstáculo? Qual a influência da velocidade nesse processo?

Nesta simulação, o efeito terá seu valor máximo no instante em que a motocicleta estiver passando sobre uma elevação no pavimento, desta maneira será possível analisar a suspensão sobre carregamentos simultâneos. Basicamente, esse efeito simultâneo ocorre quando, por exemplo, o piloto da motocicleta, ao perceber que está a uma velocidade superior àquela fisicamente permitida para ultrapassar a elevação no pavimento (lombada), freia bruscamente e como na dinâmica da frenagem em duas rodas a roda dianteira é responsável por 70% da carga, a motocicleta efetua um giro em torno do seu centro de gravidade, no sentido do eixo traseiro para o dianteiro. Isso cria um carregamento no sistema de suspensão dianteira.

Logo em seguida, ainda efetuando o giro em torno do CG, a motocicleta começa a passar pela irregularidade no pavimento, o que também carrega a suspensão. Percebe-se então que a motocicleta está recebendo duas cargas simultâneas na suspensão dianteira.

A simulação e estudo da dinâmica veicular neste instante específico será o escopo desta dissertação.

## 1.2 - OBJETIVOS

### 1.2.1 - Objetivo geral

O objetivo desta dissertação consiste na simulação computacional de um sistema de suspensão dianteira de motocicleta obtendo um modelo consistente que permita acompanhar um instante crítico específico: o da frenagem ao passar por uma lombada. Nesse instante ocorre simultaneamente a transferência dinâmica de cargas resultante da frenagem e o carregamento da suspensão pela irregularidade do pavimento (lombada).

### 1.2.2 - Objetivos específicos

- Identificar as equações fundamentais do sistema massa-mola para o conjunto amortecedor dianteiro da motocicleta e aplicar essas equações no Matlab/Simulink;
- Na suspensão modelada, aplicar simultaneamente a carga proveniente da dinâmica da frenagem, (efeito da transferência dinâmica) e a carga devido a um elemento de elevação no nível do pavimento (lombada);
- Simular e analisar diferentes velocidades de ultrapassagem da suspensão pelo obstáculo.

## 1.3 - MOTIVAÇÃO E IMPORTÂNCIA DO TRABALHO

Os acidentes de trânsito constituem-se num grave problema social e econômico. Provocam desperdícios materiais e humanos, ceifando milhares de vidas anualmente no Brasil. (ANDRADE, 2017). No Brasil, o grande número de vítimas do trânsito tem se mostrado uma grave questão, principalmente nos grandes centros urbanos.

Os acidentes de trânsito representam uma das mais frequentes causas de óbitos no país, sendo que 55% das vítimas situam-se na faixa etária economicamente ativa (de 20 a 49 anos). A cada ano, mais de 33 mil pessoas morrem e cerca de 400 mil ficam feridas em ocorrências de trânsito (FREIRE, 2011). O Brasil é um dos recordistas mundiais de acidentes de trânsito, constituindo um alto custo social. Em qualquer circunstância que ocorram, são experiências ruins e representam um drama familiar e pessoal para os que

neles se envolvem. Quando se trata de motocicletas um tipo de acidente muito comum é a queda (DE JESUS, 2017).

O acidente de trânsito se tornou uma das principais causas de mortalidade da população jovem dos países industrializados. Os acidentes envolvendo motocicletas nas vias públicas e rodovias contribuem nesse sentido, uma vez que a motocicleta está simbolicamente associada à juventude, à aventura e à força (NATALIER, 2004). O acidente de trânsito tornou-se, por isso, uma questão de saúde pública que exige respostas rápidas e cuidados indispensáveis à preservação da vida das pessoas que circulam pelas vias públicas (VASCONCELOS, 2017).

As consequências dos acidentes de trânsito atingem proporções cada vez maiores e das mais diversas naturezas. Raramente ocorre um acidente de trânsito com motocicleta em que alguém não seja vitimado. A mobilização dos agentes do Estado para atender essas ocorrências é significativa. Além disso, a oferta de leitos hospitalares fica comprometida em razão da elevada demanda de acidentados. Estima-se um custo dos acidentes de trânsito no Brasil de 39 bilhões de reais só ano de 2012. O estado de São Paulo responde por 21,81% da frota circulante de motocicletas (AMARAL, 2017).

Com o aumento da produção e venda de automóveis no Brasil e restante do mundo, crescem, conseqüentemente, os problemas como aumento dos congestionamentos, altos índices de poluição e o estresse sobre os ocupantes, com veículos que, muitas vezes, levam apenas o motorista (DEMBOSKI, 2014). A moto se torna uma opção de transporte com agilidade nos grandes centros.

O excesso de velocidade nas vias quase sempre é um componente presente nos acidentes (LINDAU, 2015). Para limitar e controlar a velocidade nas vias o poder público utiliza ferramentas variadas como radares fixos e móveis, lombadas físicas e eletrônicas, etc.

Os anteparos físicos (lombadas), interagem com a ciclística dos veículos, principalmente com as motocicletas, fazendo que o condutor tenha de adequar sua pilotagem antes de transpor um desses obstáculos.

Fica claro perceber que um maior entendimento do comportamento das motocicletas, das forças que nela atuam e de seu comportamento frente às solicitações do dia-a-dia pode ajudar a evitar alguns destes acidentes, bem como auxiliar os fabricantes na direção de projetos cada vez mais seguros e confiáveis.

A motocicleta é o meio de transporte mecanizado mais prevalente do planeta. Em sua forma movida a energia humana, a bicicleta, é um dos primeiros veículos pragmáticos

e úteis que a maioria das pessoas encontra. A dinâmica dos veículos de duas rodas foi estudada por muitos anos e fornece a base para a maioria das análises dinâmicas dos veículos (TANELLI, 2014).

#### 1.4 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta dissertação foi dividida em quatro (4) capítulos. Os três (3) capítulos que seguem esta introdução descrevem:

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica do veículo estudado, sua história, dos conceitos e das técnicas a serem utilizadas, com uma breve descrição do funcionamento dos sistemas dinâmicos da motocicleta, com especial atenção aos componentes do sistema de suspensão, trazendo detalhes das molas e dos amortecedores.

O capítulo 3 descreve os procedimentos para escolha da metodologia e das diretrizes para realização da modelagem não linear do sistema. Serão mostradas as forças que atuam no pneu e em seu contato com o pavimento, o efeito da transferência dinâmica de cargas, a dinâmica da frenagem e suas forças, bem como as equações que definem as irregularidades no pavimento, tais como lombadas. Serão aplicados os conceitos de Bond Graphs (Grafos de Ligação), essenciais para o desenvolvimento deste trabalho e ilustrada a concepção do modelamento no software Matlab®/Simulink®.

O capítulo 4 finaliza o trabalho demonstrando os resultados e incitando uma breve discussão dos aspectos observados na simulação do comportamento do modelo da suspensão da motocicleta após receber os carregamentos aplicados.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO DA LITERATURA

#### 2.1 - HISTÓRIA DAS MOTOCICLETAS

A invenção da motocicleta foi, naturalmente, a consequência lógica de dois grandes avanços: o motor de combustão interna e a bicicleta (CHANDRA, 2018). A motocicleta foi inventada simultaneamente por um americano e um francês, sem se conhecerem e pesquisando em seus países de origem. Sylvester Roper nos Estados Unidos e Louis Perreaux, do outro lado do atlântico, fabricaram um tipo de bicicleta equipada com motor a vapor em 1869 (LIMA, 2004).

Nessa época os navios e locomotivas movidas a vapor já eram comuns, tanto na Europa como nos EUA, e na França e na Inglaterra os ônibus a vapor já estavam circulando normalmente (SARAIVA, 2016). As experiências para se adaptar um motor a vapor em veículos leves foram se sucedendo, e mesmo com o advento do motor a gasolina, projetos com motores a vapor continuaram sendo feitos até 1920, quando foram abandonadas definitivamente.

O inventor da motocicleta com motor de combustão interna foi o alemão Gottlieb Daimler<sup>1</sup>, que, ajudado por Wilhelm Maybach<sup>2</sup>, em 1885, instalou um motor a gasolina de um cilindro, leve e rápido, numa bicicleta de madeira adaptada, com o objetivo de testar a praticidade do novo propulsor (DIONÍSIO, 2016). Como conceito, a primeira motocicleta está ilustrada na Figura 2.1. A glória de ser o primeiro piloto de uma moto acionada por um motor (combustão interna) foi de Paul Daimler, um garoto de 16 anos filho de Gottlieb. O curioso nessa história é que Daimler, um dos pais do automóvel, não teve a menor intenção de fabricar veículos motorizados sobre duas rodas (DUARTE, 2014).

O fato é que, depois dessa máquina pioneira, nunca mais ele construiu outra, dedicando-se exclusivamente ao automóvel. O motor de combustão interna possibilitou

---

<sup>1</sup> Figura chave no desenvolvimento de motores de combustão interna a gasolina e na invenção e desenvolvimento do automóvel. Nascido em Schorndorf, trabalhou como um desenvolvedor de armas e passou um período estudando engenharia mecânica antes de estudar no colégio em Stuttgart. Daimler desenvolveu na Alemanha a primeira motocicleta em 1885, e o primeiro automóvel de quatro rodas com combustão interna em 1886.

<sup>2</sup> Em sociedade com Daimler em 1901, foi engenheiro-chefe da sociedade DMG (Daimler Motoren Gesellschaft) concebendo e coordenando inúmeros aprimoramentos às invenções de Daimler.

a fabricação de motocicletas em escala industrial, mas o motor de Daimler e Maybach, que funcionava pelo ciclo Otto e tinha quatro tempos, dividia a preferência com os motores de dois tempos, que eram menores, mais leves e mais baratos. Curioso observar que as primeiras motocicletas não tinham suspensão ou amortecimento de nenhum modo.



Figura 2.1 - Motocicleta com motor de combustão interna.  
Fonte: GOTTLIEB DAIMLER (1885).

No entanto, o problema maior dos fabricantes de ciclomotores - veículos intermediários entre a bicicleta e a motocicleta – era onde instalar o propulsor: se atrás do selim ou na frente do guidão, dentro ou sob o quadro da bicicleta, no cubo da roda dianteira ou da traseira. Na Figura 2.2 temos um ciclomotor com propulsor instalado dentro do quadro, similar aos das motocicletas atuais.



Figura 2.2 - Ciclomotor de 48cm<sup>3</sup>: primeiro modelo criado pela Honda, em 1948.  
Fonte: Revista Moto Esporte.

Como de início não houve um consenso, todas essas alternativas foram adotadas e ainda existem exemplares de vários modelos. Só no início do século XX os fabricantes chegaram a um consenso sobre o melhor local para se instalar o motor, ou seja, a parte interna do triângulo formado pelo quadro, padrão seguido até os dias atuais. Como o motor é peça de maior peso na motocicleta, sua posição de instalação tem grande influência no centro de gravidade do veículo.

### **2.1.1 - A primeira fábrica**

A primeira fábrica de motocicletas surgiu em 1894, na Alemanha, e se chamava Hildebrandt & Wolfmüller. No ano seguinte foi construída a fábrica Stern e em 1896 apareceram a Bougery, na França, e a Excelsior, na Inglaterra (LIMEBEER, 2006). No início do século XX já existiam aproximadamente 40 fábricas espalhadas pela Europa. Muitas indústrias pequenas surgiram desde então e, já em 1910, existiam 394 empresas do ramo no mundo, 208 delas na Inglaterra. A maioria fechou por não resistir à concorrência.

Nos Estados Unidos as primeiras fábricas - Columbia, Orient e Minneapolis - surgiram em 1900, chegando a 20 empresas em 1910 (LIMEBEER, 2006).

Tamanha era a concorrência que fabricantes do mundo inteiro começaram a introduzir inovações e aperfeiçoamentos, cada um deles tentando ser mais original. Estavam disponíveis motores de um a cinco cilindros, de dois a quatro tempos. As suspensões foram aperfeiçoadas para oferecer maior conforto e segurança.

A fábrica alemã NSU já oferecia, em 1914, a suspensão traseira do tipo monochoque (usado até hoje). A Minneapolis inventou um sistema de suspensão dianteira que se generalizou na década de 50 e continua sendo usada, hoje mais aperfeiçoada. Mas a moto mais confortável existente em 1914 e durante toda a década era a Indian de 998cm<sup>3</sup> que possuía braços oscilantes na suspensão traseira e partida elétrica, um requinte que só foi adotado pelas outras marcas recentemente.

Em 1923 a motocicleta inglesa Douglas já utilizava os freios a disco em provas de velocidade. Porém, foi nos motores que se observou a maior evolução, a tecnologia alcançando níveis jamais imaginados. Apenas como comparação, seriam necessários mais de 260 motores iguais ao da primeira motocicleta para se obter uma potência equivalente a uma moto moderna de mil cilindradas. Após a Segunda Grande Guerra, observou-se a invasão progressiva das máquinas japonesas no mercado mundial, fabricando motos com alta tecnologia, visual imponente, motor potente e leve, confortáveis e baratas. Nos EUA só restou a tradicional Harley-Davidson. Mas hoje o mercado está equilibrado e com espaço para todo mundo. Foi o início da era das supermáquinas nipônicas, que dura até hoje (LIMEBEER, 2006).

### **2.1.2 - A motocicleta no Brasil**

A história da motocicleta no Brasil começa no início do século passado com a importação de muitas motos europeias e algumas de fabricação americana, juntamente com veículos similares como *sidecar*, que era um dispositivo monocíclico acoplado à lateral de uma motocicleta, produzindo um veículo de três rodas. Os primeiros sidecars foram projetados de maneira que, em caso de necessidade, pudessem ser removidos da motocicleta. Triciclos, por sua vez, têm ambas as rodas traseiras tracionadas e ligadas no mesmo eixo e triciclos com motores. No final da década de 10 já existiam cerca de 20 marcas rodando no país, entre elas as americanas Indian e Harley-Davidson, a belga FN de quatro cilindros, a inglesa Henderson e a alemã NSU. A grande diversidade de modelos de motos provocou o aparecimento de diversos clubes e de competições (LIMA, 2004).

No final da década de 30 começaram a chegar ao Brasil as máquinas japonesas, a primeira da marca Asahi. Durante a guerra as importações de motos foram suspensas, mas retornaram com força após o final do conflito. Chegaram NSU, BMW, Zündapp (alemães), Triumph, Norton, Vincent, Royal-Enfield, Matchless (inglesas), Indian e Harley-Davidson (americanas), Guzzi (italiana), Jawa (tcheca), entre outras.

A primeira motocicleta fabricada no Brasil foi a Monark (ainda com motor inglês BSA de 125cm<sup>3</sup>), em 1951. Depois a fábrica lançou três modelos maiores com propulsores CZ e Jawa, da Tchecoslováquia e um ciclomotor (Monareta) equipado com motor NSU alemão. Nesta mesma década apareceram em São Paulo as motonetas Lambreta, Saci e Mosquito e no Rio de Janeiro começaram a fabricar a Iso, que vinha com um motor italiano de 150cm<sup>3</sup>, a Vespa e o Gulliver, um ciclomotor (LIMA, 2004).

O crescimento da indústria de automóveis no Brasil, juntamente com a facilidade de compra dos carros, a partir da década de 60, praticamente paralisou a indústria de motocicletas. Até o início da década de 1970, o setor automobilístico do país era formado apenas por indústrias de automóvel e caminhões. O Estado brasileiro deu um grande impulso ao desenvolvimento desse setor com incentivos fiscais e investimentos em infraestrutura e na indústria de base (MORAES, 2016). A partir da década de 70 o motociclismo ressurgiu com força, verificando-se a importação de motos japonesas (Honda, Yamaha, Suzuki) e italianas. Surgiram também as brasileiras FBM e a AVL. No final dos anos 70, início dos 80, surgiram várias montadoras, como a Honda, Yamaha, Piaggio, Brumana, Motovi (nome usado pela Harley-Davidson na fábrica do Brasil), Alpina, etc.

Nos últimos anos a indústria brasileira de motocicletas tornou-se altamente competitiva e tem se destacado na economia brasileira. Com as transformações econômicas e sociais ocorridas a partir de 1994, é possível observar que o cenário do setor modificou-se, tornando o ambiente das indústrias mais competitivo e exigindo das organizações respostas rápidas e eficazes (MARIM, 2010).

## 2.2 - CONCEITOS FUNDAMENTAIS DO SISTEMA DE SUSPENSÃO

A principal função do sistema de suspensão é isolar tanto o motociclista quanto a maior parte da motocicleta dos choques recebidos pelas irregularidades do pavimento - o primeiro objetivo visando o conforto, o segundo para a confiabilidade mecânica e a longevidade do veículo (FOALE, 2002). Ao fazer isso, é de vital importância manter as

rodas no contato mais próximo possível com o pavimento para máximo controle da moto (FISCHER, 2004). O tipo mais comum de sistema de suspensão em uma motocicleta tem um garfo telescópico na frente e braços oscilantes, chamado comumente de balanço, com amortecedores na parte traseira. (AZIZ, 2007)

O sistema de suspensão é útil por diversos motivos. Isolar a motocicleta dos impactos com o pavimento permite melhor:

- Controle - evita perda de dirigibilidade;
- Conforto - evita a fadiga ou lesões;
- Durabilidade - evita dano à motocicleta;
- Tração - garante que a roda permaneça em contato com o chão quando necessário.

A Figura 2.3 ilustra ondas de choque que se propagam na motocicleta, originadas de um impacto da roda dianteira com um obstáculo no pavimento.

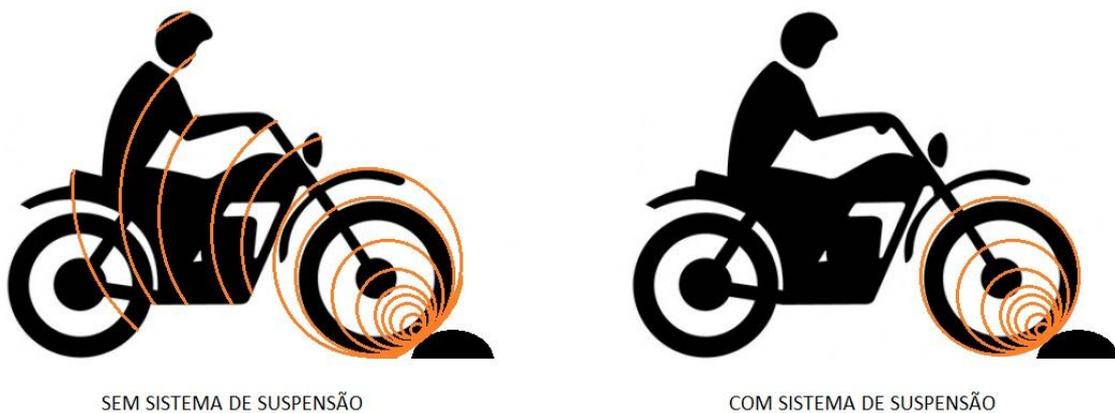


Figura 2.3 - Propagação das ondas de impacto na roda dianteira.  
Fonte: Adaptado de Rock Shox Suspension Theory Guide – 2014.

Projetos de suspensão de motocicletas representam um enorme desafio devido à ampla gama de demandas conflitantes trazidas pelo *design* do veículo e a pela necessidade de se apoiar nas curvas. A menor distância entre eixos e a relação de altura do CG dá origem a uma grande transferência de carga longitudinal durante a frenagem e a aceleração.

Para que a suspensão de uma motocicleta funcione como um dispositivo de controle de direção, ela deve ter alguma sensibilidade à velocidade de deslocamento para responder com mais força a grandes impactos do que a pequenas irregularidades no terreno. Isso significa transmissão indevida de força para o piloto. Portanto, um meio-

termo entre a força transmitida e o deslocamento relativo (curso) da suspensão é necessário em seu projeto (VLIET, 1983).

Dentro do contexto da caracterização dos componentes da suspensão do veículo, os amortecedores são um dos mais difíceis de alcançar, além de serem um fator muito crítico na previsão do comportamento dinâmico do veículo. Funções de força de saída fortemente não-lineares estão sempre ligadas a um comportamento dependente da frequência (AUDENINO, 1995).

No momento da frenagem a suspensão dianteira pode ter de suportar o equivalente a 100% do peso da motocicleta, adicionar isso às forças de frenagem e a carga da suspensão estática será quase triplicada. Ao fazer isso, também terá que manter sua capacidade de absorver os choques advindos das irregularidades do pavimento. As motocicletas off-road devem suportar as cargas adicionais de aterrissagem após saltos bastante altos, e isso deve ser feito dentro de um alcance de movimento de cerca de 300 mm. Um alto grau de sofisticação é necessário no projeto do amortecedor para fornecer o desempenho da suspensão (FOALE, 2002). A ampla gama de condições a serem atendidas significa que não há um projeto ideal. Se houvesse, então, não se teria notícia de como pilotos lutam para obter suas configurações corretas para um determinado circuito ou trajeto.

Existem quatro parâmetros principais que afetam a performance da suspensão:

- As molas;
- Os amortecedores;
- As massas suspensas e não suspensas;
- As características do pneu.

Nesta dissertação, será estudado cada um desses parâmetros isoladamente e em seguida como um sistema completo.

### **2.2.1 - As molas**

Uma mola é um dispositivo que absorve a energia de uma força aplicada. A energia é armazenada na mola até que a força seja liberada, momento em que a mola retorna à sua posição não comprimida original (BARTON, 2018).

Molas são importantes componentes de um sistema de suspensão. As molas suportam o peso do veículo, mantém sua altura e absorvem os choques provenientes do

contato com pavimento (BARTON, 2018). Molas também são as ligações flexíveis entre o quadro e as rodas. Quando uma carga extra é adicionada nas molas ou quando o veículo encontra uma irregularidade no pavimento, a mola irá absorver esta carga ao se comprimir. Nas suspensões, as molas são responsáveis pelo conforto ao dirigir (RAMIREZ, 2015).

A característica mais importante de uma mola é sua constante elástica ( $k$ ). A constante é uma medida de sua rigidez e é determinada pela medição da força extra necessária para comprimir ou estender a mola em uma pequena quantidade (FOALE, 2002). Pode ser dada em N/mm (kN/m fornece os mesmos valores numéricos) no sistema métrico e lbf/pol no sistema imperial. Por exemplo, uma mola que tenha uma constante de  $k=10$  N/mm precisará de uma força ( $F$ ) adicional de 100 N para comprimir mais 10 mm ( $x$ ).

Em alguns casos, a constante elástica não varia ao longo do intervalo útil de movimento da mola e é denominada linear. Entretanto, alguns tipos de mola exibem uma constante elástica diferente em várias partes da amplitude de movimento, isto é frequentemente conhecido como uma mola de taxa progressiva e na utilização da motocicleta esta progressão é geralmente positiva, logo a constante elástica é maior cada vez que é adicionada mais carga. As molas podem assumir muitas formas e ser feitas de muitos materiais diferentes, mas a faixa prática é mais limitada.

No estudo das molas, serão vistos alguns termos técnicos interessantes. O termo bounce se refere ao movimento vertical (para cima e para baixo) do sistema de suspensão. O movimento para cima do conjunto pneu e roda, que comprime a mola e absorve o choque é denominado jounce ou compressão. Já o movimento para baixo deste conjunto, que estica a mola e o amortecedor é denominado rebound ou extensão.

Quando a mola é comprimida, ela estoca energia. Quando descomprimida, ela libera energia de maneira descontrolada. A inércia da mola faz com que quando esteja em bounce ela se prolongue de forma exagerada. Então ela se re-comprime, mas novamente ela irá longe demais e passará do ponto de equilíbrio, conforme ilustra a Figura 2.4. A mola irá executar o bounce em sua frequência natural até que toda a energia originalmente fornecida à mola seja dispersa (MONROE, 2006).

Se o amortecedor estiver gasto ou danificado e o veículo encontra uma irregularidade no pavimento, o veículo irá efetuar o bounce na frequência da suspensão até que toda a energia recebida através da irregularidade se esgote. Isso pode fazer com que os pneus percam contato com o pavimento.

Amortecedores que estejam em boas condições irão permitir que a suspensão oscile em um ou dois ciclos reduzidos, limitando ou reduzindo os movimentos excessivos, e mantendo as cargas verticais sobre os pneus. Isso ajuda a manter os pneus em contato constante com o pavimento. Controlar os movimentos da mola e da suspensão enquanto o veículo estiver em movimento permite que o alinhamento dinâmico das rodas seja mantido.

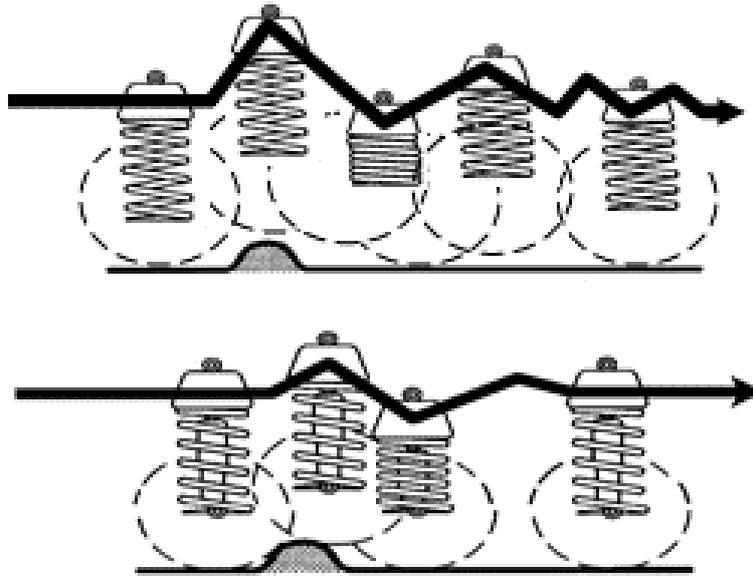


Figura 2.4 - Arranjo de molas helicoidais.  
Fonte: The Monroe Safety Triangle – 2005.

- a) Simples mola helicoidal ultrapassando um obstáculo no pavimento.
- b) Conjunto mola helicoidal e amortecedor ultrapassando um obstáculo no pavimento.

#### 2.2.1.1 - Molas helicoidais

Uma mola helicoidal é um comprimento de fio flexível enrolado em um formato de bobina. A forma de bobina permite que a mola se flexione em um caminho linear em torno de si.

O tipo de mola mais utilizado no motociclismo é a mola helicoidal, mostrada no centro da Figura 2.5. A mola helicoidal é um longo segmento cilíndrico de arame de aço enrolado de forma curva. Desta forma, ela não desenvolve atrito entre suas partes, visto

que não chegam a se tocar, proporcionando uma pilotagem mais macia. O diâmetro e comprimento do arame determinam a força da mola.

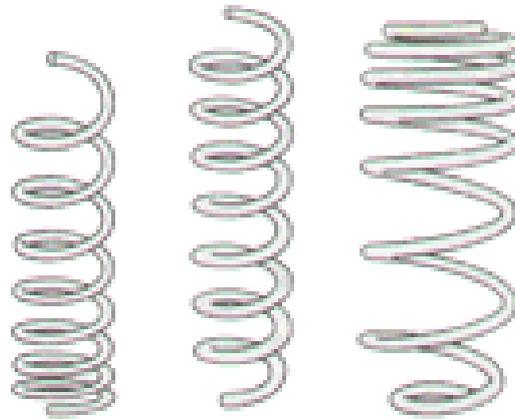


Figura 2.5 - Mola com diferentes formatos.  
Fonte: The Monroe Safety Triangle – 2005.

Aumentar o diâmetro do arame sem variar seu comprimento irá produzir uma mola mais forte, enquanto que aumentando seu comprimento sem variar seu diâmetro irá produzir uma mola mais flexível. Algumas molas helicoidais são fabricadas com uma constante variável.

A constante da mola helicoidal é determinada pelo material do fio (aço, titânio, fibra de carbono, etc.), espessura e o comprimento do fio. Portanto essa constante pode ser obtida tanto se construindo a mola com materiais com espessuras diferentes ou fazendo a mola com uma taxa progressivamente maior ou menor no instante em que o arame estiver sendo enrolado.

Taxas de compressão variável permitem uma baixa taxa de compressão quando em condições de pouco carregamento, permitindo uma dirigibilidade macia e progressiva e quando em condições de carregamento elevado resulta em mais apoio e controle.

Devido aos custos de fabricação, é comum ter molas de taxa dupla ou tripla feitas pelo empilhamento de duas ou três molas juntas, em vez de enrolar uma mola com passo variável ao longo de seu comprimento. Existem duas maneiras de produzir o resultado desejado: usando molas com a mesma constante, mas com espessuras diferentes ou usando molas com constante diferentes.

Molas helicoidais não necessitam de ajuste e na maioria das vezes são livres de manutenção. A falha mais comum é o decaimento das molas. Molas decaídas diminuem a altura do veículo e alteram seu alinhamento geométrico.

Esse defeito pode causar desgaste dos pneus, problemas de dirigibilidade, e desgaste de outros componentes da suspensão. Durante a manutenção da suspensão é muito importante medir a altura do veículo. As molas devem ser substituídas quando apresentarem medidas fora das especificações do fabricante.

### **2.2.2 - Os amortecedores**

A energia aparece de muitas formas como pressão, movimento e calor. Apesar da energia não poder ser eliminada, ela pode ser alterada de uma forma para outra. A força de uma irregularidade agindo sobre a suspensão transmite energia para a suspensão. Essa energia pode ser transformada em atrito por meio da restrição de fluxo de fluido. O atrito muda a energia cinética do movimento do choque para o calor. Este calor é disperso no fluido e é eventualmente liberado na atmosfera.

Portanto um amortecedor nada mais é do que um absorvedor de energia. O movimento do amortecedor causa uma resistência mecânica, porém, diferente de uma mola, ele não tem tendência natural para retornar à sua posição inicial e sendo assim consome trabalho ou energia, que é finalmente dissipada como calor. Esta perda de energia é necessária para evitar oscilações descontroladas na suspensão (FOALE, 2002).

Imagine que um grande solavanco tenha comprimido completamente um conjunto de suspensão; nesse instante, a energia é armazenada na mola como energia potencial. À medida que a mola retorna ao seu comprimento estático, se não houvesse amortecimento, seria transferida inteiramente para a massa da bicicleta na forma de energia cinética (energia do movimento). Isto faria com que a suspensão se estendesse bem além da sua posição normal.

Dessa maneira terá transferido a energia cinética de volta para a energia armazenada na mola, que então repetirá todo o processo novamente na direção oposta. Assim, depois de qualquer perturbação, prosseguiríamos pela estrada saltando indefinidamente.

Portanto o amortecedor absorve os esforços de compressão da suspensão e controla os efeitos de extensão da mola. Amortecedores são considerados para reduzir os níveis de vibração das estruturas sob excitação periódica ou estocástica (KARAYANNIS, 2008). Na compressão o amortecedor trabalha junto com a mola, auxiliando na força de reação. Na distensão do sistema o amortecedor exerce mais força para atenuar os esforços

de distensão da mola. O controle do amortecedor é exercido tanto na compressão como na distensão da mola. Por isso é chamado de dupla-ação (BERTOCCO, 2006).

Amortecedores regenerativos podem, ao contrário do amortecedor convencional que reduz a vibração através do amortecimento viscoso e converte a energia cinética em energia térmica dissipada, converter a energia cinética principalmente em energia elétrica. Esta energia elétrica colhida pode ser armazenada na bateria para uso posterior (ZHANG, 2018).

Na prática, os amortecedores são projetados para forçar o óleo através de pequenos orifícios. Sem características especiais de projeto, o amortecimento quadrático seria de longe a maior proporção presente em um amortecedor normal. A sensibilidade à temperatura é muito reduzida e é devida à mudança na densidade do fluido e não à viscosidade. No entanto, este tipo de amortecedor na forma não modificada pode produzir efeitos indesejáveis. Devido ao efeito "quadrado", as forças de amortecimento aumentam muito rapidamente com a velocidade de amortecimento e dão pouca resistência a baixa velocidade.

Isso significa que, em baixas velocidades, o amortecimento pode ser inadequado em relação a pequenos solavancos, mas excessivamente excessivo em perturbações maiores em alta velocidade. Para fazer um amortecedor satisfatório, os fabricantes devem modificar essas ideias básica.

Para reduzir a força de alta velocidade em excesso, os orifícios precisam ser aumentados e então controlados por uma válvula de controle de vazão ou fluxo que abre somente em alta velocidade. Esta válvula impede que o amortecimento da faixa intermediária seja reduzido demais pelos orifícios ampliados, mas provavelmente elevará a velocidade baixa em excesso. Isso pode ser superado pela introdução de orifícios de purga paralelos não controlados pela válvula de controle de fluxo. Ao manipular essas técnicas, o fabricante pode ajustar o amortecimento.

A experiência direta com uma amostragem de amplo espectro de motocicletas demonstrou que esses veículos de pista única são, como sugerem as considerações teóricas, extremamente sensíveis às características de amortecimento da suspensão (JENNINGS, 2018).

Os principais componentes do amortecedor são mostrados na Figura 2.6:

- Corpo - fornece uma câmara para abrigar os componentes de amortecimento e o fluido hidráulico;

- Fluido hidráulico – cria resistência quando ciclado através dos orifícios do pistão e ajuda a dissipar calor produzido pela fricção;
- Pistão – O fluido é forçado a passar pelos orifícios do pistão a medida que ele se move para frente e para trás dentro da câmara de amortecimento;
- Retentor – responsável pela vedação dos fluidos dentro do amortecedor e ao mesmo tempo permitir a movimentação da haste
- Haste ou cilindro – conecta os componentes internos do amortecedor a moto.

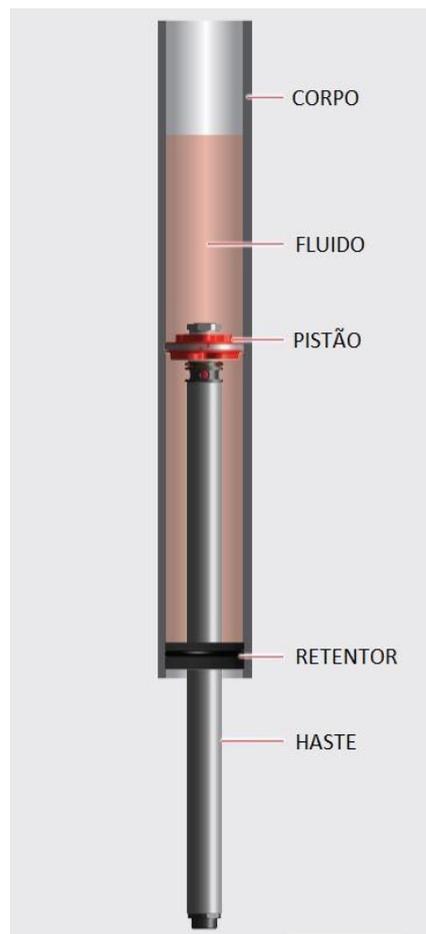


Figura 2.6 - Componentes do amortecedor.

Fonte: Adaptado de Rock Shox Suspension Theory Guide – 2014.

Fluidos não são compressíveis. À medida que o óleo é pressurizado, ele flui ou transmite a pressão para os outros componentes dentro do sistema. O óleo fluirá a uma certa taxa, que depende da pressão que estiver atuando sobre ele, do tamanho dos orifícios pela qual o óleo é forçado a fluir e da sua viscosidade.

Ao acionar um amortecedor e mover o pistão através de uma coluna de óleo, a pressão do óleo é aumentada em um dos lados do pistão. Os orifícios criam caminhos para o óleo pressurizado fluir para o outro lado do pistão, onde a pressão do óleo é menor.

À medida que o óleo passa por essas portas, o atrito é gerado. A fricção é o que converte a energia que está sendo transmitida através da suspensão em calor, amortecendo efetivamente o movimento da suspensão.

Com uma viscosidade e pressão constante do óleo, o tamanho dos orifícios, sejam fixos ou variáveis, irão governar a vazão.

Para determinar o tamanho do orifício:

- Fabricar orifício para uma determinada dimensão.
- Ajuste a quantidade de material que bloqueia o orifício, efetivamente alterando o tamanho do orifício.
- Empilhe os calços suspensos sobre o orifício. A uma certa pressão, os calços dão lugar ao fluxo de óleo. Várias combinações de calços podem ajustar o fluxo de óleo. Uma válvula suspensa pode ser usada no lugar de, ou em conjunto com calços (ROCKSHOX, 2014).

Verificação da Válvula: na maioria dos sistemas de amortecimento, é importante separar os caminhos de fluxo de retorno e de compressão para que o ajuste de um circuito não afete o desempenho do outro.

Para controlar o fluxo de óleo direcionalmente, uma válvula de retenção pode ser introduzida no sistema. O propósito de uma válvula de retenção é permitir que o óleo flua através de um pistão em uma direção enquanto limita ou elimina o fluxo de óleo através dos mesmos orifícios. Isto é conseguido através da fabricação de um pistão com um design de orifício específico do fluxo.

À medida que o óleo flui pelo pistão, a válvula de retenção se abre e permite que o fluxo de óleo passe apenas pelas portas que a válvula regula. Após o retorno do fluxo de óleo, essa válvula fechará e forçará o óleo a fluir através de qualquer outro orifício disponível. Uma válvula de retenção pode ser construída usando calços ou uma válvula suspensa.

Por segurança, uma válvula de alívio abre a partir de uma queda de pressão limiar e impede que o valor da força do amortecedor fique muito alto (DUYM, 2007).

A Figura 2.7 demonstra as 3 posições de trabalho das válvulas do amortecedor: a) Repouso, b) Compressão e c) Tração. As setas azuis e vermelhas indicam o fluxo de fluido hidráulico.

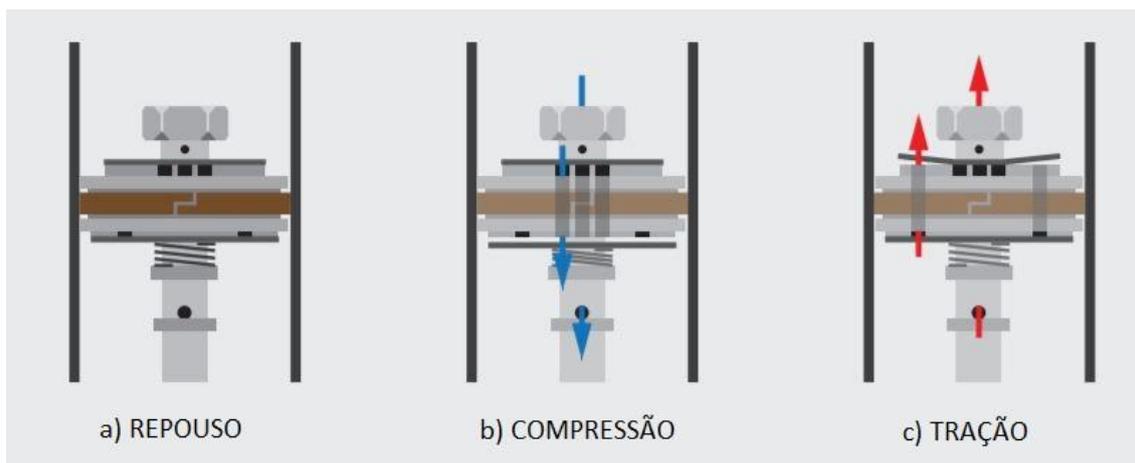


Figura 2.7 - Ações da válvula.

Fonte: Adaptado de Rock Shox Suspension Theory Guide – 2014.

a) Posição estática da válvula;

b) O óleo pressurizado (azul) flui através da haste do amortecedor e do pistão, forçando a válvula de retenção de compressão a abrir. O calço de válvula de tração permanece fechado;

c) O óleo pressurizado (vermelho) flui através da haste do amortecedor e do pistão, forçando a válvula de retenção de tração a abrir. O calço de válvula de compressão permanece fechado.

#### 2.2.2.1 - Amortecedores ativos

Suspensão ativa é um tipo de suspensão que controla o movimento vertical das rodas em relação ao chassi ou corpo do veículo com um sistema embarcado, em vez de suspensão passiva, onde o movimento é determinado inteiramente pela superfície da estrada (TAO, 2005).

As suspensões ativas podem ser geralmente divididas em duas classes: suspensões ativas puras e suspensões adaptativas / semi-ativas.

Embora as suspensões adaptáveis variem apenas a firmeza do amortecedor para corresponder à mudança de estrada ou às condições dinâmicas, as suspensões ativas usam algum tipo de atuador para elevar e abaixar o chassi de forma independente em cada roda.

A suspensão do tipo ativa implica na utilização de técnicas de controle para poder determinar quanta energia externa deve ser aplicada ao sistema. A utilização de técnicas de controle permite também regular fatores como o tempo de resposta do sistema e a

amplitude das vibrações que são absorvidas pela carroceria do veículo. Ambos fatores que não são possíveis de serem controlados com suspensões tradicionais (SOUZA, 2017).

Essas tecnologias permitem que os fabricantes alcancem um maior grau de conforto e dirigibilidade, mantendo os pneus perpendiculares à estrada nas curvas, permitindo melhor tração e controle (ELS *et al.*, 1999). Um computador de bordo detecta o movimento do corpo de sensores em todo o veículo e controla a ação das suspensões ativa e semi-ativa. O sistema praticamente elimina a variação do balanço e inclinação do corpo em muitas situações de direção, como curva, aceleração e frenagem.

#### 2.2.2.2 - Amortecedores semi-ativos

Geram uma força passiva modulada continuamente segundo uma lei de controle com uma pequena quantidade de quantidade de energia externa (MOURA, 2005).

O amortecedor semi-ativo se comporta como um controlador ativo quando a ação de controle requer uma dissipação de energia (KARNOPP, 1990). Caso a ação de controle não necessite de um fornecimento de energia, o controlador cancela o fornecimento da força.

Amortecedores semi-ativos na forma de amortecedores hidráulicos de modulação rápida têm sido usados, por exemplo, em suspensões de automóveis para alcançar alguns dos benefícios de sistemas de servo-mecanismos totalmente ativos, mas com custo e complexidade muito reduzidos. Utilizados em suspensões de competição e de alta cilindrada.

Os parâmetros da suspensão hidropneumática passiva convencional não podem ser ajustados de acordo com a entrada da superfície externa da estrada, portanto a mola hidropneumática não pode estar nas melhores condições de trabalho. O método de controle semi-ativo é usado para melhorar o desempenho da suspensão hidropneumática passiva, que é muito necessária para melhorar o conforto de condução de todo o veículo (YUE, 2017).

#### 2.2.2.3 - Amortecedores passivos

Neste tipo específico de amortecedores as respostas do sistema são obtidas por meio de parâmetros invariáveis e coeficientes pré-determinados e fixos (KARNOPP, 1990). Não existe nenhuma alteração desses parâmetros e eles não variam com as

condições do pavimento ou com as mudanças de carregamento que o amortecedor venha a sofrer.

Comumente são utilizados em motocicletas, pois possuem boa relação custo-benefício e são de simples fabricação.

### **2.2.3 - As massas suspensas e massas não suspensas**

Massa suspensa é aquela suportada pelas molas. Carenagens, chassi e motor podem ser considerados massa suspensa. Massa não-suspensa é aquela que não é carregada pelas molas, tal como pneus, rodas e sistema de freios. Para uma motocicleta, a massa suspensa é essencialmente toda a massa da bicicleta menos rodas, freios e parte dos componentes da suspensão.

Reduzir a massa suspensa permite menos impacto com o pavimento. Uma elevada quantidade de massa suspensa juntamente com uma baixa quantidade de massa não suspensa permite maior dirigibilidade e maior tração dos pneus. Existem quatro desenhos principais de mola usados atualmente: mola helicoidal, de lâminas, barra de torção e bolsa de ar. Nesta dissertação serão analisadas principalmente as molas helicoidais, comumente utilizadas em motocicletas.

Para um sistema simples de molas em massa, a massa dinâmica equivalente de uma mola de passo constante é  $1/3$  da massa da mola, não a  $1/2$  que é frequentemente citada. Se consideradas duas massas iguais oscilando no espaço livre com uma mola entre elas, a simetria simples ditará que a massa de molas equivalente a ser adicionada a cada massa será de  $1/3$  de  $1/2$  ou  $1/6$  da mola. Um sistema de suspensão do veículo não é um desses dois extremos e, portanto, na maioria dos casos, a massa equivalente da mola para adicionar às massas não suspensas estará em algum lugar entre  $1/6$  e  $1/3$  da massa total da mola. Molas progressivas ou com múltiplas taxas acrescentam outra questão complicada a esses cálculos, mas as massas não suspensas das nascentes não são uma proporção importante do total (FOALE, 2002).

Como é possível atribuir porções apropriadas da massa suspensa total a cada extremidade? Isso geralmente é feito simplesmente distribuindo a massa na mesma proporção que a distribuição estática de peso anterior e posterior e, dessa forma, certamente tem seus usos.

No entanto, não é difícil perceber que também tem suas deficiências. Considere por exemplo o caso ao fazer um *wheelie*. Não existe nenhuma suspensão dianteira ativa

neste momento e, portanto, a parte traseira deve suportar o peso total, portanto a massa suspensa traseira relevante deve ser a massa suspensa total, mas, além disso, o que normalmente é considerado a massa dianteira não suspensa também deve ser incluído.

De um modo geral, quando olhamos para o desempenho da suspensão, é a relação entre a massa suspensa e não suspensa que nos interessa.

O trabalho do amortecedor no ciclo de oscilação é caracterizado pela presença de duas áreas nas quais sua ação visa aumentar a velocidade e a amplitude de deslocamento da massa suspensa. Essas áreas são caracterizadas pela coincidência da direção da ação da força do amortecedor para a massa suspensa com a direção do movimento da massa.

Isso é possível quando a direção do movimento da massa suspensa e a direção da base perturbadora são as mesmas, mas a velocidade da base perturbadora é maior que o valor absoluto da velocidade da massa suspensa. O início de cada área corresponde a um momento de mudar a direção do movimento de massa e o final corresponde a um momento de mudar a direção da deformação da suspensão (RYABOVA, 2016).

#### **2.2.4 - Características do pneu**

Em uma visão ampla, pneus podem ser vistos como molas: comportam-se como molas de ar que suportam o peso total do veículo. A ação de mola de ar do pneu é muito importante para a qualidade de direção e segurança na dirigibilidade do veículo. Os pneus são os principais componentes responsáveis pelo controle da direção de qualquer veículo.

Dimensões do pneu, construção, compostos e calibragem dos pneus são muito importantes para a qualidade de dirigibilidade do veículo. Mais adiante, na etapa de modelamento, será visto como acrescentar estes efeitos de amortecimento dos pneus ao modelo da suspensão dianteira proposto nesta dissertação.

### **2.3 - CLASSIFICAÇÃO DAS SUSPENSÕES**

O sistema de suspensão tem diversas funções que fazem com que uma motocicleta moderna seja muito mais segura de pilotar do que as motocicletas do passado, especialmente considerando as velocidades que as motocicletas modernas são capazes de alcançar. O conforto de condução e a estabilidade do veículo dependem fortemente do comportamento da suspensão. É necessário um bom isolamento de vibração para garantir

o conforto dos ocupantes, ao passo que uma boa aderência à estrada é importante para o manejo do veículo, o que em geral aumenta a segurança (LIGUORI, 2013).

A suspensão aumenta principalmente o conforto da pilotagem de quem dirige, evitando que as perturbações da pista sejam transmitidas para o piloto. Não é difícil de perceber essa funcionalidade, basta se imaginar dirigindo uma moto sem suspensão em uma estrada esburacada à velocidade de 100 km/h. Além da dirigibilidade totalmente comprometida, haveria um grande desconforto físico para o piloto.

Além desta função básica, no entanto, o trabalho da suspensão é manter os pneus em contato com a pista apesar de perturbações de todos os tipos: elevações e ondulações ou violentas depressões. O sistema deve manter os pneus em contatos com o pavimento e fornecer tração a todo instante, seja em altas velocidades, seja nos ângulos mais agudos de inclinação da motocicleta, quando se efetua uma curva fechada.

O maior efeito da suspensão é a poder tornar uma curva mais rápida de ser feita e permitir que esta curva seja feita de maneira mais segura.

É interessante notar que, em condições ideais, o limite de velocidade de uma curva será determinado pela aderência dos pneus e ângulo de inclinação da motocicleta, e não pela performance da suspensão.

Em geral, um sistema vibratório inclui um meio para armazenar energia potencial (mola ou elasticidade), um meio para armazenar energia cinética (massa ou inércia) e um meio de perda gradual de energia (amortecedor). A vibração de um sistema envolve a transferência alternada de sua energia potencial para energia cinética, e de energia cinética para energia potencial (RAO, 2008).

Em sistemas de suspensão, existem algumas diferenças do que funciona em uma rodovia e do que funciona para uma pilotagem de alto desempenho. Em um trajeto longo e em linha reta, uma suspensão relativamente macia e flexível absorve os impactos e faz uma motocicleta confortável de dirigir por muitos quilômetros. Ao tentar fazer uma curva fechada com esta moto o piloto verá estas molas macias e suspensão flexível o levarem ao chão sem piedade.

Por outro lado, se ao invés disso o piloto tentar usar uma suspensão “amarrada” de uma moto superesportiva para dirigir com ela durante várias horas seguidas, o motociclista irá implorar por conforto ao final da empreitada.

Logicamente, existem motocicletas desenvolvidas para trabalhar no limite entre as duas funções (conforto em grandes trajetos versus capacidade de fazer manobras e curvas fechadas com controle total), as quais são melhores que uma superesportiva em

relação ao conforto e melhores que as Touring: Motocicleta com posição de pilotagem confortável, compartimento de bagagem e suspensão configurada para proporcionar conforto em longas viagens) em relação à capacidade de manobras agressivas, porém ao final das contas, percebe-se que se tem nas mãos uma moto não especializada em nenhuma das duas áreas.

São motocicletas, conhecidas como standard ou Street Bikes: Tipo de motocicleta com ênfase no desempenho, funcionalidade e ergonomia. Suspensão configurada para vários tipos de carregamento. As quais não devem ser criticadas por essa indefinição, visto que foram projetadas para tal fim. Estas motocicletas possuem uma habilidade de cumprir cada função em um nível aceitável, porém sem nunca conseguir competir com uma motocicleta especializada em uma função específica.

Sistemas ajustáveis de suspensão encontrados em algumas dessas motocicletas permitem ao motociclista modificar a suspensão de acordo com seu estilo de pilotagem, encontrando uma maneira muito mais ampla e eficiente de trabalhar, coisa impossível de se fazer em motocicletas com suspensão do tipo não-ajustável. A mola e o amortecedor, cujos conceitos básicos foram revistos, são os componentes básicos da suspensão.

### **2.3.1 - Subdivisão dos sistemas de suspensão**

Os sistemas de suspensão podem ser classificados de acordo com seus tipos de resposta às solicitações. Apresentam-se agora algumas definições utilizadas na área de modelagem e análise de suspensões (MOURA, 2005). Este tema foi aprofundado na seção anterior. Basicamente os sistemas de suspensão se dividem em ativos e passivos:

#### **2.3.1.1 - Sistemas passivos**

Contém somente molas e amortecedores com parâmetros fixos, isto é, após a regulagem e fixação, apresentam parâmetros de rigidez e amortecimento constantes.

#### **2.3.1.2 - Sistemas ativos**

Podem ser definidos como atuadores que produzem força segundo uma lei de controle que pode conter informações de qualquer parte do sistema. A sua determinação

é feita de maneira a minimizar uma função de otimização que representa o comportamento desejado do sistema.

### **2.3.2 - Suspensão nas motocicletas**

No início do motociclismo, no começo do século vinte, motocicletas eram constituídas basicamente um chassi rígido com um motor de combustão interna. Suspensão não era nada mais do que o ar nos pneus e molas sob o assento (COX, 2018). Outros sistemas tais como freios, sistema de ignição, sistemas de lubrificação também eram rudimentares. Os avanços tecnológicos e metalúrgicos possibilitaram suporte a novas ideias e inovações em metal, borracha e plástico para serem incorporados à motocicleta. O design que é o planejamento ou desenho de um produto antes dele ser construído ou fabricado, evoluiu numa velocidade impressionante: comandos de válvula, câmaras de combustão de quatro válvulas por cilindro e muitas outras inovações tiveram origem nos primeiros projetos de motocicleta (SZÁNTÓ, 2019).

Suspensões foram incorporadas aos projetos tão logo foram sendo desenvolvidas pelos mecânicos e engenheiros. Entre os anos 20 e 40 suspensões traseiras e dianteiras variadas foram desenvolvidas. Somente nos anos 50 e início dos anos 60 que a suspensão por garfo telescópico e a dupla suspensão traseira em balanço viraram um padrão para as motocicletas. Porém a suspensão traseira monoamortecida, ou seja, suspensão composta de um garfo sustentado por uma única mola em conjunto com alguns sistemas simples de encaixe, de maneira a formar um link que permite boa taxa de amortecimento seja qual for o curso de amortecimento necessário, conhecida atualmente como suspensão traseira “macia” manteve-se na mente dos projetistas por muitos anos, sendo usada como solução de amortecimento.

As motos off-road e de corrida requerem uma configuração particular das suspensões para melhorar o conforto e a segurança do piloto, mantendo um contato contínuo entre a estrada e a moto (por meio dos pneus). Além disso, por causa da rugosidade do solo, no caso de motocicletas off-road, as suspensões geralmente experimentam excursões extremas e erráticas (curso da suspensão) no desempenho de sua função (SPANOS, 2011).

#### **2.3.2.1 - Suspensão dianteira da motocicleta**

Em quase todas as motocicletas modernas, a suspensão dianteira usa garfos hidráulicos, um sistema deslizante. O sistema de suspensão dianteira mais comum são os garfos telescópicos que usam uma combinação de tubos deslizantes, molas internas e amortecimento hidráulico para proporcionar uma rodagem suave (LEAR, 1977). Historicamente, tem havido muitos outros sistemas de suspensão dianteira de motocicleta, com possíveis vantagens, incluindo ligação dianteira, ligação traseira e garfos de viga (DIXON, 2008). No projeto geral da máquina, a escolha do garfo deslizante se dá por sua menor fricção e pelo estilo minimalista. Uma desvantagem do garfo deslizante é que ele sofre um mergulho severo na frenagem, um problema que pode ser superado por outros sistemas. Será demonstrada nesta dissertação o impacto deste aspecto.

Os sistemas de suspensão dianteira telescópica são compostos de um par de cilindros internos e externos do garfo que articulam telescopicamente. Dentro de um conjunto de cilindros de cada lado existe uma mola e um sistema de amortecimento de óleo. Alguns sistemas utilizam um amortecedor de cartucho dentro dos cilindros externo dos amortecedores (BERTOCCO, 2006).

Basicamente, o óleo controla a tendência natural da mola a continuar o seu movimento de repercussão com intensidade decrescente em ambos os sentidos depois de ser acionado pelas forças externas. Forçando o óleo a circular em cada amortecedor através de uma série de pequenos orifícios, separa de fato a combinação motociclista / motocicleta das características indesejáveis da mola e das variações de altura na superfície do trajeto. A suspensão conecta as rodas da motocicleta ou veículo ao chassi, a mola absorve o choque e o amortecedor hidráulico reduz o efeito de oscilação das molas.

Vários parâmetros geométricos também influem sobremaneira no estudo realizado nesta dissertação: o ângulo de cáster e trail, por exemplo. O ângulo de cáster é o ângulo entre o eixo vertical e o eixo de rotação da seção frontal. O ângulo de trail é a distância entre o ponto de contato da roda dianteira e o ponto de interseção do eixo da cabeça da direção com a estrada medida no plano do pavimento.

Juntos, esses parâmetros são importantes na definição da capacidade de manobra da motocicleta percebida pelo motociclista (COSSALTER, 2006). Não é prático, no entanto, examinar os efeitos produzidos por apenas um parâmetro geométrico, independentemente dos demais, devido à forte interação entre eles.

#### 2.3.2.2 - Modificações nas suspensões dianteiras

Como mencionado anteriormente, a maioria das motocicletas é comprometida com suas aplicações e com o uso para o qual foram projetadas. A suspensão dianteira de uma moderna motocicleta esportiva, com ajuste de amortecimento e taxa de retorno, bem como com simples pré-carregamentos de mola de modo a variar a taxa de amortecimento da mola.

Entre os engenheiros de desenvolvimento de motocicletas, é sabido que modificações no sistema de suspensão podem causar grandes mudanças no comportamento da direção, e o desenvolvimento bem-sucedido é dificultado pelo fato de o manuseio ser frequentemente uma função significativa do peso e do físico do motociclista (SHARP, 2007).

O fator mais facilmente modificável é a taxa de compressão da mola. A maioria das motos tem uma configuração mais macia quando em competições, diferentemente das motos que vão para as ruas. O peso do piloto também pode apresentar variações. Uma mola helicoidal progressiva com uma tensão adequada combate o afundamento do garfo dianteiro e fornece melhor controle nas retomadas e acelerações, quando o peso é transferido para a roda traseira.

Em substituição aos sistemas com mola foram tentados vários arranjos. Nos anos 70, sistemas de suspensão dianteira a ar foram experimentados, e existem suspensões dianteiras com reservatórios com válvulas de ar, manômetros e tudo o mais necessário para injetar ar no topo do amortecedor. Em teoria, o ar seria uma perfeita mola progressiva. A pressão de ar variaria à medida que variassem os carregamentos, aumentando a taxa de compressão em uma perfeita sincronia. Infelizmente, na prática, não foram criadas suspensões a ar que funcionassem a contento. Para começar, as vedações não suportam muita pressão de ar.

Ar para aumentar uma mola com taxa de compressão muito baixa pode funcionar em algumas situações, mas usar o ar como única mola é impraticável. Como a temperatura do ar vai aumentando à medida que ele vai sofrendo mais e mais solicitações, em um uso pesado, sua pressão vai gradativamente aumentando o que faz com que a suspensão dianteira fique cada vez mais rígida e difícil de controlar. Por esses e por outros motivos o ar nunca vai ser um substituto definitivo para a mola.

Para se fazer o ajuste de uma suspensão deve-se seguir alguns passos simples. Inicialmente se configura uma taxa de compressão da mola de acordo com as aplicações e solicitações programadas de uso. Uma vez ajustada a taxa de compressão da mola, a taxa de amortecimento deve ser configurada em seguida.

A taxa de amortecimento controla tanto a compressão quanto a distensão da mola. É necessário para manter o controle da moto no instante que passa por uma irregularidade no pavimento. Sem ele, o conjunto roda facilmente perderia contato com o pavimento. Como foi visto, isso conduz a uma dirigibilidade deficiente, para dizer o mínimo. Nos tipos ajustáveis, as taxas de extensão podem variar independentemente, contribuindo para otimizar a performance.

A maneira mais simples de se alterar para mais ou para menos a taxa de compressão é alterando a viscosidade do óleo. Óleos de alta performance são fornecidos nas mais diversas variedades de viscosidade. Estes óleos também contêm aditivos especiais, tais como elementos protetores que aumentam a vida útil das vedações, misturas anti-espuma, etc. Podem custar um pouco mais, porém são a única maneira de controlar a ação da suspensão sem maquinários, como compressores, para fazer a recalibragem dos amortecedores.

#### 2.4 - TRANSFERÊNCIA DINÂMICA DE CARGA

Desconsiderando outras forças resistivas ao movimento do veículo, tais como força aerodinâmica e a força de rolamento na frenagem de um veículo, a força que atua no centro de gravidade (CG) causa um fenômeno denominado transferência dinâmica de carga. (KAWAGUCHI, 2005). O efeito de transferência dinâmica de carga provoca alterações nas forças normais de reação pneu-pavimento, que por consequência influenciam diretamente na máxima força de frenagem a ser aplicada em cada eixo. A Figura 2.8 demonstra a direção e sentido das forças normais com a motocicleta na condição estática. A Figura 2.9 demonstra o comportamento da motocicleta no momento da transferência dinâmica de carga.

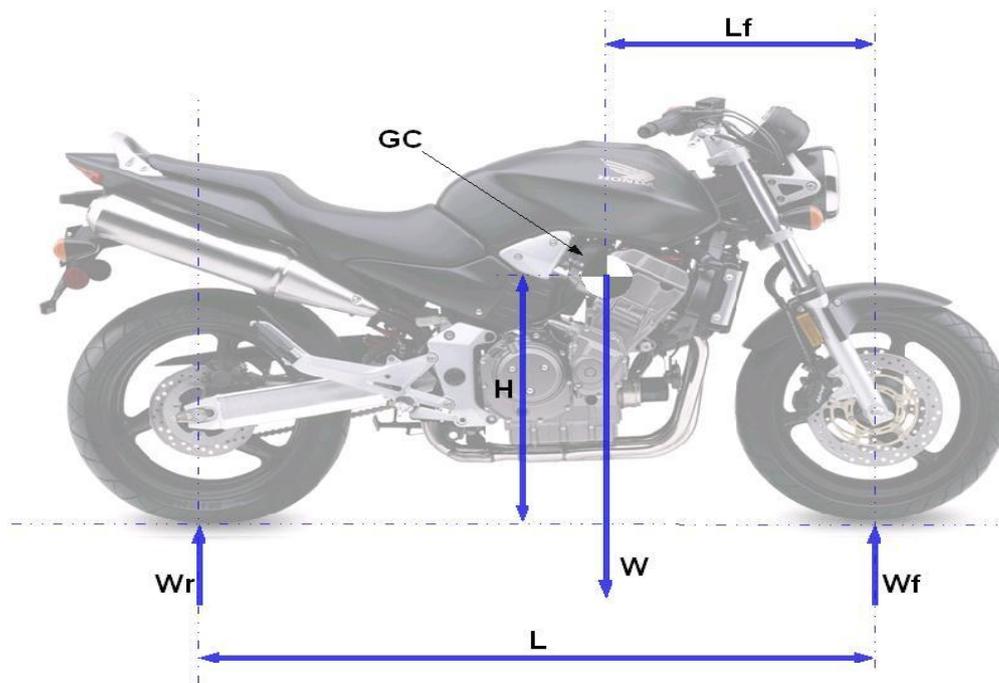


Figura 2.8 - Motocicleta na condição estática.  
 Fonte: Adaptado de KAWAGUCHI (2005).

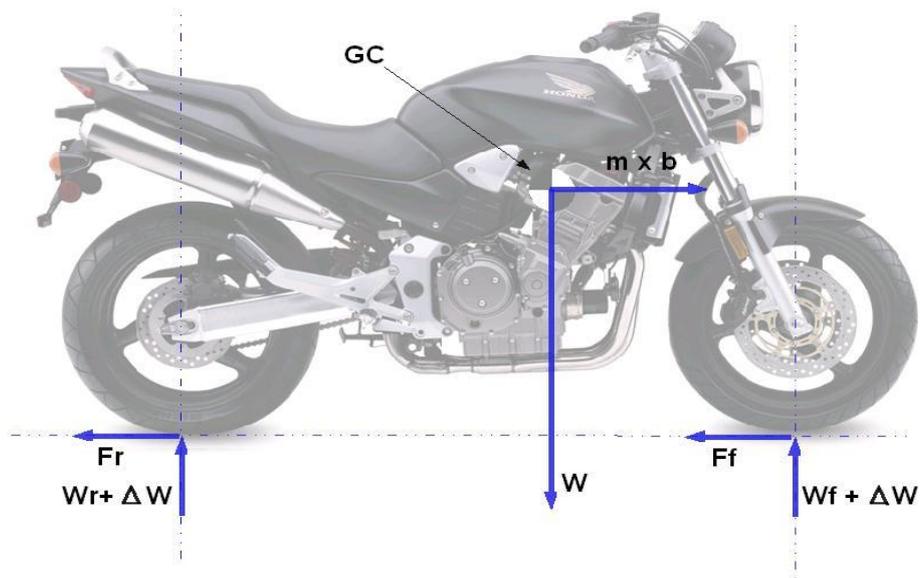


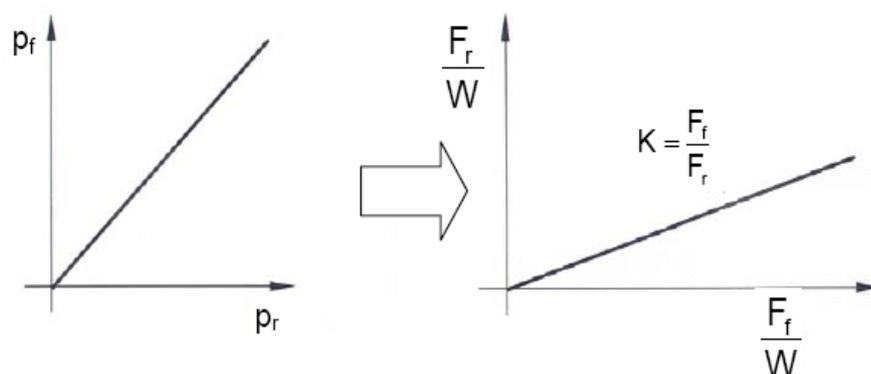
Figura 2.9 - Motocicleta na condição de frenagem.  
 Fonte: Adaptado de KAWAGUCHI (2005).

Neste comportamento dinâmico do veículo durante a frenagem, em que as forças aplicadas pelo sistema de freio são maiores que as forças máximas de frenagem possível pela condição de aderência pneu-pavimento, pode então ocorrer uma condição de travamento de eixo traseiro e de sobrecarga da suspensão dianteira. O travamento do eixo traseiro é uma condição instável da dinâmica veicular, bem como o sobre carregamento da suspensão dianteira. Como dito anteriormente, o sistema desenvolvido nesta

dissertação permite analisar, por meio das técnicas de simulação computacional, o comportamento da suspensão dianteira da motocicleta quando ela estiver sob a influência deste efeito dinâmico.

Todo motociclista sério sabe que o uso correto dos freios é um componente vital para uma condução competente e segura. Em particular, o uso excessivo do freio traseiro nunca deve ser feito durante a frenagem em velocidade, especialmente se uma frenagem pesada for necessária em uma situação de emergência. É ainda mais provável que esse erro termine em acidente se alguém fizer uso excessivo do freio traseiro ao inclinar em uma curva (LIMEBEER, 2001).

A Figura 2.10 mostra o gráfico do comportamento das forças de frenagem dianteira e traseira do veículo para cada condição pneu-pavimento. A reta resultante representa as forças máximas de frenagem dianteira e traseira para cada condição de aderência entre pneu-pavimento. Nesta condição ocorre o travamento do eixo dianteiro e traseiro simultaneamente, e esta é denominada curva de distribuição ótima de frenagem.



$p_f$  : Pressão do sistema de freio, eixo dianteiro;  $p_r$  : Pressão do sistema de freio, eixo traseiro;

$F_f$  : Força de frenagem, eixo dianteiro;  $F_r$  : Força de frenagem, eixo traseiro;

$W$  : peso do veículo;  $K$  : relação de freio instalado

Figura 2.10 - Forças aplicadas e resultantes de frenagem.

Fonte: Adaptado de KAWAGUCHI (2005).

Sendo assim, o projeto de um sistema de freio de um veículo deve ter como objetivo desempenhar forças de frenagem o mais próximo possível da distribuição ótima de frenagem, de modo a utilizar a máxima eficiência disponível que os freios de roda permitem.

Entretanto, numa instalação normal contendo somente o conjunto servo-freio / cilindro mestre e os freios de roda dianteiro (freio a disco) e traseiro (freio a disco ou a

tambor) não seria possível obter tal condição para todas as condições de pista, uma vez que a relação de frenagem instalada seria uma constante.

## 2.5 - DINÂMICA DA FRENAGEM

A Figura 2.11 mostra a representação de coordenadas padronizadas pela SAE (Society of Automotive Engineers), considerando o modelo de veículo onde sua massa esteja concentrada no seu centro de gravidade (GILLESPIE, 1992).

Durante a frenagem de um veículo, além da força gerada pelo sistema de freio através do acionamento do manete de freio afetar a velocidade da motocicleta, outras forças resistivas ao movimento contribuem também com sua parcela, tais como:

- Resistência aerodinâmica;
- Resistência ao rolamento, que decorre da rugosidade do pavimento;
- Resistência ao aclone, que decorre da ação da gravidade sobre o veículo ao se deslocar em pavimentos inclinados;
- Resistência de inércia das partes rotativas do veículo;

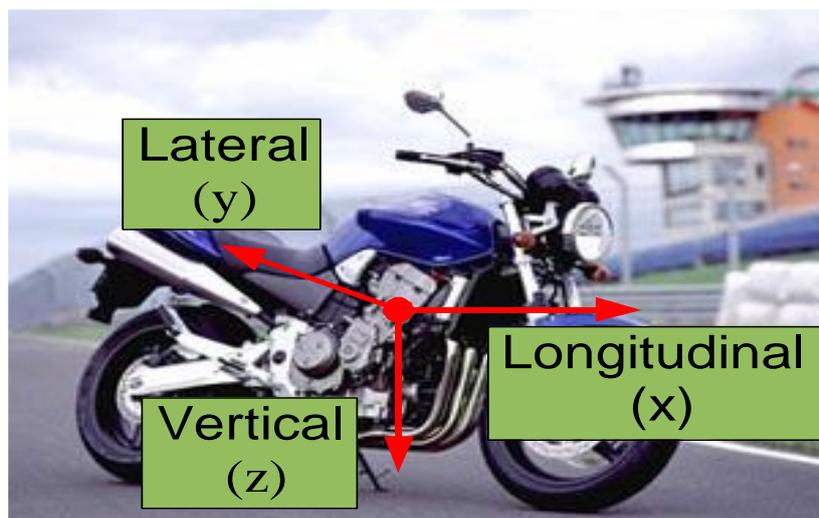


Figura 2.11 - Representação de coordenadas padronizadas pela SAE.

### 2.5.1 - Atrito superficial e rugosidade

O atrito superficial é um dos principais componentes que condicionam o deslocamento veicular sobre os pavimentos, podendo ser considerado como um fator primário que determina a velocidade, além de auxiliar no processo de condução dos veículos (COSTA, 2017). Os principais parâmetros avaliados para a caracterização da

condição superficial de pavimentos abordados na literatura são macro e microtexturas. A combinação de ambos os fatores, que são independentes entre si, condiciona a aderência pneu/pavimento. A macrotextura é explicada como as variações superficiais da mistura asfáltica. Já a microtextura é caracterizada pela rugosidade apresentada na superfície dos agregados que compõem a mistura asfáltica.

### 2.5.2 - Forças atuantes na frenagem da motocicleta

Todas as forças que se opõem ao movimento do veículo, descritas anteriormente podem ser denominadas comumente de forças de frenagem ( $F_1$  e  $F_2$ ), apesar de que as forças resistivas ao movimento não decorrentes da aplicação do freio da motocicleta representam, em termos práticos, 1% da carga estática do eixo, caso este não proporcione a tração do veículo, e 1,5% da carga estática do eixo, caso este proporcione a tração do veículo (ABNT NBR 14353, 1999). Desta forma seria razoável se considerar que a força de frenagem é praticamente oriunda da força aplicada pelo sistema de freio (KAWAGUCHI, 2005).

As forças normais dinâmicas ( $W_{bf}$ = Peso dinâmico sobre o eixo dianteiro) e ( $W_{bt}$ = Peso dinâmico sobre o eixo traseiro) devido ao efeito denominado “transferência dinâmica de carga” que é diretamente dependente da desaceleração do veículo ( $b$ ) e da altura do centro de gravidade em relação ao pavimento ( $H$ ). Assim, para uma condição estática, tem-se que:

$$\sum M_{1_{ESTÁTICO}} = 0$$

$$W_t = W \cdot \frac{L_f}{L} \quad (2.1)$$

$$\sum F_{z_{ESTÁTICO}} = 0$$

$$W_f = W \left( 1 - \frac{L_f}{L} \right) \quad (2.2)$$

Numa condição dinâmica devido à frenagem do veículo, surge a inércia  $R_i$  decorrente da desaceleração do veículo (MEIJAARD, 2007). Pode-se observar a direção e sentido de  $R_i$ , bem como as demais forças atuantes na frenagem, ilustradas na Figura 2.12. Considerando-se a inércia  $R_i$ , chega-se a:

$$\sum M_{1DINÂMICO} = 0$$

$$W_{br} = W_r - \frac{mbH}{L} \quad (2.3)$$

$$\sum F_{zDINÂMICO} = 0$$

$$W_{bf} = W_f + \frac{mbH}{L} \quad (2.4)$$

O coeficiente de aderência é definido como sendo o quociente de força de frenagem máxima sem travamento das rodas e a carga dinâmica correspondente ao eixo que está sendo freado (NBR 14353, 1999). Define-se o coeficiente de adesão como:

$$\mu_{HF_i} = \frac{F_{x_i}}{W_{b_i}} \quad (2.5)$$

Sendo que:

$F_{x_i}$  = força de frenagem atuante no pneu;  
 $W_{b_i}$  = força dinâmica normal aplicada ao eixo;  
*i* = designação do eixo.

Logo, para uma condição ótima de frenagem deve-se ter:

$$F_1 + F_2 \approx F_f + F_r = \mu_{HF_f} \cdot W_{bf} + \mu_{HF_r} \cdot W_{br} = m \cdot b \quad (2.6)$$

Levando em consideração que a maioria das motocicletas normalmente utiliza pneus com as mesmas especificações tanto no eixo dianteiro quanto no eixo traseiro, pode-se considerar que:

$$\mu_{HF_f} = \mu_{HF_r} = \mu_{HF}$$

Substituindo na Equação anterior obtêm-se:

$$m \cdot b = \mu_{HF} \cdot W_{bf} + \mu_{HF} \cdot W_{br}$$

Sendo  $W_{br} = m \cdot g$  temos que:

$$\mu_{HF} \cdot W = \mu_{HF} \cdot m \cdot g$$

$$\mu_{HF} = \frac{b}{g}$$

(2.7)

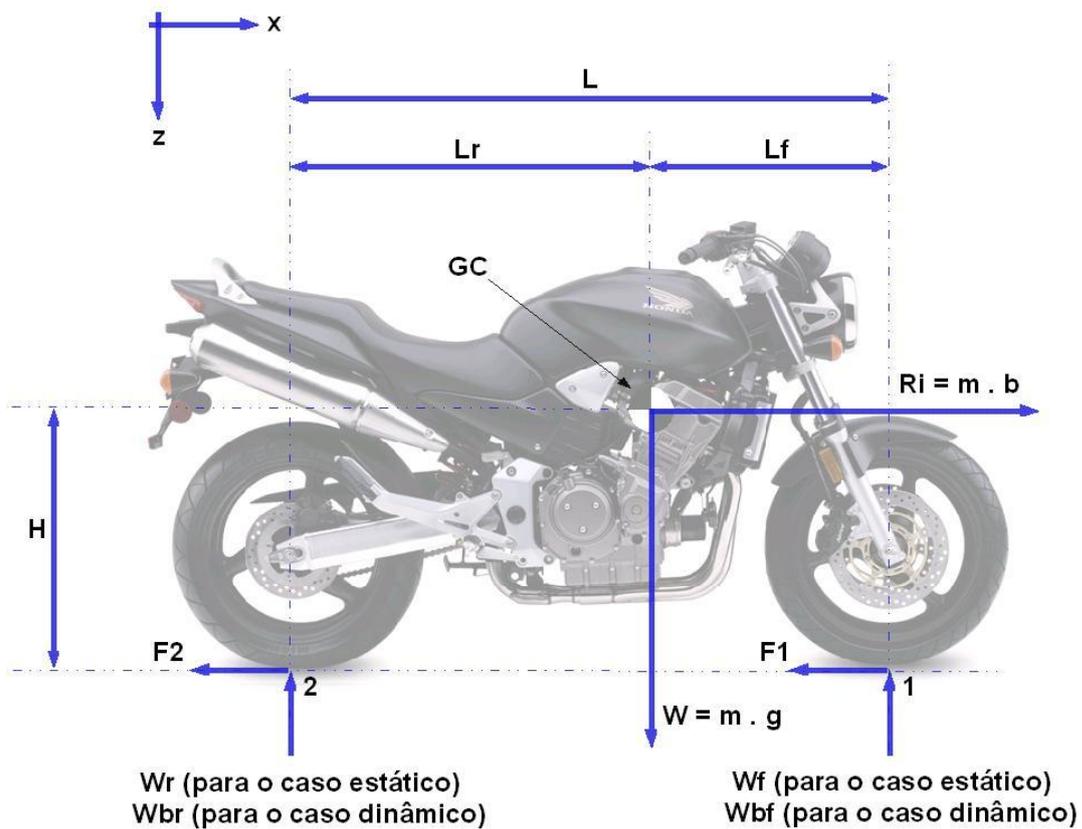


Figura 2.12 - Sistemas de forças atuantes numa frenagem em pavimento plano.  
 Fonte: Adaptado de KAWAGUCHI (2005).

A Tabela 2.1. ordena e descreve as variáveis que atuam na dinâmica da frenagem e que foram utilizadas para compor o modelo da suspensão dianteira.

Tabela 2.1 - Descrição das distâncias principais e das forças atuantes na frenagem.

| Variável | Descrição              |
|----------|------------------------|
| L        | Distância entre-eixos; |

|     |   |
|-----|---|
| Lf  | Distância entre o CG e o eixo dianteiro;                                |
| Lr  | Distância entre o CG e o eixo traseiro;                                 |
| H   | Distância do CG ao pavimento;   |
| Ri  | Resultante de inércia do movimento acelerado de translação;             |
| m   | Massa total do veículo;   |
| b   | Frenagem;   |
| g   | Aceleração da gravidade;  |
| W   | Força peso;   |
| Wf  | Peso estático sobre o eixo dianteiro                                    |
| Wbf | Peso dinâmico sobre o eixo dianteiro                                    |
| Wr  | Peso estático sobre o eixo traseiro                                     |
| Wbr | Peso dinâmico sobre o eixo traseiro                                     |
| F1  | Soma das forças de resistência impostas pelo pavimento (eixo dianteiro) |
| F2  | Soma das forças de resistência impostas pelo pavimento (eixo traseiro)  |

Fonte: Adaptado de KAWAGUCHI (2005).

## 2.6 - IRREGULARIDADES NO PAVIMENTO

As ruas e rodovias brasileiras têm suas peculiaridades. É muito comum, por exemplo, encontrarmos irregularidades no pavimento tais como buracos ou depressões, lombadas (“quebra-molas”), sonorizadores “costelas de vaca” que é o conjunto de pequenas saliências impressas no pavimento que tem a função de produzir ruídos e vibrações quando ultrapassadas a uma velocidade elevada. Para pequenas velocidades, normalmente são imperceptíveis seus efeitos. Sua função principal é atuar como redutor de velocidade em acessos a rodovias, por exemplo.), etc., que tem o objetivo de controlar a velocidade dos pilotos, obrigando o condutor a frear ou sofrer as consequências de ultrapassar essas irregularidades a uma velocidade acima daquela permitida fisicamente.

Muitas vezes essas irregularidades, que são de responsabilidade do poder público, são criadas pelos próprios moradores de um determinado local, com o intuito de reduzir a velocidade do fluxo de veículo. O que ocorre é que essas irregularidades devem ter suas

formas padronizadas, seguindo as normas e regras vigentes para a construção dos mesmos, do contrário se tornam um risco maior do que aquele que pretendia sanar. O anexo 1 (Artigo 3 da resolução 39 do Conselho Nacional de Trânsito) determina alguma destas padronizações.

### 2.6.1 - A lombada

A lombada ou quebra-molas é normalmente constituído por uma saliência com variação contínua que tem por objetivo evitar que o condutor passe por ela com velocidade excessiva, conforme Figura 2.13. A tentativa de ultrapassar esta barreira com grande velocidade pode causar abruptas variações no molejo do veículo, podendo até mesmo quebrá-lo, daí o nome de quebra-molas. (BAGNATO, 2006)

Lombadas fora do padrão, além do risco de acidentes, estão relacionadas a outros problemas tais como: desgaste prematuro da caixa de câmbio, do motor, do sistema de freios, dos discos, pastilhas e lonas, desgaste acelerado dos pneus, da suspensão, bem como maior consumo de combustível e desalinhamento do veículo.

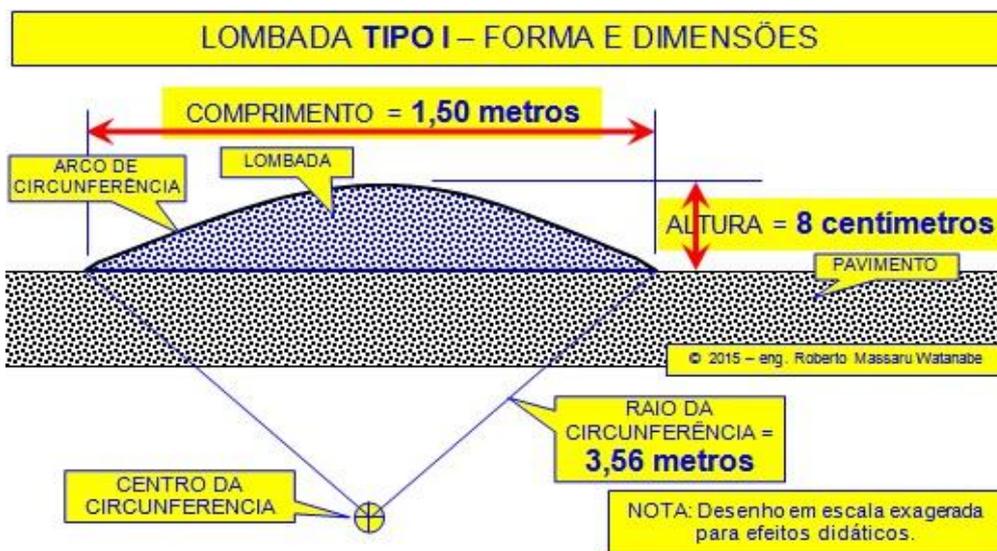


Figura 2.13 - Lombada de acordo com artigo 3 da Resolução 39 do Contran.  
Fonte: FERREIRA, 2002.

Analisa-se esta situação à luz da mecânica para determinar qual será a força aplicada na suspensão da motocicleta no instante em que estiver ultrapassando a irregularidade. Dadas as características do veículo e geometria da lombada, pretende-se determinar o intervalo de velocidade onde a barreira é ultrapassada com segurança.

Se o veículo for um sistema rígido (como é o caso da maioria das bicicletas, por exemplo), a passagem por um quebra-molas a uma velocidade superior àquela fisicamente permitida pode ter consequências extremamente trágicas. Porém, como visto anteriormente, a motocicleta em estudo nesta dissertação não pode ser vista como um sistema rígido, já que possui o amortecedor e as molas, ou seja, o sistema de suspensão, que agem em conjunto evitando que a motocicleta chacoalhe excessivamente ao enfrentar as irregularidades nas vias.

Como é natural, analisa-se esta parte oscilatória como um sistema massa-mola amortecido. A lombada, que apresenta uma variação suave, pode ser vista como tendo uma variação de uma função senoidal. O modelo da suspensão, simplificado para melhor compreensão, está representado na Figura 2.14.

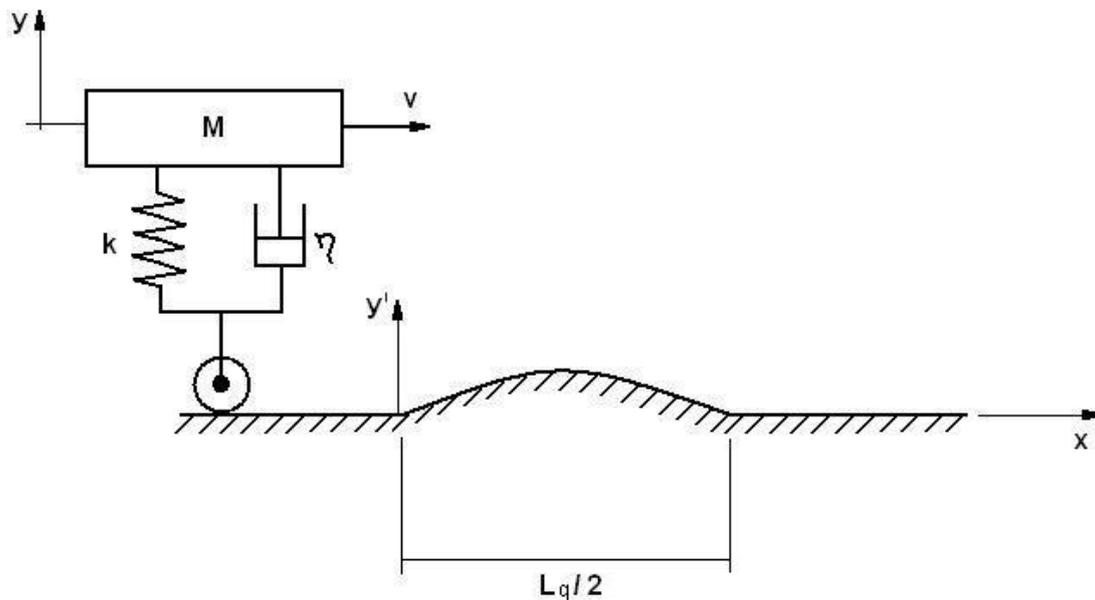


Figura 2.14 - Modelo simplificado: suspensão antes de iniciar a ultrapassagem da lombada.

Fonte: Adaptado de BAGNATO (2006).

A motocicleta de massa  $M$  desloca-se com velocidade  $v$  na direção  $x$ . O corpo massivo do veículo está ligado às rodas por um sistema elástico de constante de mola  $k$  associado em paralelo a um sistema amortecedor de constante de amortecimento  $\eta$ . O grafo de ligação da Figura 2.14 está ilustrado na Figura 2.15 e demonstra as causalidades do sistema.

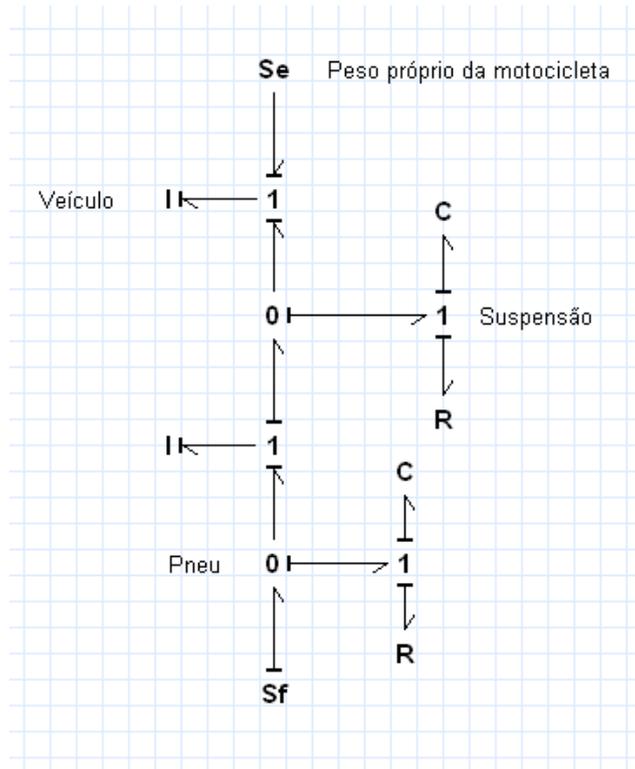


Figura 2.15 - Grafo de ligação da suspensão dianteira.

A lombada é parte de uma função do tipo  $y' = y_0 \text{sen} \left( 2\pi \frac{x}{L_q} \right)$  ou seja: altura  $y'$  e extensão  $L_q/2$ , conforme indicado na Figura 2.14.

O ponto de apoio, ao percorrer o pavimento, encontra a lombada e acompanha seu perfil, de modo que a mola sofrerá uma distensão que depende em que posição a motocicleta se encontre. Como resultado de todos os elementos que compõem o sistema, a equação de movimento vertical para o centro de massa da motocicleta (onde se subtrai da coordenada vertical do centro de massa  $y$ , a altura da lombada  $y'$ ).

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} = -K(y - y') - \frac{\eta dy}{dt} \quad (2.8)$$

Substituindo  $y'$ , tem-se que:

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} = -Ky - \frac{\eta dy}{dt} + Ky_0 \text{sen} 2\pi \frac{x}{L} \quad (2.9)$$

Como foi definido que a motocicleta se deslocando na direção  $x$ , com velocidade  $v$ , tem-se que  $x = vt$  e a equação 3.9 pode ser reescrita na forma:

$$M \frac{d^2y}{dt^2} + Ky + \frac{\eta dy}{dt} = Ky_0 \text{sen}\left(2\pi \frac{vt}{L}\right) \quad (2.10)$$

Desta forma, a suspensão dianteira da motocicleta é exatamente um oscilador harmônico amortecido e forçado e, desta maneira, a suspensão da motocicleta comporta-se segundo este bem conhecido sistema físico.

A grandeza  $\omega = 2\pi \frac{v}{L}$  representa a frequência oscilatória que a lombada procura imprimir à motocicleta quando esta tem a velocidade  $v$ . A solução para a Equação 3.10 pode ser facilmente encontrada nos livros textos convencionais de mecânica, sendo escrita como  $y(t) = A \text{sen}(\omega t + \phi)$ , que substituída na Equação 2.10 nos permite encontrar  $A$ . Como comentário, pode-se notar que a posição inicial do centro de massa da motocicleta, ao iniciar a transposição da lombada permite determinar a fase  $\phi$ . Após estas considerações, o deslocamento do centro de massa da motocicleta enquanto viajando pela lombada tem a forma da função:

$$Y = \frac{\frac{Ky_0}{M}}{\sqrt{\left[\left(\frac{2\pi v}{L}\right)^2 - \frac{K}{M}\right]^2 + \left(\frac{\eta}{M} \frac{2\pi v}{L}\right)^2}} \text{sen}\left(\frac{2\pi vt}{L} + \phi\right) \quad (2.11)$$

Ao analisar-se a equação resultante pode-se notar facilmente que a amplitude com que o centro de massa da motocicleta irá oscilar depende das características da mola e do amortecedor da motocicleta, das características geométricas da lombada, mas principalmente da velocidade da motocicleta.

Considerando a maior velocidade utilizada na simulação, o limite de conforto será definido como  $2\pi v/L = 2\pi 16,67/1,5 = 69,83$ .

Quando a motocicleta ultrapassa a lombada em baixa velocidade, a amplitude de oscilação ou do deslocamento do seu centro de massa fica reduzida a  $y_0$ , pois os termos dependentes da velocidade no denominador têm valor desprezível. Neste caso específico a motocicleta acompanha suavemente a lombada, subindo e descendo em sincronismo com a mesma. Como termos a fórmula geral é intuitivo encontrarmos algumas situações interessantes. Por exemplo, quando a motocicleta tem velocidade próxima de:

$$\frac{2\pi v}{L} = \left[ \frac{K}{M} - \left( \frac{\eta}{M} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.12)$$

Nesta situação a amplitude de oscilação atinge o seu valor máximo (ressonância) causando considerável desconforto ao piloto. Para evitar esta situação é importante que a velocidade em que a motocicleta se encontra esteja fora do regime de ressonância, ou seja, fora dos pontos onde a amplitude do deslocamento supere 50% de seu valor máximo. Assim, da expressão obtém-se que, para que a passagem pela lombada não seja desconfortável para o piloto, deve-se ter uma velocidade tal que:

$$\frac{2\pi v}{L} < \left[ \frac{K}{M} - \left( \frac{\eta}{M} \right)^2 - \sqrt{\left( \frac{\eta}{M} \right)^4 + 12 \left( \frac{\eta}{M} \right)^2 \frac{K}{M}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.13)$$

Por outro lado, quando a velocidade supera em um valor elevado o valor encontrado na Equação 2.12, a amplitude também começa a cair consideravelmente, mesmo que o ponto de apoio tenha que superar a lombada. Nesta situação as molas sofrem todo o deslocamento, enquanto o centro de massa do veículo não se desloca. A compressão sofrida no sistema de molejo pode ser demasiadamente rápida e ampla, causando danos permanentes ao sistema. Nesta situação as molas são “quebradas”. Para velocidades da motocicleta no intervalo tal que:

$$\frac{2\pi v}{L} > \left[ \frac{K}{M} - \left( \frac{\eta}{M} \right)^2 + \sqrt{\left( \frac{\eta}{M} \right)^4 + 12 \left( \frac{\eta}{M} \right)^2 \frac{K}{M}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.14)$$

Tem-se a situação na qual, curiosamente, a passagem não será extremamente desconfortável para o piloto, mas poderá ser dramática para o sistema de suspensão da motocicleta, causando danos permanentes ao sistema.

## 2.7 - CONCEITOS DE MODELAGEM MATEMÁTICA

Modelos que incluem sensores, atuadores e controladores em modelos de sistemas físicos são comumente denominados Sistemas Mecatrônicos (GRANDA, 2002). Quando tais modelos são desenvolvidos, cada componente é modelado separadamente. Existem muitos sistemas de controle de estabilidade de veículos (SHARP, 2001). Controle de tração, freios ABS, sistemas de suspensão inteligente e controle de inclinação são alguns exemplos. Todos podem ser encontrados em vários veículos no mundo.

Os conceitos por detrás destes sistemas citados são propostos por pesquisadores, prototipados por engenheiros de desenvolvimento e comercialmente adaptados ao mercado por engenheiros do produto (ASTROM, 2005).

Em cada estágio do processo de desenvolvimento, modelos são necessários para ajudar nas obtenções de novas visões de projeto, particularidades do funcionamento, entre outros (MARGOLIS, 2001). Os modelos são necessários para reduzir custos e aumentar a velocidade de desenvolvimento de novos produtos, característica importante para quem pretende competir num mercado dinâmico e ágil.

A prototipagem virtual é uma prática comum na indústria automotiva, mas ainda está em desenvolvimento para as empresas de motocicletas. Entre outras vantagens, tais técnicas podem reduzir muito o tempo de desenvolvimento necessário para validar novas ideias (MAVROUDAKIS, 2007).

É sabido que o comportamento dos amortecedores utilizados na indústria automobilística está longe de ser o de um "amortecedor linear viscoso", isto é, de um dispositivo que exerça uma força que depende, com uma lei linear, apenas da velocidade relativa de os dois pontos nos quais está conectado à estrutura do veículo (GENTA, 1989).

A técnica de grafos de ligação (MARTINS, 2016) será utilizada para desenvolver o modelo da suspensão da motocicleta. Grafos de ligação, do inglês Bond Graphs é uma ferramenta muito utilizada na concepção de sistemas de alta complexidade, representando-os vetorialmente (SPERANZA, 2005). O sistema físico é representado por símbolos e linhas, identificando os caminhos dos fluxos de força (BROENINK, 1999). A reunião de elementos tais como resistência, capacitância e inércia, interconectados em um caminho de conservação de energia por ligações e junções de fluxo e esforço resulta em uma estrutura em rede, representativa do modelo físico (SHEN, 2007).

A representação gráfica possibilita a obtenção de um sistema de equações esquemático e linear (equações de estado) que pode ser facilmente algoritmizado (MARGOLIS, 2001). Além do mais, as notações de causalidade fornecem uma

ferramenta não apenas para a formulação de um sistema de equações, mas também para se intuir comportamentos do sistema, diagnósticos de falhas, observações do sistema, etc.

Quando os subcomponentes são representados com grafos de ligação, todos os relacionamentos de entrada / saída são imediatamente conhecidos através da aplicação da causalidade. A demonstração da montagem desses subcomponentes em um sistema completo, no caso uma suspensão dianteira motocicleta, será realizada adiante.

Ao final do modelamento, na etapa de demonstrações da funcionalidade, será aplicada uma condição extrema para se obter o comportamento do sistema em uma condição peculiar, quando as cargas são transferidas para a suspensão dianteira no instante da frenagem. Nesta condição, a suspensão dianteira tem de lidar com um carregamento devido ao giro da motocicleta em direção ao pavimento (dianteira da moto). No caso de ocorrer um impacto do pneu com o pavimento, devido a uma irregularidade de elevada proporção, a suspensão irá sofrer dois carregamentos de considerável magnitude, o primeiro devido à transferência dinâmica de carga, afundando a dianteira da motocicleta em direção ao pavimento, e o segundo, devido à irregularidade no pavimento, conduzindo o pneu na vertical para cima.

### **2.7.1 - Concepção de modelo**

O desenvolvimento de uma simulação de suspensão veicular requer basicamente o modelamento de dois sistemas: o veículo e o pavimento por onde o mesmo irá se deslocar (BARBOSA, 2003). O modelo de sistema veicular escolhido para esta dissertação possui dois graus de liberdade. A Figura 2.16 ilustra um modelo completo. Como proposta de análise será elaborada a simulação apenas da suspensão dianteira da motocicleta.

O efeito de amortecimento dos pneus está representado pelas variáveis ( $K_p$  e  $C_p$ ) e as massas  $M_2$  e  $M_3$ , simbolizam a massa não-suspensa, tais como a massa dos pneus e dos eixos. No modelo completo representado na Figura 2.16, aproximadamente na metade da distância entre as duas suspensões está localizado o CG. No entanto essa distância pode variar dependendo da motocicleta a ser analisada (RAJAMANI, 2011). Cada suspensão, por sua vez, está representada pelas molas ( $K_s$ ) e pelos amortecedores ( $C_s$ ). Os pontos de contato entre os sistemas de suspensão e o pavimento estão representados por ( $uz$ ). A massa  $M_1$  é a massa suspensa, tal como a massa da motocicleta e do piloto.

Estão representados também os movimentos verticais e de galope ao redor do centro de gravidade.

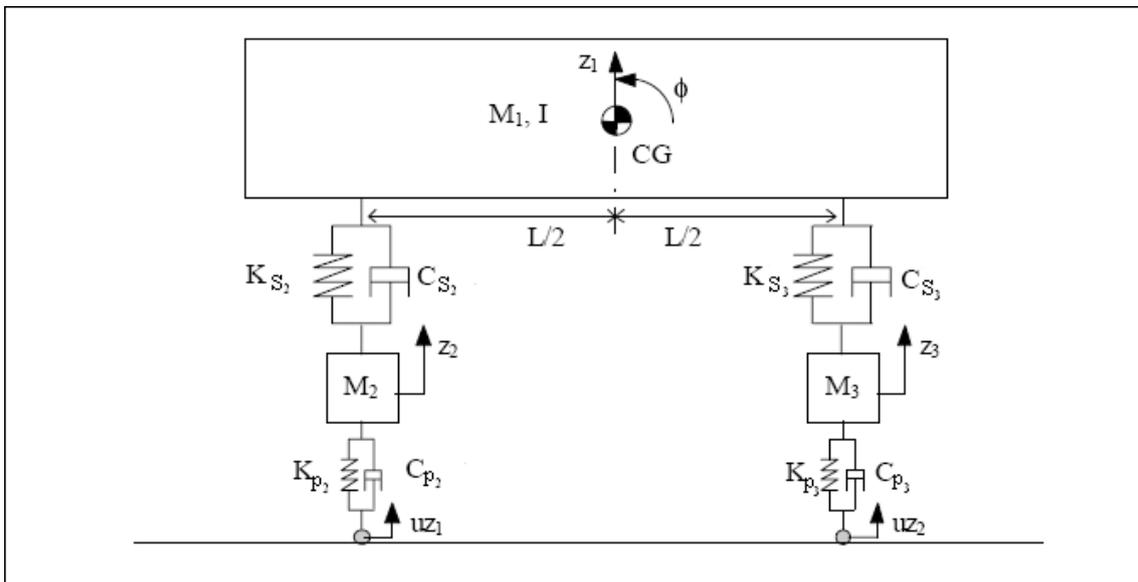


Figura 2.16 - Modelo da motocicleta com dois graus de liberdade.  
Fonte: Adaptado de BARBOSA (2003).

### 2.7.2 - Esquema representativo da dinâmica de veículos

As forças e momentos que atuam sobre o movimento de um veículo, além das forças gravitacionais e aerodinâmicas, são aplicados através do contato pneu / pavimento (TAN, 2005).

A Figura 2.17 apresenta um diagrama representativo destes acoplamentos realizados e de suas ações e reações, demonstrando as forças e torques encontradas no modelo.

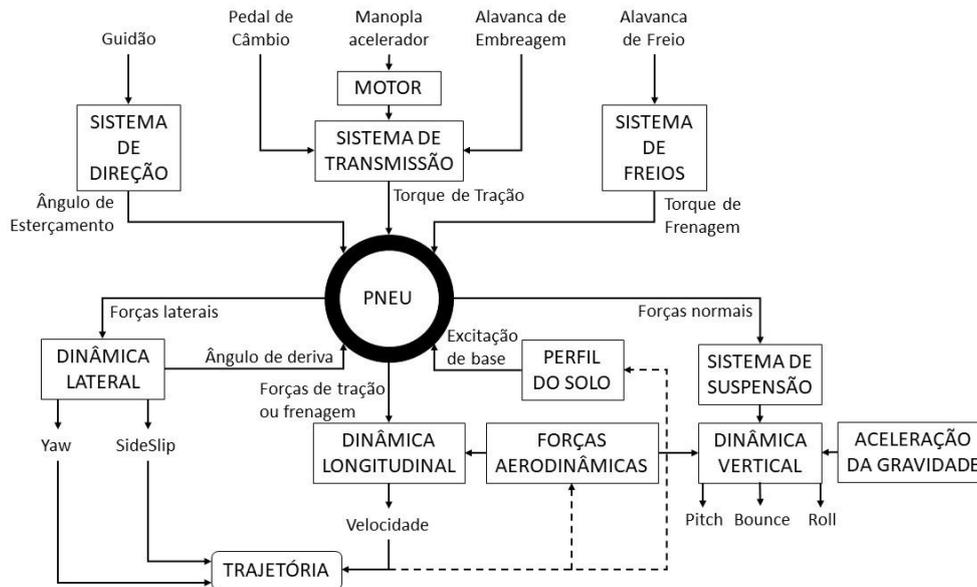


Figura 2.17 - Esquema representativo da dinâmica de veículos.  
 Fonte: Adaptado de SPERANZA (2005).

A dinâmica veicular pode ser dividida em subsistemas, compostos por sistemas de atuação e de suspensão (no caso de ser adotada uma suspensão passiva), dinâmicas principais e influências externas (BARBOSA, 2003). Os sistemas conhecidos como de atuação, são os sistemas de propulsão, sistemas de direção e sistemas de frenagem. O sistema de propulsão é composto pelo motor mais o sistema de transmissão e é responsável pela geração do torque propulsor e sua distribuição entre as rodas (MOURA, 2005). Como entradas, encontram-se as variações do pedal acelerador, da alavanca de mudanças e do pedal de embreagem. O sistema de direção é composto pelo volante. O sistema de frenagem recebe as variações do pedal de freio, acionado pelo piloto, gerando um torque de frenagem que irá trabalhar no sentido de diminuir a velocidade do veículo (GISSINGER, 2000). O último sistema a ser abordado é o sistema de suspensões, no caso das suspensões passivas, atua transferindo as forças geradas pelos pneus para o corpo do veículo.

As saídas destes sistemas agem diretamente nos pneus, influenciando a geração de forças laterais, longitudinais e verticais que serão passadas às dinâmicas principais, compostas pela dinâmica lateral, dinâmica longitudinal e dinâmica vertical (IBITOYE, 2006).

Dinâmica lateral – Representa o comportamento do veículo no seu movimento curvilíneo. Recebe como excitação os componentes da forças laterais das duas rodas que

irão determinar deslocamentos, velocidades e acelerações ao longo do eixo y e em torno de seu eixo vertical (BONCI, 2016). Esses dois movimentos são conhecidos como Yaw e Sideslip, irão afetar diretamente a trajetória que o veículo vier a desempenhar. Uma terceira resultante da dinâmica lateral corresponde ao ângulo de deriva, que determina o deslizamento do pneu durante um movimento curvilíneo.

Dinâmica longitudinal – Recebe como excitações as forças de tração ou de frenagem que irão influenciar diretamente na geração da velocidade para que o veículo se movimente (KOENEN, 2018).

Dinâmica vertical – Recebe as forças peso e forças normais que irão atuar no deslocamento vertical da motocicleta. O curso máximo da suspensão e as forças máximas podem ser determinados para um impacto simulado do veículo após um salto.

Isso é executado por uma condição inicial para a velocidade das massas suspensas e não suspensas (PAKKALA, 2011).

## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 - MODELAMENTO DA SUSPENSÃO DIANTEIRA

Para o modelamento da suspensão utilizou-se o software Simulink®, desenvolvido pela companhia The MathWorks®. É uma ferramenta para modelamento, simulação e análise de sistemas dinâmicos cuja interface primária é uma ferramenta de diagramação gráfica por blocos e bibliotecas customizáveis de blocos. O software oferece alta integração com o resto do ambiente MATLAB®. Simulink® é amplamente usado em teoria de controle e processamento digital de sinais para projeto e simulação multi-domínios.

Será simulado um Sistema massa molar amortecedor conforme ilustrado na Figura 2.14.

Inicialmente foi modelada uma somatória de forças atuando em ambas as massas (motocicleta e suspensão) e integradas as acelerações de cada massa duas vezes para obter as velocidades e deslocamentos, logicamente aplicando as leis de Newton para ambas as massas. As equações que representam o sistema físico são as Eqs. 3.1 e 3.2 uma dupla integral é definida como:

$$\frac{d^2 x_1}{dt^2} = \int \frac{dx_1}{dt} = x_1 \quad (3.1)$$

$$\frac{d^2 x_2}{dt^2} = \int \frac{dx_2}{dt} = x_2 \quad (3.2)$$

Inseriram-se dois pares de integral que foram interconectados nomeando a entrada como sendo a aceleração (a1 e a2), o resultado da primeira integração foi nomeado como velocidade (v1 e v2) e o resultado da segunda integração definido como deslocamento, conforme Figura 3.1.

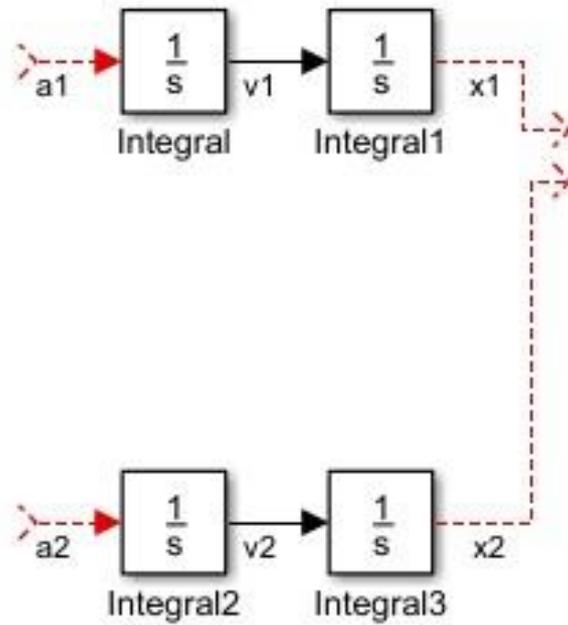


Figura 3.1 - Par de integrais para as acelerações  $a_1$  e  $a_2$ .

As Leis de Newton para ambas as massas podem ser expressas por:

$$\frac{1}{M_1} \sum_1 F = \frac{d^2 x_1}{dt^2} \quad (3.3)$$

$$\frac{1}{M_2} \sum_2 F = \frac{d^2 x_2}{dt^2} \quad (3.4)$$

As Eq. (3.17) e (3.18) foram representadas por dois blocos gain (para  $1/m_1$  e  $1/m_2$ ) e demais blocos de somatória, conforme ilustrado na Figura 3.2. O bloco Massa 1 representa a massa suspensa do veículo e o bloco Massa 2 a massa não suspensa.

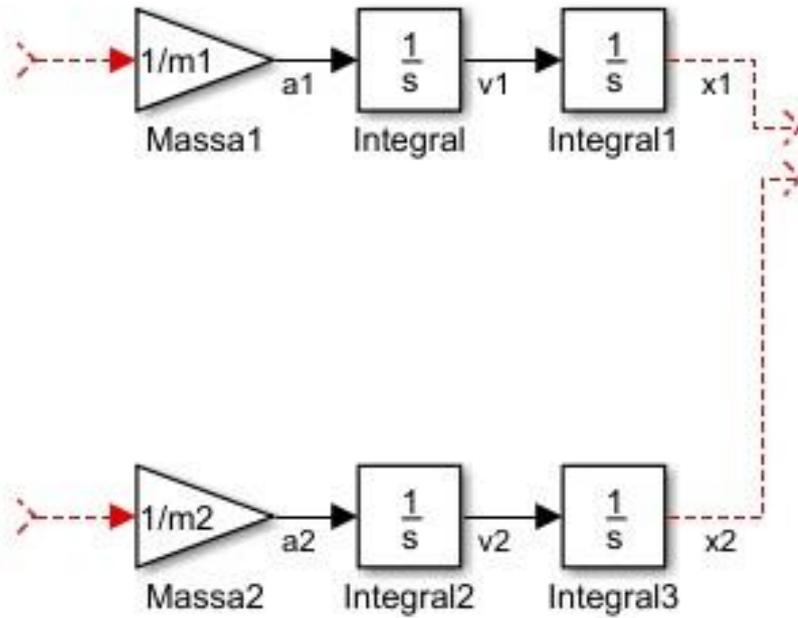


Figura 3.2 - Inclusão dos blocos Massa 1 e Massa 2 representando as massas do modelo.

Em seguida foi obtida a diferença entre a velocidade  $v_1$  e a velocidade  $v_2$  e multiplicada pelo amortecedor 1  $b_1$ . Como demonstrado na Figura 3.3, o valor obtido entra na somatória de retroalimentação das massas  $m_1$  e  $m_2$ . O valor para o amortecedor 2  $b_2$  entra na somatória relativa a massa 2  $m_2$ .

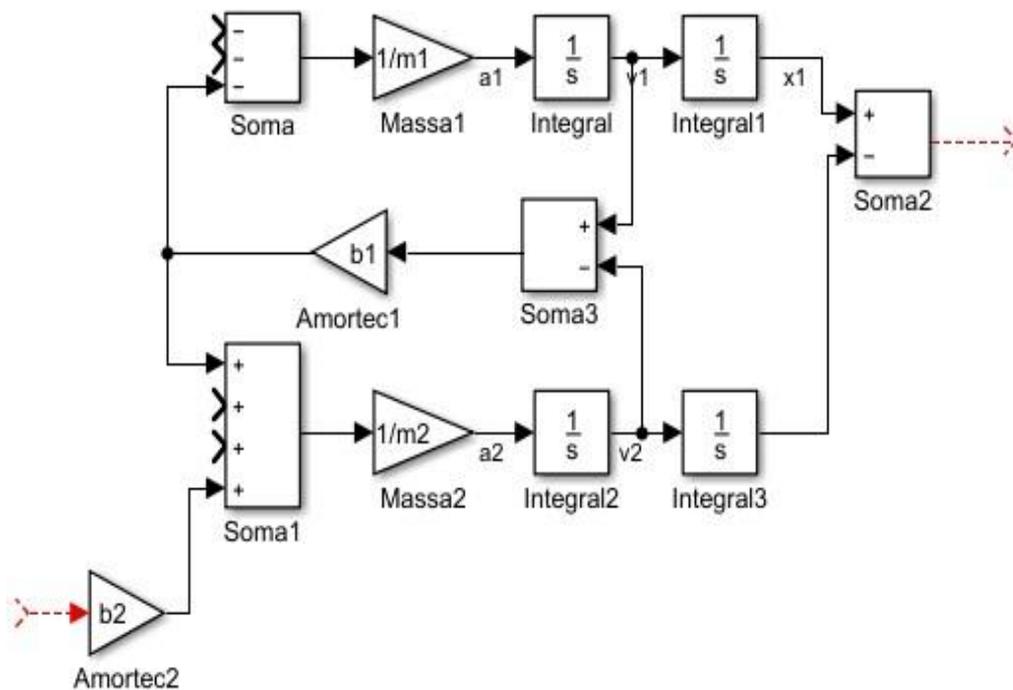


Figura 3.3 - Inclusão dos amortecedores no modelo.

Então inseriram-se as forças atuantes em cada massa. Inicialmente, foi inserida a força da Mola 1. Essa força é definida como a constante  $k_1$  vezes a diferença entre  $x_1 - x_2$ . O resultado da somatória ( $x_1 - x_2$ ) foi multiplicado pelo bloco gain  $k_1$ , e inserido num terminal negativo para a massa  $m_1$  e num terminal negativo para a massa  $m_2$ , conforme Figura 3.4.

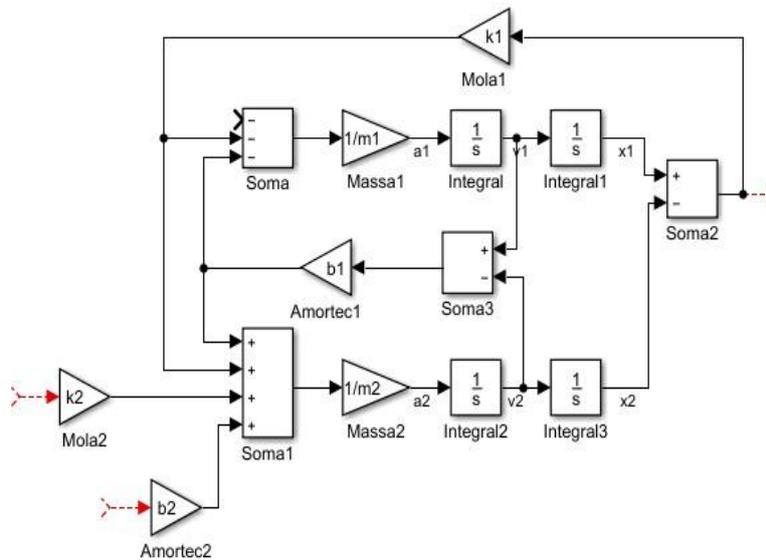


Figura 3.4 - Inclusão das constantes das molas.

Para a transferência dinâmica de cargas, o componente vertical é dado pela distância do Centro de Gravidade até o Solo  $H$  multiplicado pelo componente de frenagem  $d$ , conforme ilustrado na Figura 3.5.



Figura 3.5 - Componente vertical da transferência de cargas.

Para o componente horizontal da transferência dinâmica de carga teremos a distância entre o centro de gravidade e o eixo dianteiro  $L_f$  subtraída da distância entre os eixos  $L$  e o resultado multiplicado pela gravidade  $g$ , conforme a Figura 3.6.

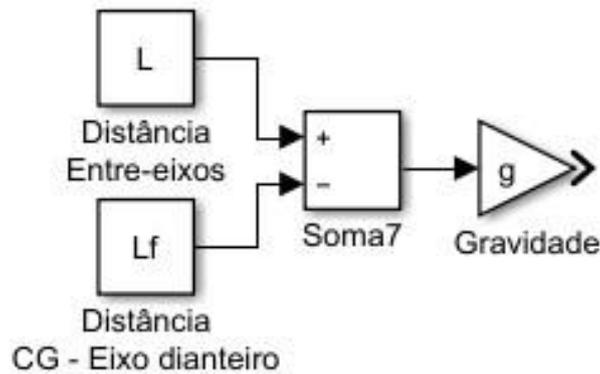


Figura 3.6 - Componente horizontal da transferência dinâmica de cargas.

É feita a somatória do componente horizontal e vertical da transferência dinâmica de cargas ilustrado na Figura 3.7.

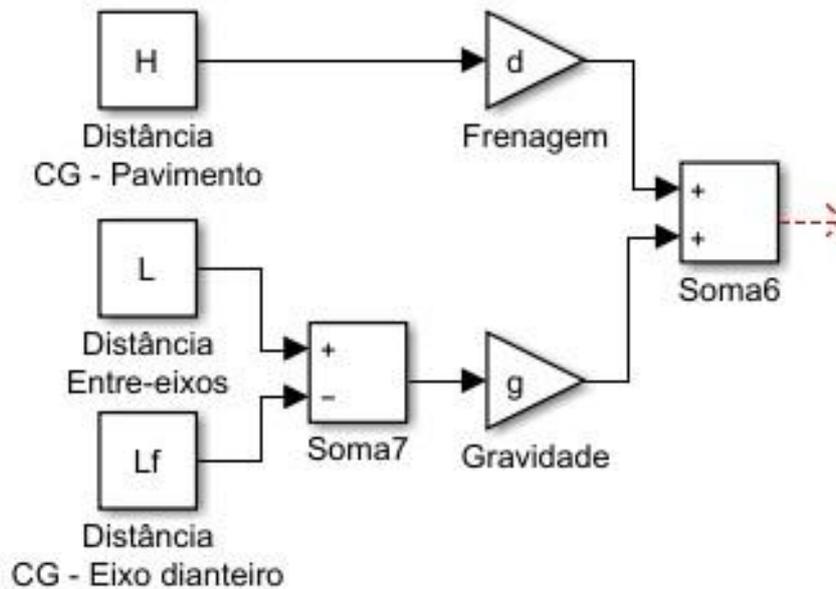


Figura 3.7 - Somatória dos componentes horizontal e vertical.

A resultante da somatória dos componentes horizontal e vertical é multiplicada pelo fator de massa  $1/m1$  e em seguida multiplicado pelo fator de comprimento da lombada  $1/Lq$ , finalizando assim o módulo da transferência dinâmica de cargas no instante da frenagem, conforme ilustra a Figura 3.8.

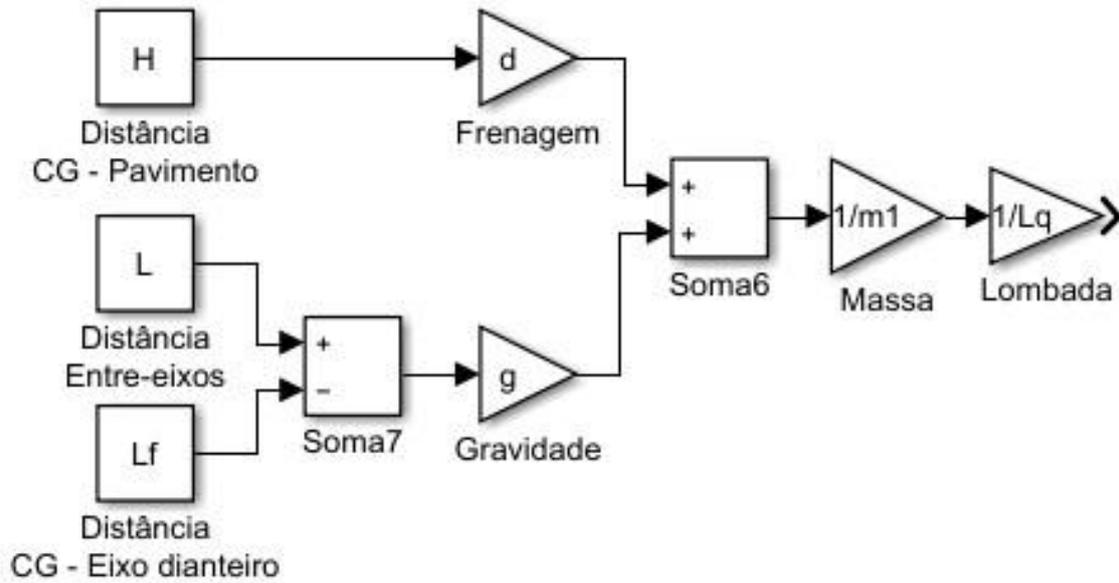


Figura 3.8 - Módulo completo da transferência dinâmica de cargas.

Com o módulo da transferência dinâmica de cargas finalizado ele é inserido na somatória da massa  $m1$ , no pólo de sinal negativo que restava, ilustrado na Figura 3.9.

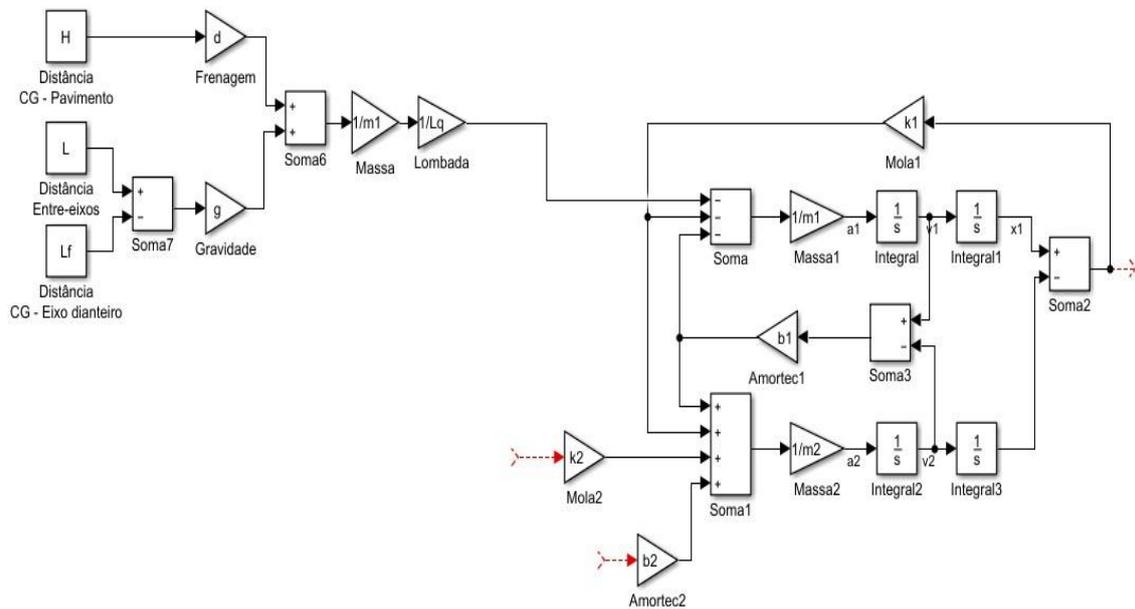


Figura 3.9 - Inclusão do componente de transferência dinâmica de carga.

O bloco que simula o pavimento é definido por uma senóide num produto com o elemento que representa a lombada, conforme a Figura 3.10. Foi feito multiplicando a constante  $2\pi$  pelo produto da variável da velocidade  $v$  e o componente da lombada  $1/Lq$ .

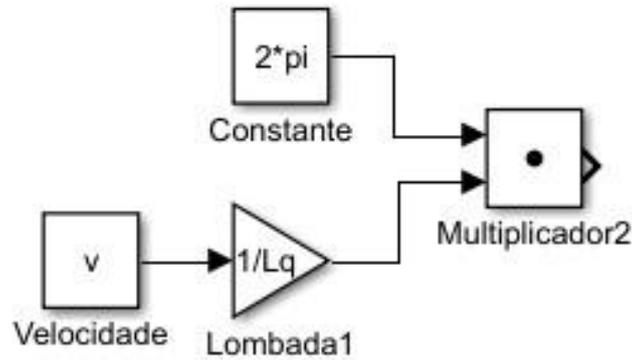


Figura 3.10 - Componente que simula o pavimento e a lombada.

Com modelos de convolução discreta, é preciso excitar o processo com impulsos (pulsos) ou degraus. Portanto foi realizada a multiplicação do pavimento com um bloco step, que simula o momento que o pneu atinge a lombada, mostrado na Figura 3.11.

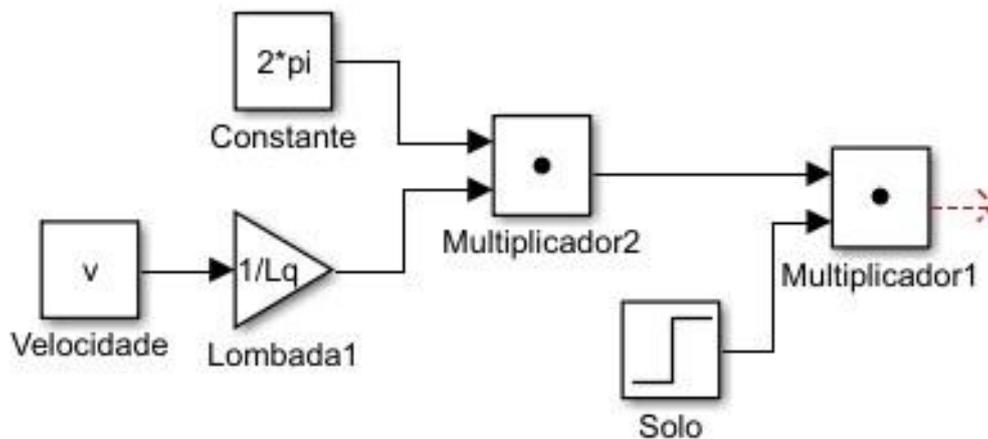


Figura 3.11 - Bloco pavimento com incremento do bloco step.

O sinal proveniente desse bloco é utilizado diretamente na somatória de entrada da constante de amortecimento  $k_2$  e sua derivada é utilizada na somatória de entrada do amortecedor  $b_2$ , ambas com sinal positivo, conforme ilustra a Figura 3.12.





Tabela 3.1 - Variáveis da motocicleta.

| Variável                                     | Símbolo           | Quantidade           | Unidade (S.I.)   |
|--|-------------------|----------------------|------------------|
| Massa da motocicleta (massa suspensa)        | m1                | 273                  | kg               |
| Massa da motocicleta (massa não suspensa)    | m2                | 13                   | kg               |
| Coeficiente de amortecimento amortecedor1    | b1                | 214                  | N.s/m            |
| Coeficiente de amortecimento amortecedor2    | b2                | 16200                | N.s/m            |
| Constante da Mola 1                          | k1                | 3072                 | N/m              |
| Constante da Mola 2                          | k2                | 407                  | N/m              |
| Desaceleração                                | d                 | 300                  | m/s <sup>2</sup> |
| Largura da lombada                           | Lq                | 1,5                  | m                |
| Velocidade da Motocicleta                    | v                 | 2,77~16,67           | m/s              |
| Distância entre o CG e o pavimento           | H                 | 0,525                | m                |
| Distância entre eixos                        | L1                | 1,460                | m                |
| Distância entre o CG e a Suspensão Dianteira | Lf                | 0,610                | m                |
| Aceleração da Gravidade                      | g                 | 9,81                 | m/s <sup>2</sup> |
| Constante do pneu atuando como mola          | Kp <sub>2,3</sub> | 8,31x10 <sup>3</sup> | N/m              |
| Coeficiente de amortecimento dos pneus       | Cp <sub>2,3</sub> | 35                   | N.s/m            |

Estes valores foram alimentados na janela de dados diretamente no MatLab® de modo a fornecer ao Simulink® os dados necessários para efetuar a simulação de acordo com o esperado.

Inicialmente foram configuradas seis simulações, onde se variou a velocidade com que piloto e motocicleta passam por sobre a irregularidade, mantendo-se constante o comprimento da lombada, de modo a analisarem-se os efeitos da variação da velocidade na resposta do conjunto suspensão. As etapas de simulação, nomeadas Sim<sub>Ai</sub> e seus respectivos valores estão relacionadas na Tabela 3.2 Variações de Velocidade:

Tabela 3.2 - Simulações variando a velocidade sobre uma lombada padrão.

| Variável   | Símbolo | Sim <sub>A1</sub> | Sim <sub>A2</sub> | Sim <sub>A3</sub> | Sim <sub>A4</sub> | Sim <sub>A5</sub> | Sim <sub>A6</sub> | Grandeza |
|------------|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------|
| Velocidade | v       | 2,77              | 5,55              | 8,33              | 11,11             | 13,90             | 16,67             | m/s      |
|            |         | 10                | 20                | 30                | 40                | 50                | 60                | Km/h     |

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.1 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após rodar a simulação, obtiveram-se os gráficos por meio do bloco *Resultado*, que estão ilustrados na Figuras 4.1 a 4.6, onde cada gráfico foi obtido para uma velocidade específica.

Os gráficos relacionam o tempo decorrido da simulação (s) *versus* o deslocamento vertical do sistema (m). Adotou-se uma escala que varia de 0 a 10 segundos para o tempo e de -0,2 a 0,2 metros para o deslocamento vertical.

Na Figura 4.1 se tem o gráfico para velocidade 2,77 m/s.

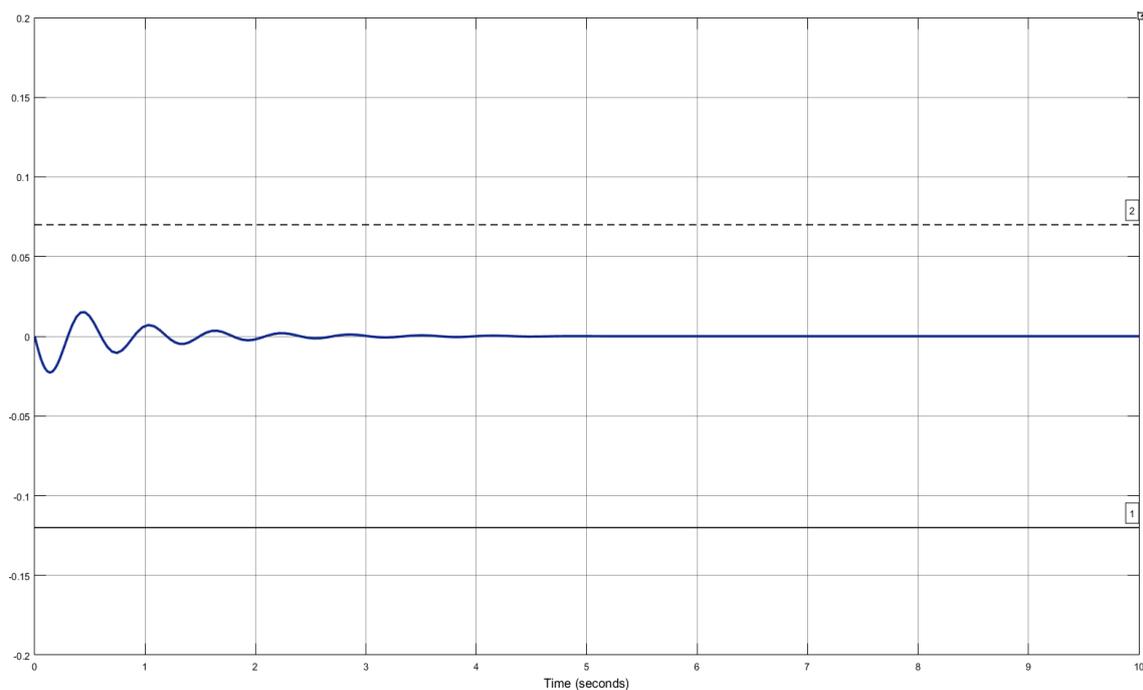


Figura 4.1 - Gráfico resultante da simulação da suspensão dianteira para SIM<sub>A1</sub> ( $v=2,77$  m/s).

Ao final da simulação observa-se um movimento subamortecido com decremento logarítmico com energia dissipada proporcional ao quadrado da amplitude do movimento.

Os efeitos foram ampliados com o incremento de 2,77m/s na velocidade. Como se vê na Figura 4.2 para a velocidade resultante de 5,55 m/s.

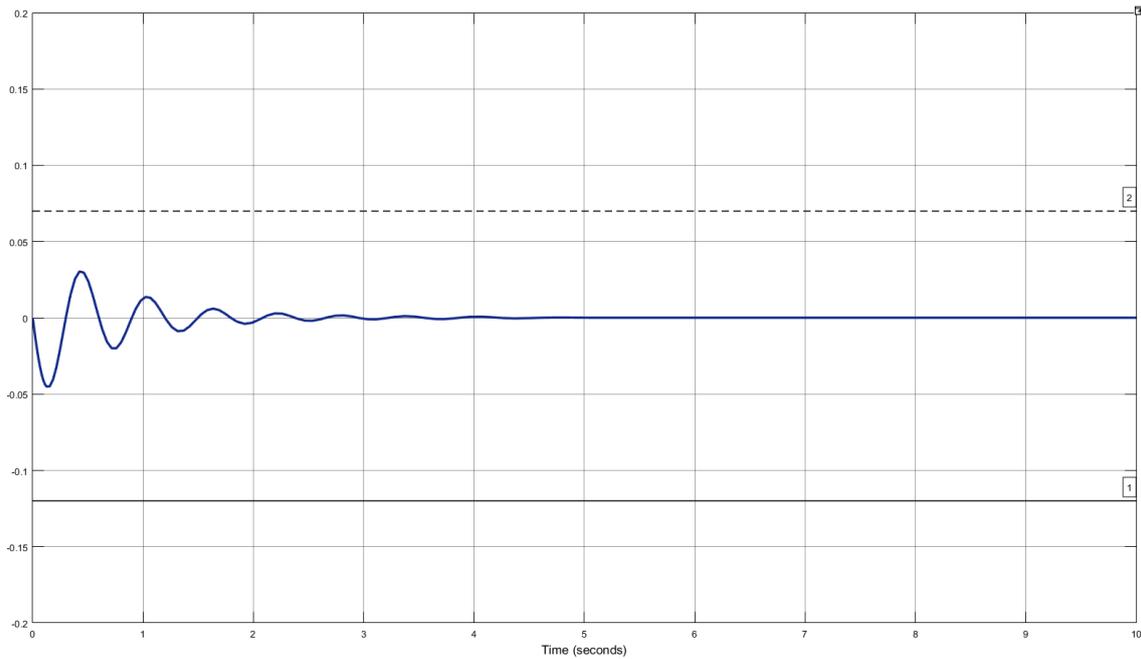


Figura 4.2 - Gráfico resultante da simulação da suspensão dianteira para SIM<sub>A2</sub> (v=5,55 m/s).

No instante  $t=0$ , a motocicleta passou sobre a irregularidade no pavimento, no caso desta simulação, uma lombada. As diferentes velocidades com que a motocicleta ultrapassa a irregularidade em cada simulação estão descritas na Tabela 4.2. e indicadas na legenda de cada gráfico.

Ao passar sobre a irregularidade nota-se um pico na direção vertical positiva que gera uma reação de todo o sistema de suspensão, para em seguida afundar novamente a parte dianteira da motocicleta. Porém logo após o “salto” inicial, a suspensão trabalha continuamente para atenuar o efeito do encontro do pneu dianteiro com a lombada.

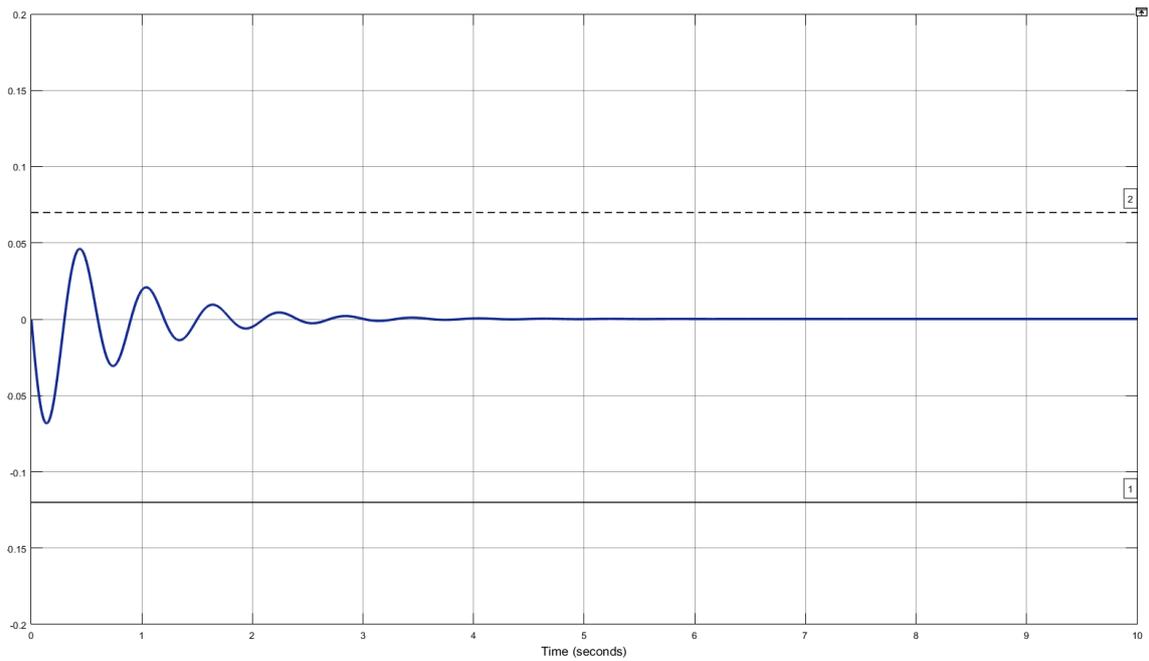


Figura 4.3 - Gráfico resultante da simulação da suspensão dianteira para SIM<sub>A3</sub> (v=8,33 m/s).

Foram utilizados nesta simulação incrementos na velocidade da ordem de 2,77 m/s (10 km/h). Ao compararmos os gráficos pode-se notar que cada incremento na velocidade faz com que o pico resultante do contato entre o pneu e o pavimento praticamente duplique, vide Figura 4.4.

Entretanto é possível observar que, apesar deste incremento de velocidade no valor “v” da simulação, as resultantes do deslocamento vertical ficam dentro do especificado tanto em limite de conforto quanto no limite funcional do amortecedor (batente).

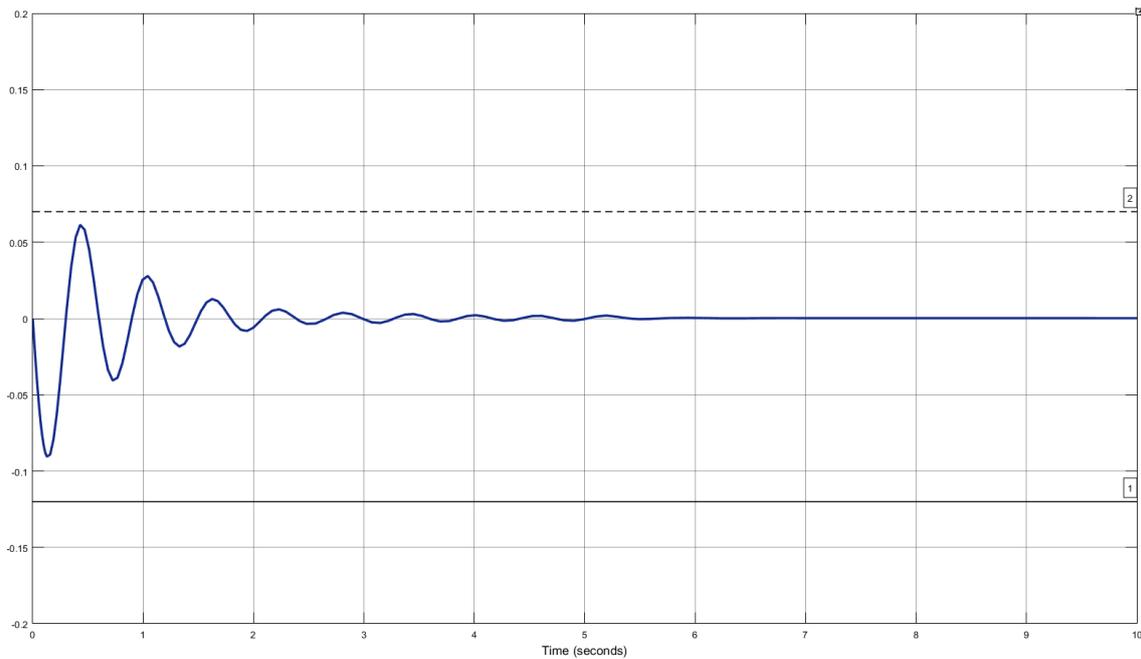


Figura 4.4 - Gráfico resultante da simulação da suspensão dianteira para SIM<sub>A4</sub> (v=11,11 m/s).

A Figura 4.5 ilustra o comportamento da suspensão quando a motocicleta, com a velocidade de 13,9 m/s, passa sobre a lombada. Verifica-se um pico na direção vertical muito maior do que aqueles ilustrados anteriormente. Pode-se notar em todos os gráficos, no entanto, que apenas 5 segundos após o impacto a suspensão consegue controlar os efeitos tanto da transferência dinâmica de carga quanto do impacto com a irregularidade no pavimento.

Apesar do elevado esforço aplicado neste conjunto, o mesmo consegue atenuar os efeitos e absorver relativamente bem as vibrações advindas desta situação.

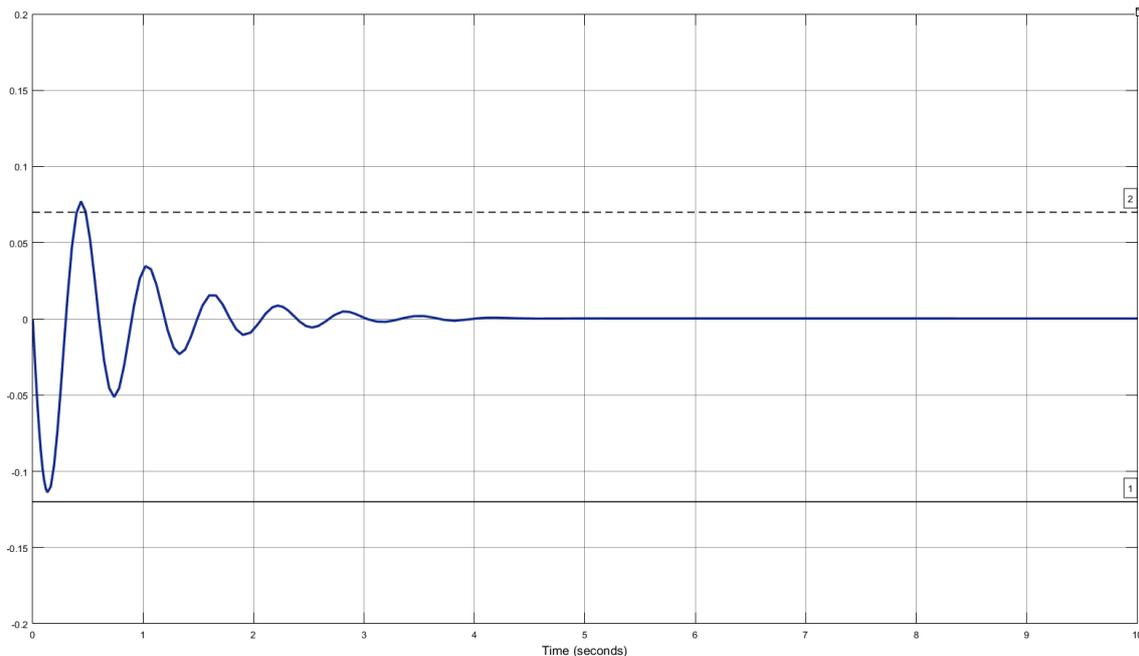


Figura 4.5 - Gráfico resultante da simulação da suspensão dianteira para SIM<sub>A5</sub> (v=13,9 m/s).

Em todos os gráficos podem-se notar claramente os efeitos da transferência dinâmica de cargas, onde a frente da motocicleta mergulha em direção ao pavimento. A mola se encarrega de receber os esforços e o amortecedor dissipa a energia recebida. Isso faz com que toda a frente da motocicleta alterne movimentos ascendentes e descendentes.

Fica clara a capacidade da lombada em manter o fluxo do tráfego de veículos abaixo de 11,11 m/s (40km/h), pois os valores de velocidade acima deste ponto produzem “saltos” da suspensão próximo da zona de conforto e dos valores suportáveis pelo corpo do condutor e, dependendo do impacto, até mesmo dos limites suportados pela suspensão, conforme Figura 4.6.

Além do mais, o piloto de motocicleta não conta com cinto de segurança, de maneira que uma elevação de grande magnitude na frente da motocicleta pode resultar em perda de controle da direção.

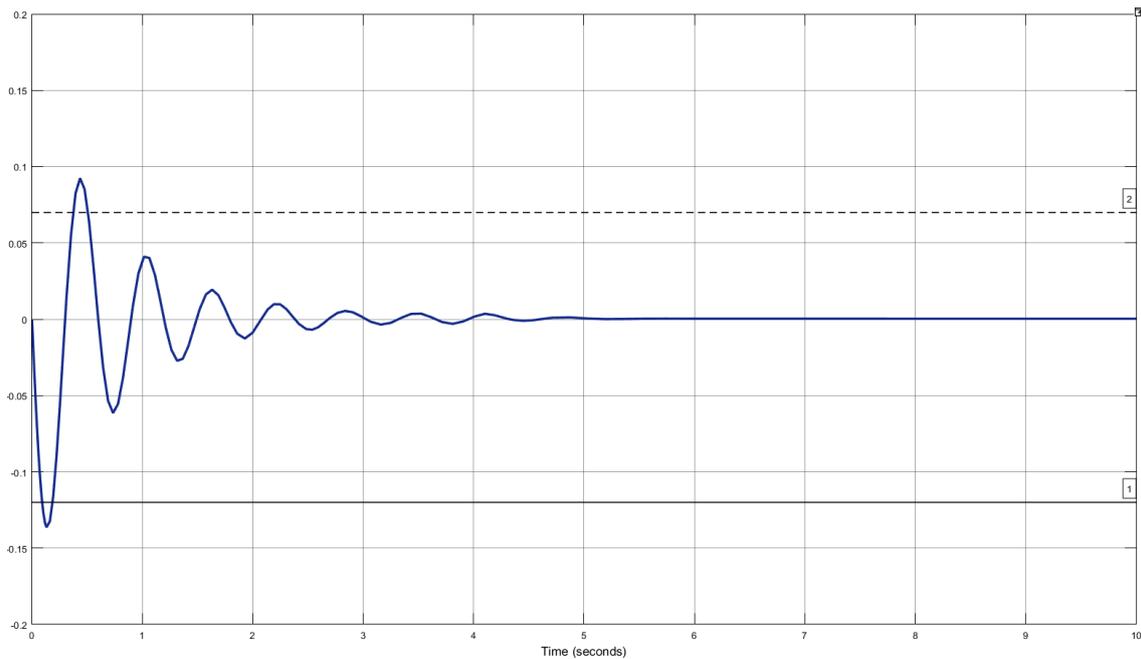


Figura 4.6 - Gráfico resultante da simulação da suspensão dianteira para SIM<sub>A6</sub> ( $v=16,67$  m/s).

Unificando todos os resultados em um mesmo gráfico é possível comparar visualmente as respostas obtidas na Figura 4.7.

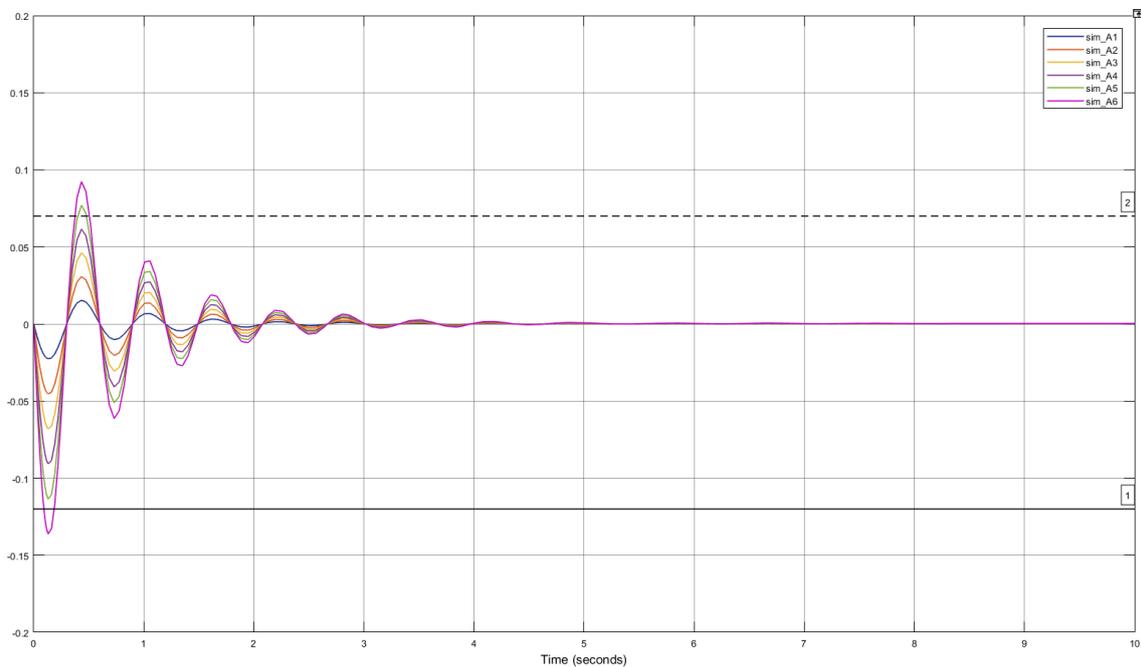


Figura 4.7 - Gráfico unificado resultante das simulações.

A Tabela 4.1 organiza os principais indicadores coletados em cada simulação:

Tabela 4.1 - Características das ondas resultantes: resumo dos dimensionais.

| Variável de Onda         | Unid | SIM <sub>A1</sub> | SIM <sub>A2</sub> | SIM <sub>A3</sub> | SIM <sub>A4</sub> | SIM <sub>A5</sub> | SIM <sub>A6</sub> |
|--------------------------|------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Maior Amplitude (+)      | mm   | 8.56              | 17.15             | 25.74             | 34.33             | 42.95             | 51.51             |
| Tempo p/ amplit. max (+) | ms   | 0.221             | 0.221             | 0.221             | 0.221             | 0.221             | 0.221             |
| Pulsos (+)               | n    | 17                | 17                | 17                | 17                | 17                | 17                |
| Duty cycle (+)           | %    | 46.061            | 46.051            | 46.050            | 46.077            | 46.061            | 46.058            |
| Maior Amplitude (-)      | mm   | 7.75              | 15.55             | 23.33             | 31.11             | 38.92             | 46.68             |
| Tempo p/ amplit. max (-) | ms   | 0.408             | 0.408             | 0.408             | 0.408             | 0.408             | 0.408             |
| Pulsos (-)               | n    | 16                | 16                | 16                | 16                | 16                | 16                |
| Duty cycle (-)           | %    | 54.425            | 54.436            | 54.437            | 54.406            | 54.425            | 54.428            |
| Tempo p/ amplitude <20   | ms   | 0                 | 0.221             | 0.999             | 1.393             | 1.777             | 2.170             |
| Período                  | ms   | 392.661           | 392.662           | 392.666           | 392.653           | 392.661           | 392.660           |
| Frequência               | Hz   | 2.547             | 2.547             | 2.547             | 2.547             | 2.547             | 2.547             |

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES

#### 5.1 - CONCLUSÕES

A proposta de desenvolvimento do modelo matemático da dinâmica da motocicleta em software de simulação foi executada com sucesso. Ao final desta dissertação, conseguiu-se alcançar seu objetivo, que era realizar o modelamento, simulação e por fim efetuar a análise dos dados obtidos do modelo de suspensão dianteira de uma motocicleta, levando em consideração o duplo efeito de carga, aplicando-se simultaneamente o efeito da transferência dinâmica de carga e os efeitos obtidos por uma irregularidade no pavimento. Foi possível observar o comportamento dinâmico da suspensão ao passar sobre uma deformação bidimensional no pavimento, com o sistema de freio dianteiro previamente acionado, criando uma força de frenagem constante e uniforme até o completo deslocamento sobre o obstáculo.

Foram feitas variações na velocidade de ultrapassagem da irregularidade no pavimento com incrementos de 2,77 m/s (10 km/h) em seis etapas distintas, com o intuito de se analisar os diferentes comportamentos do sistema de suspensão no instante do contato direto entre o pneu e a lombada.

O modelo, apesar das simplificações, possibilitou um melhor entendimento do comportamento dinâmico do sistema de suspensão dianteira da motocicleta. A validação do modelo foi efetuada fazendo sua performance em pavimento plano e sem forças externas atuando, excetuadas aquelas devido a aceleração da gravidade.

Em seguida as forças foram aplicadas uma a uma, de acordo com os objetivos específicos da dissertação, para só então ser simulado o comportamento da suspensão sobre carregamentos simultâneos. Deste carregamento simultâneo foi obtido o gráfico tempo versus posição da suspensão dianteira da motocicleta. Esse modelo da suspensão dianteira da motocicleta pode ser considerado como  $\frac{1}{4}$  de um veículo terrestre, portanto, basta alterar os parâmetros e variáveis aplicadas nesta simulação no modelo base criado, e desta maneira simular qualquer veículo desejado.

O modelo criado, além de verificar o comportamento da motocicleta como sistema complexo, permitiu o uso de algumas ferramentas computacionais e técnicas de

simulação da dinâmica, que podem ser utilizadas na resolução de problemas industriais diversos.

## 5.2 - SUGESTÕES

No decorrer do desenvolvimento desta dissertação e das observações efetuadas, identificou-se uma lista de ideias subsequentes que poderão contribuir para refinar os resultados aqui obtidos, eliminando algumas simplificações e desta maneira permitindo uma maior transposição dos resultados do ambiente virtual para o mundo real.

Uma primeira proposta é inserir o modelo da suspensão dianteira em conjunto com um modelo de suspensão traseira acoplado ao chassi da motocicleta, de modo a simular de maneira fiel o comportamento da motocicleta completa nas mais diversas situações.

Outra proposta é comparar os dados obtidos na simulação com resultados reais, obtidos no físico, e em seguida montar um banco de dados para poder confrontar peças recebidas de garantia de campo, obtendo assim indicações de possível uso incorreto, sobrecarga, etc.

É possível também implementar sobre o modelo base criado nesta dissertação outras superfícies e irregularidades no pavimento, tal como uma depressão no pavimento, por exemplo. Para tanto bastaria efetuar as devidas alterações nos grupos de funções contidos nos conjuntos.

Outra extensão deste trabalho seria incluir graus de liberdade ausentes nesta simulação, criando assim um modelo superior, o que permitiria, por exemplo, a análise do comportamento da suspensão sobre superfícies tridimensionais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, G. L. do **Frota brasileira de veículos em circulação**. Empresometro Inteligência de Mercado, 2017.

ANDRADE, S. S. C. de A.; JORGE, M. H. P. de M. **Internações hospitalares por lesões decorrentes de acidente de transporte terrestre no Brasil, 2013: permanência e gastos**. Epidemiologia e Serviços de Saúde, 26, 31-38, 2017.

ASSANIS, D. **Validation and Use of SIMULINK Integrated, High Fidelity, Engine-In-Vehicle Simulation of the International Class VI Truck** - Automotive Research Center, 2000.

ASTROM, K. J.; KLEIN, R. E.; LENNARTSSON, A. **Bicycle dynamics and control: adapted bicycles for education and research**. IEEE Control Systems, 25(4), 26-47, 2005.

AUDENINO, A. L.; BELINGARDI, G. **Modelling the dynamic behaviour of a motorcycle damper**. Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Torino, 1995.

AZIZ, E.; ESCHE, S.; CHASSAPIS, C. **Enhancing the learning experience using simulation and experimentation to teach mechanical vibrations**. American Society for Engineering Education, 2007.

BAGNATO, V. S. **Problemas Interessantes em Física: O Quebra-Molas**. Instituto de Física de São Carlos. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 20, nº 4, dezembro de 2006.

BARBOSA, A. de L. S. **Modelagem e controle não linear da dinâmica de um veículo terrestre**. Pontifícia Universidade Católica, 2003.

BARTON, D. C.; FIELDHOUSE, J. D. **Suspension Systems and Components**. In Automotive Chassis Engineering (pp. 111-214). Springer, Cham, 2018.

BERTOCCO, J. Ê. **Curso de Mecânica de Motocicletas**. Moto Honda da Amazônia – 2006.

BONCI, A.; DE AMICIS, R., LONGHI, S.; SCALA, G. A.; ANDREUCCI, A. **Motorcycle lateral and longitudinal dynamic modeling in presence of tyre slip and**

**rear traction.** In *Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, 21st International Conference on (pp. 391-396). IEEE, 2016.

BROENINK, J. F. **Introduction to physical systems modelling with bond graphs.** SiE Whitebook on Simulation Methodologies, 31, 1999.

CARRATÙ, M.; PIETROSANTO, A.; SOMMELLA, P.; PACIELLO, V. **Velocity prediction from acceleration measurements in motorcycle suspensions.** In *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, IEEE International (pp. 1-6), 2017.

CHANDRA, S. **Motorcycle and Its Aesthetics: A Glimpse in History.** In *Aesthetics: Quantification and Deconstruction*, pp. 9-25. Springer, Singapore, 2018.

COSSALTER, V. **Motorcycle dynamics.** 2006.

COSTA, S. O. L. CASTELO BRANCO V.; FREITAS E. F. **Avaliação da aderência pneu-pavimento para diferentes tipos de pavimentos utilizando o international friction index (IFI).** XXXI Congresso da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em transporte (ANPET), pp. 1-12, 978-85-87893-32-8, 2017.

COX, B. L.; MUTEL, C. L. **The environmental and cost performance of current and future motorcycles.** *Applied Energy*, 212, 1013-1024, 2018.

DE JESUS, V. F.; SIQUEIRA, L. das GRAÇAS; FERREIRA, A. S. de S., ROCHA, F. C.; ALVES, A. P. de O. N. **Causas associadas aos acidentes de trânsito envolvendo motociclistas: revisão integrativa.** *Revista de Enfermagem do Centro-Oeste Mineiro*, p7, 2017.

DEMBOSKI, F. R. **Estudo para Utilização de Componentes de Suspensão de Motocicleta em Veículo Minimalista Urbano.** Universidade Federal De Santa Catarina – UFSC. Centro de Engenharias da Mobilidade – CEM, 2014.

DIONÍSIO, H. J. **Análise da influência das características do pneu na estabilidade do fenômeno shimmy em motocicletas.** 2016.

DIXON, J. C. **The shock absorber handbook.** John Wiley & Sons, 2008.

DUARTE, I. S.; NA, A. **Análise dos acidentes com motociclistas na cidade de São José dos Campos-SP.** UNIVERSIDADE PAULISTA, 2014.

DUYM, S.; STIENS, R.; REYBROUCK, K. **Evaluation of Shock Absorber Models.** Department of Electrical Engineering, Vrije Universiteit Brussel, 2007.

ELS, P. S.; GROBBELAAR, B. **Heat transfer effects on hydropneumatic suspension systems.** Journal of terramechanics, 36(4), 197-205, 1999.

FISCHER, C. M. **Combat Vehicle Firing Stability (Active Suspension).** United States Army Ordnance Tank-Automotive Command, Detroit, Michigan, 2004.

FOALE, T. **Motorcycle Handling and Chassis Design, The Art and Science.** Tony Foale Dynamics, 2002. ISBN 84-933286-3-4.

FREIRE, R. T. DE S. **Trânsito: um problema urbano.** Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica, 2011.

GENTA, G., CAMPANILE, P. **An approximated approach to the study of motor vehicle suspensions with nonlinear shock absorbers.** Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino, 1989.

GISSINGER, G. L. **Modelling a motor vehicle and its braking system.** Laboratoire M.I.'t.M., Moddlisation et Identification en Automatique et en Mdcanique, UniversiM de Haute Alsace, 2000.

GRANDA, J. J. **The role of bond graph modeling and simulation in mechatronics systems: An integrated software tool: CAMP-G, MATLAB-SIMULINK.** Mechatronics, 12(9-10), 1271-1295, 2002.

IBITOYE, B.; HAMOUDA, A. M. S.; WONG, S. V.; RADIN, R. S. **Simulation of motorcyclist's kinematics during impact with W-Beam guardrail.** Advances in engineering Software, 37(1), 56-61, 2006.

JENNINGS, G. **A study of motorcycle suspension damping characteristics.** University of New South Wales, 2018.

JIMENEZ, F. LOPEZ, J. M.; SÁNCHEZ, J.; COBOS, P. **Simulation and Testing of Hybrid Vehicle Function as Part of a Multidisciplinary Training.** University of Madrid, 2009.

KARAYANNIS, I., VAKAKIS, A. F. and GEORGIADES, F. **Vibro-impact attachments as shock absorbers.** Proc. IMechE Vol. 222 Part C: J. Mechanical Engineering Science, 2008.

KARNOPP, D. **Design principles for vibration control systems using semi-active dampers.** Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 112(3), 448-455, 1990.

KAWAGUCHI, H. **Comparação da análise de conforto de frenagem subjetiva versus objetiva de um veículo de passeio.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.

KOENEN, C.; PACEJKA, H. B. **The influence of frame elasticity, simple rider body dynamics and tyre moments on free vibrations of motorcycles in curves.** in the Dynamics of Vehicles on Roads (pp. 53-65). Routledge, 2018.

KOOIJMAN, J. D. G.; MEIJAARD, J. P.; PAPADOPOULOS, J. M.; RUINA, A.; SCHWAB, A. L. **A bicycle can be self-stable without gyroscopic or caster effects.** Nonlinear Dynamics, 9(2), 377-386, 2013.

LEAR, G. **Motorcycle Mechanics.** Prentice-Hall Inc, 1977.

LIGUORI, C.; PACIELLO, V.; PAOLILLO, A.; PIETROSANTO, A. and SOMMELLA, P. **Characterization of Motorcycle Suspension Systems: Comfort and Handling Performance Evaluation.** Department of Industrial Engineering, University of Salerno, 2013.

LIMA, A. **A história sobre duas rodas.** Disponível em: <<http://www.viagemdemoto.com.br>>. Acesso em: 19 de novembro de 2018.

LIMEBEER, D. J. N.; SHARP, R. S. and EVANGELOU, S. **The stability of motorcycles under acceleration and braking.** Department of Electrical and Electronic Engineering, Imperial College of Science, Technology and Medicine, 2001.

LIMEBEER, D. J. N.; SHARP, R. S. **Single-track vehicle modeling and control.** IEEE Control Systems Magazine, 2006.

LINDAU, L. A. **Impactos da redução dos limites de velocidade em áreas urbanas.** Cartilha. (2015).

MARGOLIS, D. **A bond graph model incorporating sensors, actuators, and vehicle dynamics for developing controllers for vehicle safety.** Journal of the Franklin Institute 338 21±34 - Department of Mechanical and Aeronautical Engineering, University of California, 2001.

MARIM, D. **Estratégias na indústria de motocicletas: um estudo exploratório do setor de motocicletas brasileiro.** Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, 2010.

MARTINS, G. N.; NETO, M. S.; MEGGIOLARO, M. A. **Dynamic models of bicycles and motorcycles using power flow approach.** 2016.

MAVROUDAKIS, B.; EBERHARD, P. **Analysis of alternative front suspension systems for motorcycles.** Institute of Engineering and Computational Mechanics, University of Stuttgart, 2007.

MEIJAARD, J. P.; PAPADOPOULOS, J. M.; RUINA, A.; SCHWAB, A. L. **Linearized dynamics equations for the balance and steer of a bicycle: a benchmark and review.** In Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences (Vol. 463, No. 2084, pp. 1955-1982). The Royal Society, (2007, August).

MONROE – The Monroe Safety Triangle, 2005.

MORAES, E. de O. **Espaço e indústria: um estudo sobre a produção e distribuição de motocicletas Honda no Estado do Amazonas.** Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, 2016.

MOURA, E. D. A. **Estudo de uma Suspensão Veicular Passiva, Semi-Ativa e Ativa.** Universidade Federal de Engenharia de Itajubá - UNIFEI, Itajubá, MG, 2005.

NATALIER, K. **Motorcyclists' interpretations of risk and hazard.** Journal of Sociology, School of Social Sciences, University of Queensland, 2004.

NAUDE, A. F.; SNYMAN, J. A. **Optimisation of road vehicle passive suspension systems. Part 1. Optimisation algorithm and vehicle model.** Applied Mathematical Modelling, 27(4), 249-261, Project: Mechanical Engineering, 2003.

PAKDIL, F.; LEONARD, K. M. **Implementing and sustaining lean processes: the dilemma of societal culture effects.** International Journal of Production Research, 55(3), 700-717, 2017.

PAKKALA, John E. **A vehicle dynamics design and simulation tool for capstone projects.** American Society for Engineering Education, 2011.  
PERAZZO, J. F. **Obtenção da resposta dinâmica de uma motocicleta trafegando em diferentes perfis de pista.** Ministério da educação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Departamento de Engenharia Mecânica. 2018.

RAJAMANI, R. **Vehicle dynamics and control.** Springer Science & Business Media, 2011.

RAMIREZ, C. M. **Dynamic Analysis of Alternative Suspension Systems for Sport Motorcycles.** (Doctoral dissertation, City University London), 2015.

RAO, S. S. **Vibrações Mecânicas.** Pearson-Prentice Hall, 2008.

ROCKSHOX, **Suspension Theory Guide.** 2014. Disponível em: <<http://www.sram.com>>. Acesso em: 17 de dezembro de 2018, 20h45min.

RÖBGER, L.; LENNÉ, M. G. **Increasing motorcycle conspicuity: design and assessment of interventions to enhance rider safety.** CRC Press, 2017.

RYABOVA, I. V.; NOVIKOVA, V. V.; POZDEEV, A. V. **Efficiency of Shock Absorber in Vehicle Suspension.** International Conference on Industrial Engineering, ICIE. Volgograd State Technical University, 2016.

SARAIVA, I. B. **Estudo de projeto de motocicleta elétrica.** (Doctoral dissertation, Universidade Federal do Rio de Janeiro), 2016.

SHARP, R. S. **Stability, control and steering responses of motorcycles.** Vehicle system dynamics, 35(4-5), 291-318, 2001.

SHARP, R. S. **The Influence of the Suspension System on Motorcycle Weave-mode Oscillations.** Department of Mechanical Engineering, University of Leeds, Leeds, LS2 9JT, 2007.

SHEN, S.; WANG, J.; SHI, P.; PREMIER, G. **Nonlinear dynamics and stability analysis of vehicle plane motions.** Vehicle System Dynamics, 45(1), 15-35, 2007.

SILVA, R. F.; PAIVA, A. R. D. O. **Incidência de acidentes com motocicletas no Brasil: revisão integrativa da literatura.** Revista Uningá, 51(3), 2018.

SOUZA, A. F. **Modelagem, simulação e análise de desempenho do controle fuzzy para uma suspensão veicular ativa.** Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

SPANOS, P.; PIRROTTA, A.; MARINO, F., ROBLEDO, R. L. A. **Stochastic analysis of motorcycle dynamics.** Departments of Mechanical Engineering, Rice University, 2011.

SPERANZA NETO, M. **Módulo de Modelagem e Análise de Sistemas Dinâmicos.** UFAM/CPG-FT - Julho 2005.

SZÁNTÓ, A., **Vehicle Modelling and Simulation in Simulink.** International Journal of Engineering and Management Sciences (IJEMS) Vol. 4., 2019.

TAN, K. S.; WONG, S. V.; RADIN UMAR, R. S.; HAMOUDA, A. M. S.; GUPTAC, N. K. **An experimental study of deformation behaviour of motorcycle front wheel-tyre assembly under frontal impact loading.** Department of Mechanical and Manufacturing, Faculty of Engineering, University Putra Malaysia - July 2005.

TANELLI, M.; CORNO, M. and SAVARESI, S. M. **Modelling, simulation and control of two-wheeled vehicles.** Informazione e Bioingegneria, Politecnico di Milano, 2014.

TAO, S. U. N.; FAN, Y. U.; YOU, Z. O. U. **Investigation on Non-linear Characteristics of Hydropneumatic Suspension Modeling and Simulation for Engineering Vehicles.** Acta Simulata Systematica Sinica, 1, 055, 2005.

VASCONCELOS, E. A. **O que é trânsito.** Brasiliense, 2017.

VLIET, M. V.; SANKAR, S. **Computer-Aided Analysis and Experimental Verification of a Motorcycle Suspension.** Department of Mechanical Engineering, Concordia University, 1983.

WU, D.; HOURS, M.; MARTIN, J. L. **Risk factors for motorcycle loss-of-control crashes.** Traffic injury prevention, 19(4), 433-439, 2018.  
YUE, W. **Investigation of Semi-Active Hydro-Pneumatic Suspension for a Heavy Vehicle Based on Electro-Hydraulic Proportional Valve.** World Journal of Engineering and Technology, 2017, 5, 696-706, 2017.

**ZHANG, R. A Comprehensive Review of the Techniques on Regenerative Shock Absorber Systems.** School of Engineering, RMIT University, 2018.