

Ana Carolina Caliman Sório Palmeira

**Caracterização dos Sistemas
Mecânicos em uma Bicicleta**

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA**

Programa de Graduação em
Engenharia Mecânica

Rio de Janeiro
Dezembro de 2015

Ana Carolina Caliman Sório Palmeira

**Caracterização dos Sistemas
Mecânicos em uma Bicicleta**

PROJETO DE GRADUAÇÃO

Projeto apresentado como requisito para obtenção de
grau de Bacharel pelo Programa de
Graduação em Engenharia Mecânica do
Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador

Mauro Speranza Neto

Rio de Janeiro,

Dezembro de 2015

Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Mauro Speranza Neto, e ao aluno de Doutorado, Allan N. de Albuquerque, primeiramente pela disponibilidade, incentivo e orientação desde o início do projeto e, também pelos conselhos e teorias, sempre de grande ajuda.

Aos meus pais, Kátia Caliman Sório e Luiz Cláudio F. Palmeira, que sempre me incentivaram, prezaram pelos estudos e se preocuparam comigo durante todo esse tempo.

A meu namorado, Antônio Cabral C. Fontes, pelo apoio e motivação durante todo esse tempo juntos.

Aos meus amigos do Laboratório de Desenvolvimento de Controle, Lucas Ribeiro, Caio Cavalcante e Marília Assad, que me fizeram seguir em frente, sempre me apoiando e ajudando no que eu precisasse.

Aos amigos de curso da PUC-Rio, que me apoiaram e fizeram parte da minha formação e que vão continuar presentes em minha vida.

A Deus por ter me dado forças e coragem para continuar e concluir este meu sonho.

Ana Carolina Caliman Sório Palmeira

Resumo

Esse projeto de graduação visa a identificação e a determinação de parâmetros físicos de uma bicicleta genérica para ser utilizado como base de estudos futuros sobre a dinâmica da mesma. Foram utilizados instrumentos de medição para a determinação das características geométricas, e foram desenvolvidos testes para a determinação de distribuição de massa, valores inerciais, transmissão de potência e de frenagem para uma bicicleta convencional.

Este trabalho demonstra de forma simplificada e breve a dinâmica (lateral e longitudinal) de uma bicicleta, para mostrar a aplicação dos parâmetros que serão obtidos e estudados, e descreve objetivamente seus cinco subsistemas: transmissão, frenagem, direção, suspensão e estrutura, onde os parâmetros significativos de cada subsistema são medidos e/ou calculados.

Para uma melhor análise dos resultados obtidos nos testes de medição do centro de gravidade e de momento de inércia, um modelo detalhado em CAD da bicicleta em estudo foi feito para se obter valores que possam ser comparados com os obtidos nos testes experimentais.

Palavras-chave: bicicleta, caracterização experimental, modelo computacional

Abstract

This graduation project is aimed at the identification and determination of physical parameters of a generic bicycle to be used as a basis for future studies on the dynamics of such a bicycle. Measuring instruments were used for determining geometric characteristics and tests were developed for determining mass distribution, inertia values, power transmission and braking parameters of a conventional bicycle.

This study displays the dynamics of a bicycle (laterally and longitudinally) in a simplified and concise fashion as well as the application of the parameters that are to be obtained and studied. It also objectively describes the five subsystems involved: transmission, braking, steering, suspension and structure, where significant parameters of each subsystem are measured and/or calculated.

For a better analysis of the results obtained from the measuring tests of both the center of gravity and the moment of inertia, a detailed CAD model of the bicycle was made in order to obtain values that can be compared with those obtained from the experimental tests.

Keywords: bicycle, experimental characterization, computational model

Índice

| | | |
|-------|---|----|
| 1. | Introdução | 10 |
| 1.1 | Objetivo | 10 |
| 1.2 | Motivação | 10 |
| 1.3 | Descrição do problema | 11 |
| 1.4 | Organização do trabalho | 13 |
| 2 | Dinâmica longitudinal e lateral | 15 |
| 2.1 | Introdução | 15 |
| 2.2 | Dinâmica lateral | 15 |
| 2.2.1 | Apresentação dos parâmetros | 16 |
| 2.2.2 | Modelo cinemático..... | 18 |
| 2.3 | Dinâmica longitudinal..... | 20 |
| 2.3.1 | Apresentação dos parâmetros | 20 |
| 2.3.2 | Modelo cinemático..... | 22 |
| 3 | Descrição da geometria dos sistemas mecânicos | 24 |
| 3.1 | Introdução | 24 |
| 3.2 | Sistema de transmissão | 24 |
| 3.2.1 | Descrição dos componentes | 25 |
| 3.2.2 | Medição dos parâmetros significativos..... | 26 |
| 3.3 | Sistema de frenagem..... | 28 |
| 3.3.1 | Descrição dos componentes | 28 |
| 3.3.2 | Medição dos parâmetros significativos..... | 29 |
| 3.4 | Outros sistemas | 31 |
| 3.5 | Modelagem em CAD | 34 |
| 4 | Caracterização dos sistemas mecânicos..... | 41 |
| 4.1 | Introdução | 41 |
| 4.2 | Obtenção das coordenadas do centro de gravidade | 41 |
| 4.2.1 | Descrição do procedimento..... | 41 |
| 4.2.2 | Resultados experimentais..... | 45 |
| 4.2.3 | Análise de incerteza dos resultados | 48 |
| 4.3 | Obtenção dos momentos de inércia | 52 |
| 4.3.1 | Descrição do procedimento..... | 55 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.3.2 | Momento de inércia de arfagem | 58 |
| 4.3.3 | Momento de inércia de rolagem | 61 |
| 4.4 | Caracterização do sistema de transmissão | 63 |
| 4.5 | Caracterização do sistema de frenagem..... | 64 |
| 4.5.1 | Descrição do procedimento..... | 64 |
| 5 | Conclusão e trabalhos futuros | 67 |
| 5.1 | Conclusão..... | 67 |
| 5.2 | Trabalhos futuros | 68 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 - Evolução da bicicleta..... | 11 |
| Figura 1.2 - Esquema representativo da dinâmica de uma bicicleta | 12 |
| Figura 1.3 - Problema de medição. | 13 |
| Figura 2.1 - Sistemas de coordenadas geral | 16 |
| Figura 2.2 - Sistema de coordenadas a) horizontal e b) vertical | 17 |
| Figura 2.3 - Cinemática lateral de uma bicicleta em curva..... | 19 |
| Figura 2.4 - Sistema de referência, parâmetros geométricos e forças aplicadas na bicicleta. a) Tração e b) Frenagem..... | 21 |
| Figura 3.1 - Componentes do sistema de transmissão. | 25 |
| Figura 3.2 - Conjuntos de engrenagens. a) Traseira (Cassete) e b) Dianteira (Coroa) | 27 |
| Figura 3.3 - Tipos de freio. a) Cantilevers, b) <i>V-Brake</i> e c) Hidráulico..... | 29 |
| Figura 3.4 - Freios a disco da bicicleta em estudo. a) Dianteiro e b) Traseiro..... | 30 |
| Figura 3.5 - Tipos de estrutura de quadros..... | 32 |
| Figura 3.6 - Nome de cada seguimento do quadro da bicicleta. | 32 |
| Figura 3.7 - Principais medidas características da bicicleta. | 33 |
| Figura 3.8 - Garfo da bicicleta. | 34 |
| Figura 3.9 - Guidão da bicicleta com manetes. | 35 |
| Figura 3.10 - Roda dianteira com disco do freio..... | 35 |
| Figura 3.11 - Roda traseira com disco de freio e cassete. | 36 |
| Figura 3.12 - Bateria..... | 36 |
| Figura 3.13 - Quadro da bicicleta..... | 37 |
| Figura 3.14 - Modelagem do quadro da bicicleta..... | 37 |
| Figura 3.15 - Selim..... | 38 |
| Figura 3.16 - Modelagem do selim da bicicleta. | 38 |
| Figura 3.17 - Conjunto pedivela com movimento central e coroa e conjunto pedal..... | 39 |
| Figura 3.18 - Montagem da bicicleta completa 1..... | 39 |
| Figura 3.19 - Montagem da bicicleta completa 2..... | 40 |
| Figura 4.1 - Esquema de forças. | 42 |
| Figura 4.2 - Esquema de forças com uma das rodas erguidas..... | 43 |
| Figura 4.3 - Geometria da bicicleta com roda erguida em detalhe. | 44 |
| Figura 4.4 - Teste 1 | 46 |
| Figura 4.5 - Teste 2 a) Reação roda traseira e b) Reação roda dianteira..... | 47 |
| Figura 4.6 - Medição da projeção da distância entre eixos | 47 |
| Figura 4.7 - Pêndulo composto | 53 |
| Figura 4.8 - Avião e aparato de sustentação dispostos para a determinação dos momentos de inércia. a) Momento de Inércia em X (I_{xx}) e b) Momento de Inércia em Y (I_{yy}). | 56 |
| Figura 4.9 - Avião e aparato de sustentação dispostos para a determinação do momento de inércia em Z (I_{zz})...... | 57 |
| Figura 4.10 - Aparato de sustentação desenvolvido para auxiliar na obtenção dos momentos de inércia de rolagem e de arfagem. | 58 |
| Figura 4.11 - Teste realizado para se obter o período para o cálculo do momento de inércia I_{yy} | 59 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.12 - Momentos I_{yy} (<i>pitch</i>) e I_{zz} (<i>yaw</i>) obtidos no <i>SolidWorks</i> | 60 |
| Figura 4.13 - Teste realizado para se obter o período para o cálculo do momento de inércia I_{xx} | 62 |
| Figura 4.14 - Momento I_{xx} (<i>roll</i>) obtido no <i>SolidWorks</i> | 63 |
| Figura 4.15 - Manetes instrumentadas. | 65 |
| Figura 4.16 - Microcontrolador. | 66 |

Índice de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1 - Parâmetros do modelo dinâmico lateral da bicicleta. | 18 |
| Tabela 2.2 - Listagem parcial dos parâmetros empregados no modelo dinâmico do sistema bicicleta. | 21 |
| Tabela 3.1 - Informações importantes de cada engrenagem | 27 |
| Tabela 4.1 - Medidas relevantes para o teste 1 | 46 |
| Tabela 4.2 - Medidas relevantes para o teste 2 | 48 |
| Tabela 4.3 - Resultados obtidos através dos testes 1 e 2..... | 48 |
| Tabela 4.4 - Incertezas tipo B..... | 50 |
| Tabela 4.5 - Resultados das incertezas de y | 52 |
| Tabela 4.6 - Resultados finais com incertezas | 52 |
| Tabela 4.7 - Medidas obtidas através do teste para momento de inércia I_{yy} | 59 |
| Tabela 4.8 - Resultados obtidos no cálculo experimental do momento de inércia I_{yy} | 60 |
| Tabela 4.9 - Medidas obtidas através do teste para momento de inércia I_{xx} | 61 |
| Tabela 4.10 - Resultados obtidos no cálculo experimental do momento de inércia I'_{xx} | 62 |
| Tabela 4.11 - Relações de transmissão possíveis na bicicleta tratada..... | 64 |
| Tabela 5.1 - Parâmetros adquiridos do modelo dinâmico lateral da bicicleta..... | 67 |
| Tabela 5.2 - Listagem parcial preenchida com os parâmetros que são empregados no modelo dinâmico do sistema bicicleta. | 68 |
| Tabela 5.3 - Parâmetros que serão obtidos através dos testes dinâmicos. | 69 |

1. Introdução

1.1 Objetivo

Neste trabalho foi estudado o sistema mecânico bicicleta, no qual as entradas são os ângulos de esterçamento do guidão, o torque recebido pelos pedais, a força aplicada nas manetes de freio, ângulo de deriva e a inclinação do terreno. Suas dinâmicas são: lateral, longitudinal e vertical e seus subsistemas são: direção, suspensão, transmissão e freios, que por sua vez possuem vários componentes: eixos, amortecedores, mecanismos, engrenagens, corrente, pneus, rodas e outros. Estes, são compostos por elementos básicos como inércias, efeitos de flexibilidade, atritos e outros.

O objetivo deste trabalho é a identificação de parâmetros físicos de uma bicicleta genérica, usando como base o modelo *Brazil Electric* (E-bike confort super 350W 24V15Ah), visando auxiliar no trabalho de doutorado de Assad, M. M. com testes eficazes e consistentes.

1.2 Motivação

As bicicletas apareceram em meados do século XIX e desde então vem sendo estudadas e aperfeiçoadas, sendo utilizadas em todos os lugares do mundo para transporte, exercício e diversão. A evolução da bicicleta ao longo do tempo tem sido um produto de diferentes necessidades, tais como praticidade, facilidade, agilidade e performance. Um bom exemplo são as bicicletas elétricas, que surgiram da necessidade de suplantação dos problemas de mobilidade urbana dentro das grandes cidades, e também do forte apelo por meios de transporte *eco-friendly*, ou seja, que não geram gases do efeito estufa prejudicando o meio ambiente.

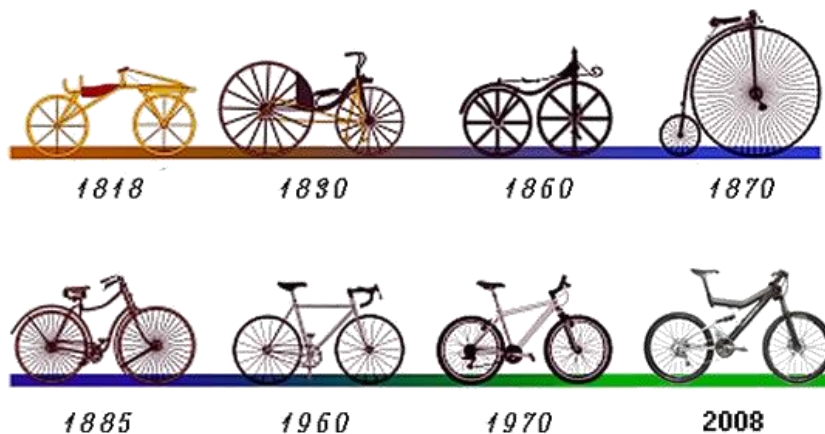


Figura 1.1 - Evolução da bicicleta

Analisando a bicicleta com um olhar mais voltado para engenharia, pode-se dizer que a partir dela o estudo de outros veículos mais complexos se torna mais simples, didático e intuitivo. Tornando-a assim um objeto coringa para estudos de várias disciplinas contidas nos cursos de engenharia mecânica e de controle e automação, como dinâmica, modelagem, controle, elementos mecânicos e seus sistemas e muitos outros.

Acredita-se que o estudo teórico junto com a prática se torna mais prazeroso, dinâmico e atrativo para o estudante, principalmente quando se trata de um objeto tão presente no dia a dia.

1.3 Descrição do problema

Um esquema representativo da dinâmica de uma bicicleta encontra-se representado na Figura 1.2. Nele pode-se observar as entradas do sistema, que são as variáveis de controle, como ângulo de esterçamento e outros que já foram citados na Seção 1.1 e as saídas deste que são: velocidade longitudinal, vertical (*bouce*) e lateral (*sideslip*), as inclinações do corpo da bicicleta: rolagem (*roll*), guinada (*yaw*) e frenagem e aceleração (*pitch*).

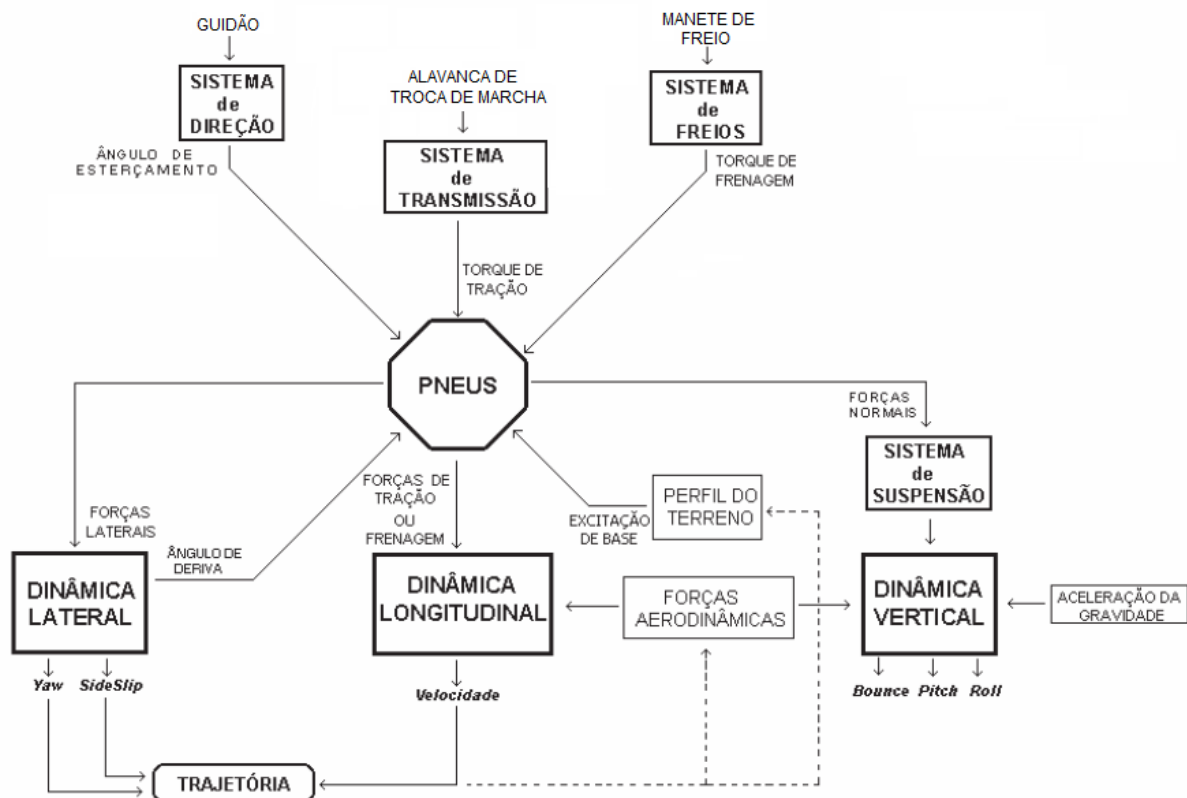


Figura 1.2 - Esquema representativo da dinâmica de uma bicicleta

Alguns problemas básicos podem ser encontrados durante o procedimento de modelagem e uma dificuldade que geralmente acompanha esse procedimento é a determinação dos valores numéricos ou dos próprios modelos que determinam os parâmetros na representação matemática dos sistemas dinâmicos. A identificação pode ajudar na determinação de certos coeficientes, porém a necessidade de se ter um modelo em escala, o protótipo ou o sistema real, para que se possa realizar testes sobre eles é de suma importância.

A identificação pode ser separada em identificação estrutural ou em identificação paramétrica. A identificação estrutural trata da obtenção da topologia do modelo e a identificação paramétrica, que é um dos focos do trabalho, permite determinar os coeficientes destas matrizes a partir de uma estrutura já estabelecida. Este problema é ilustrado na Figura 1.3.



Figura 1.3 - Problema da identificação paramétrica.

Outro problema que também será tratado no texto é o de medição ou instrumentação, esquematizado na Figura 1.4, que permite determinar a entrada, conhecendo-se o sistema e a saída. Uma prática que deve sempre ser empregada por quem realiza medições é utilizar os conceitos da análise de sistemas dinâmicos para compensar possíveis incorreções no sistema de medidas. Por exemplo, conhecidas as distorções provocadas por um determinado instrumento do sistema de medidas, pode-se trabalhar fora da faixa de utilização determinada pelo fabricante com uma boa margem de segurança. (Speranza Neto, M. *et al*,2005)



Figura 1.3 - Problema de medição.

1.4 Organização do trabalho

No Capítulo 2 há uma breve descrição das dinâmicas lateral e longitudinal como forma de mostrar a necessidade da obtenção de certos parâmetros que serão obtidos no decorrer do trabalho. No Capítulo 3 estão descritos todos os sistemas mecânicos e componentes essenciais para

o funcionamento da bicicleta e uma modelagem desta foi feita em CAD, para uma melhor análise dos resultados. No Capítulo 4 são descritos os testes realizados, mostrando seus resultados para determinação experimental de parâmetros e, no Capítulo 5, são apresentadas as sugestões para trabalhos futuros e as conclusões do trabalho.

2 Dinâmica longitudinal e lateral

2.1 Introdução

Um modelo dinâmico detalhado de uma bicicleta é complexo, devido à alguns aspectos que podem ser levados em consideração. A decisão de quais componentes devem ser incluídos no modelo, como se deve tratar a dinâmica de interação entre a roda e o solo e a complexidade que deve ser dada ao modelo do ciclista vai de acordo com o objetivo do estudo.

O objetivo do Capítulo é apresentar de forma simplificada e breve a dinâmica de uma bicicleta, para mostrar a importância dos parâmetros que serão obtidos e estudados neste trabalho. Para isso, algumas premissas terão que ser definidas.

2.2 Dinâmica lateral

Um modelo matemático será apresentado nesta Seção visando a análise do comportamento da bicicleta no plano horizontal, considerando-se suficiente tratar o deslocamento lateral do veículo através de sua cinemática no plano XY, sem deixar de representar as principais características do movimento em curva. É possível perceber a presença do deslocamento longitudinal nesse caso, devido ao movimento ‘para frente’ da bicicleta, porém esse tipo de deslocamento será considerado como parte natural da dinâmica lateral.

Será considerado que a bicicleta consiste de duas partes rígidas: roda dianteira + garfo + guidão e quadro + roda traseira. A influência de outras partes do veículo, como pedais, corrente, amortecedor e freio serão desprezadas. Além disso, considera-se que os pneus não se deformam nem derrapam em suas trajetórias.

2.2.1 Apresentação dos parâmetros

Usando o que foi mostrado em Assad, M. M. (2014), o modelo matemático que descreve a dinâmica de uma bicicleta compreende a equação de movimento no plano horizontal e seu equilíbrio no plano vertical, expostas na Figura 2.1 e em mais detalhes na Figura 2.2. As variáveis do modelo incluem o ângulo de esterçamento dianteiro (δ) do garfo; o ângulo de guinada (ψ) e os ângulos de rolagem do centro de massa (φ), além de outros parâmetros descritos na Tabela 2.1.

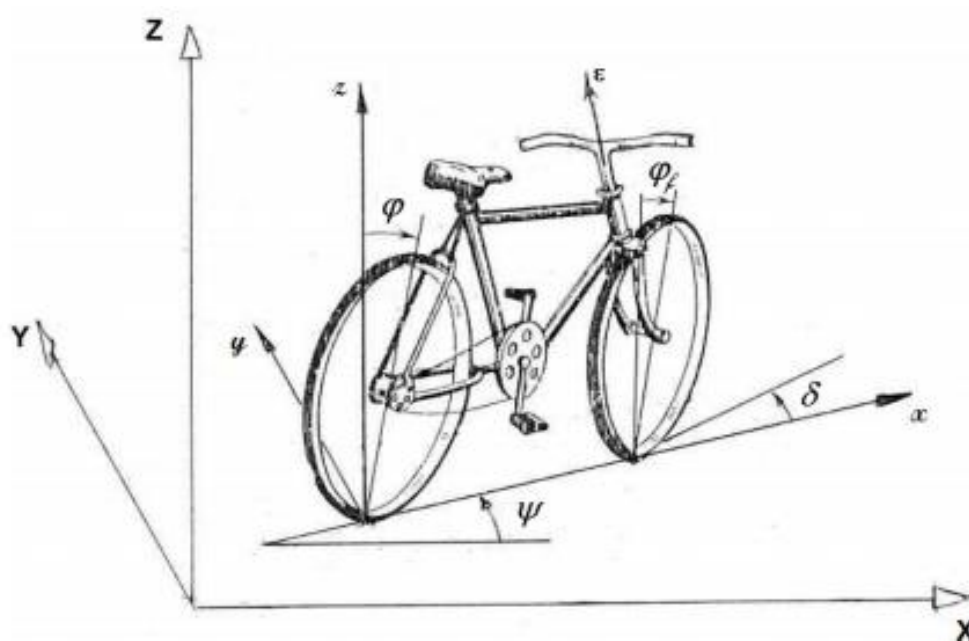


Figura 2.1 - Sistemas de coordenadas geral

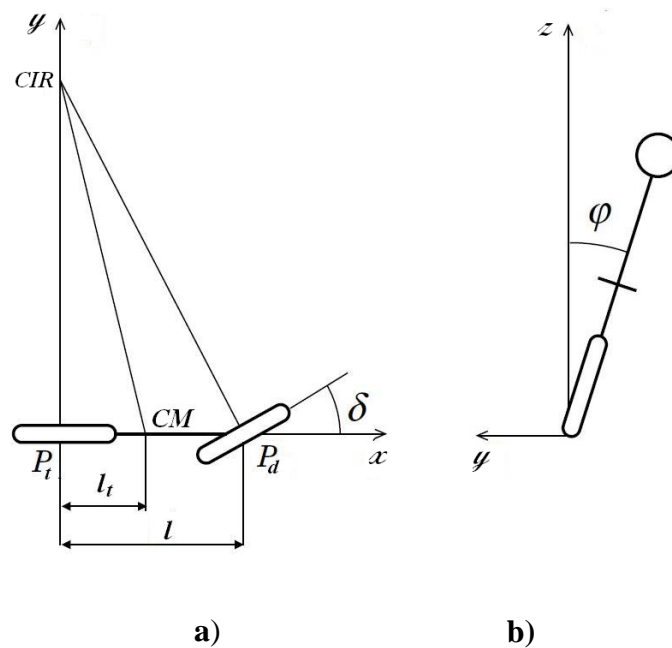


Figura 2.2 - Sistema de coordenadas a) horizontal e b) vertical

Ainda sobre o que Assad, M. M. (2014) descreveu, o sistema de coordenadas inercial tem eixos X, Y e Z e origem em O; o sistema embarcado de eixos x , y e z tem origem no ponto de contato entre a roda traseira e o eixo horizontal. A orientação do plano da roda traseira é definida pelo ângulo de guinada (ψ), que relaciona os eixos X e x ; o eixo z está na vertical e y é perpendicular a x , com sentido positivo para a esquerda da bicicleta.

O ângulo de rolagem da roda traseira, φ , é positivo quando o veículo se encontra inclinado para a direita, conforme mostrado na Figura 2.2 b. O ângulo de rolagem φ_f da roda dianteira é distinto da traseira devido a inclinação do guidão; considera-se que o ângulo do centro de massa é o mesmo da roda traseira.

Por fim, o ângulo de esterçamento dianteiro do garfo (δ), fornecido pelo ciclista, é o ângulo formado na interseção entre os planos das rodas traseira e dianteira e é considerado positivo

quando o veículo está realizando a curva para a esquerda – ver Figura 2.2 a. A Tabela 2.1 traz um resumo das variáveis utilizadas no modelo.

Tabela 2.1 - Parâmetros do modelo dinâmico lateral da bicicleta.

| Parâmetro | Símbolo |
|--|-----------|
| Massa da bicicleta | m |
| Distância entre as rodas (eixos) | l |
| Altura do centro de massa | h |
| Distância entre a roda traseira e o centro de massa | l_t |
| Distância entre a roda dianteira e o centro de massa | l_d |
| Momento de inércia em torno do eixo x | J_x |
| Gravidade | g |
| Ângulo de esterçamento | δ |
| Ângulo de guinada | ψ |
| Ângulo de rolagem | φ |
| Velocidade longitudinal da roda traseira | v |

2.2.2 Modelo cinemático

Segundo Astrom, K. J. (2005), é possível representar a movimentação dinâmica da bicicleta através de um modelo de segunda ordem. Adicionam-se às considerações feitas no Item 2.2.1 que o deslocamento do veículo se dá em um plano horizontal sem ondulações e que a velocidade v da roda traseira é constante. Será usado como variável de controle o ângulo de esterçamento δ realizado pelo ciclista e assume-se que todos os ângulos são pequenos o suficiente tal que as equações diferenciais possam ser linearizadas. A Figura 2.3 traz as variáveis adotadas no equacionamento apresentado na Equação 3.1.

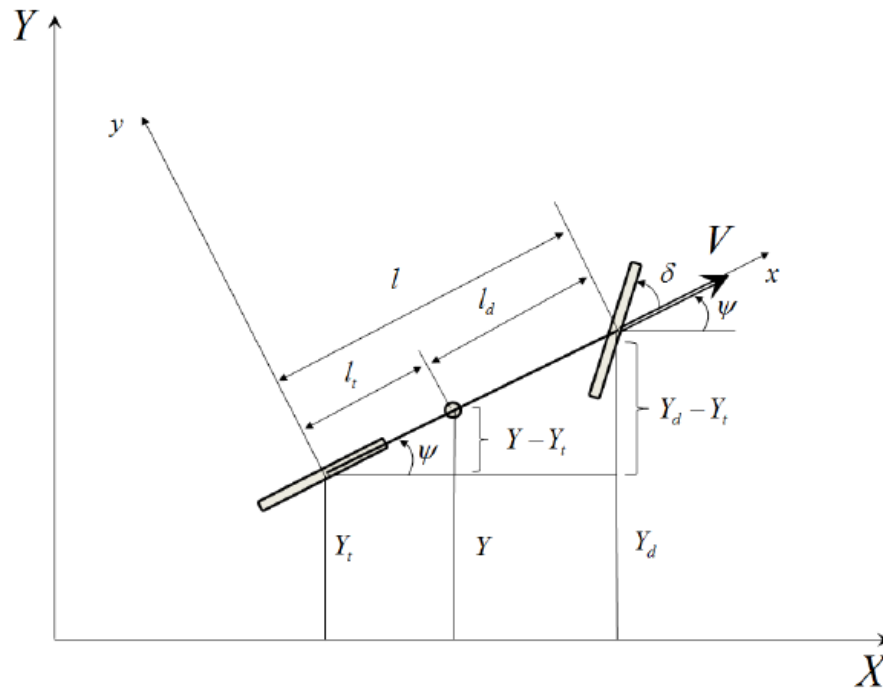


Figura 2.3 - Cinemática lateral de uma bicicleta em curva

O ângulo de guinada ψ e o deslocamento lateral global do centro de massa da bicicleta Y podem ser determinados geometricamente. A Equação 2.1 traz o modelo de movimento horizontal já linearizado, ou seja, os cossenos dos ângulos são aproximadamente 1 e o seno pode ser considerado igual ao próprio ângulo; a Equação 2.2 mostra o resultado das equações linearizadas.

$$\begin{cases} \text{sen}(\psi) = \frac{Y_d - Y_t}{l} \\ \frac{Y - Y_t}{l_t} = \frac{Y_d - Y_t}{l} \\ \dot{Y}_d = \frac{v}{\cos \delta} \text{sen}(\delta + \psi) \\ \dot{Y}_t = v \text{sen}(\psi) \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{sen}(\delta) = \delta \\ \cos(\delta) = 1 \\ \text{sen}(\psi) = \psi \\ \cos(\psi) = 1 \end{matrix} \quad \begin{cases} \psi = \frac{Y_d - Y_t}{l} \\ Y = \frac{Y_d l_t + Y_t l_d}{l} \\ \dot{Y}_d = v(\delta + \psi) \\ \dot{Y}_t = v\psi \end{cases} \quad (2.1)$$

$$\begin{cases} \dot{\psi} = \frac{Y_d - Y_t}{l} = \frac{v}{l} \delta \\ \dot{Y} = \frac{Y_d l_t + Y_t l_d}{l} = \frac{v l_t}{l} \delta + v\psi \end{cases} \quad (2.2)$$

2.3 Dinâmica longitudinal

Assim como na dinâmica lateral, na longitudinal também será apresentado um modelo matemático. Visando a análise do comportamento da bicicleta durante sua variação de aceleração, velocidade e deslocamento ao longo do tempo. Speranza Neto, M. (2013) propôs um modelo matemático no qual estão incluídos todos os componentes e efeitos fundamentais para análise que se deseja realizar. As hipóteses consideradas nesse modelo encontram-se listadas:

- bicicleta equilibrada (verticalmente estável);
- movimento ocorre em terreno perfeitamente liso, sem qualquer perturbação;
- todos os eixos do sistema de transmissão e cabos do sistema de freios são rígidos;
- não há deslizamento no contato do pneu traseiro com o solo na tração;
- não há travamento das rodas durante a frenagem;
- não há perda de contato do pneu com o solo durante a frenagem ou tração;
- sistema de freios representado de forma simplificada.

2.3.1 Apresentação dos parâmetros

De acordo com o que Speranza Neto, M. (2013) fez, nas condições de tração Figura 2.4 a e de frenagem Figura 2.4 b, considerando nos eixos Z e Y apenas o equilíbrio estático, ou seja, quando não há dinâmica envolvida - as forças normais são “instantâneas”. Como se pode observar na Figura 2.4, as constantes do modelo que precisam ser pré-definidas incluem as coordenadas do centro de massa, distância entre eixos, coeficiente de atrito e muitos outros. A Tabela 2.2 descreve a maioria dos parâmetros (com a simbologia adotada) em unidade SI empregados no modelo desenvolvido, cujo os valores numéricos são necessários para a resolução e análise da dinâmica longitudinal do sistema bicicleta.

Tabela 2.2 - Listagem parcial dos parâmetros empregados no modelo dinâmico do sistema bicicleta.

| Parâmetro | Símbolo |
|---|--------------------|
| Massa (quadro, rodas-pneus-etc + condutor) | m |
| Massa do conjunto roda-pneu dianteiro | m_d |
| Massa do conjunto roda-pneu traseiro | m_t |
| Raio efetivo pneu-roda dianteiro (contato com o solo) | r_d |
| Raio efetivo pneu-roda traseiro (contato com o solo) | r_t |
| Raio efetivo dos pedais | r_p |
| Relações de transmissão coroa-pinhão ($i =$ marchas) | $N_i, i=1,\dots,N$ |
| Eficiência do sistema de transmissão | η |
| Distância do eixo dianteiro ao CM (bicicleta + condutor) | l_d |
| Distância do eixo traseiro ao CM (bicicleta + condutor) | l_t |
| Altura do CM (bicicleta + condutor) em relação ao solo | h |
| Coefficiente de resistência ao rolamento nos pneus | μ_R |
| Coefficiente de atrito estático pneu-solo (limite de aderência) | μ |
| Coefficiente de dissipação no mancal da roda dianteira | b_d |
| Área de seção reta do condutor (em uma posição) | S |
| Coefficiente de arrasto do corpo do condutor (em uma posição) | C_D |
| Massa específica do ar (ao nível do mar) | ρ |
| Aceleração da gravidade | g |

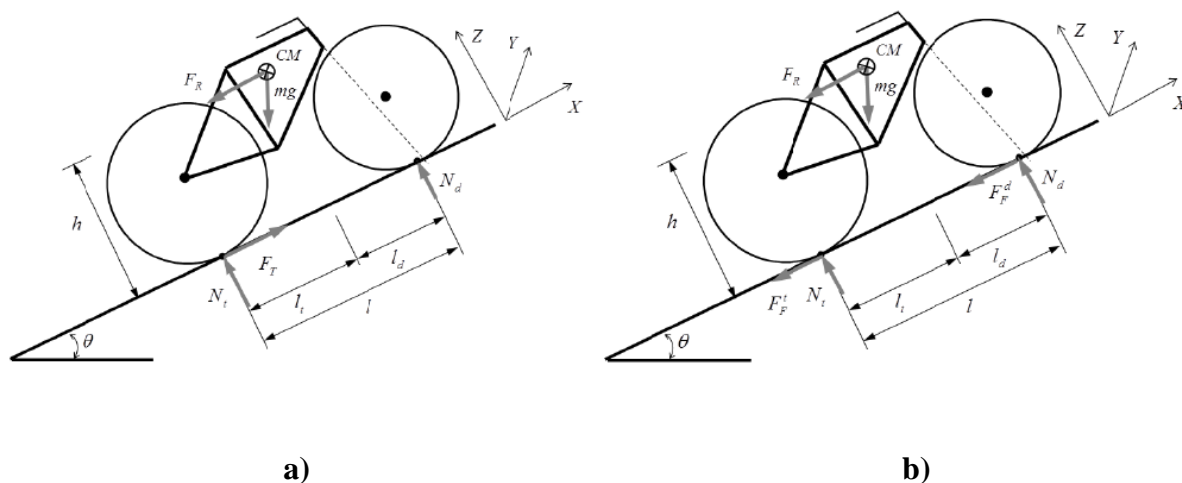


Figura 2.4 - Sistema de referência, parâmetros geométricos e forças aplicadas na bicicleta.
a) Tração e b) Frenagem

2.3.2 Modelo cinemático

Ainda sobre Speranza Neto, M. (2013), as equações que regem o comportamento de frenagem da bicicleta são as encontradas na Equação 2.3, de modo a satisfazer a hipótese de sistema de freios simplificado. Onde δ_d e δ_t são, respectivamente, os comandos dos freios dianteiro e traseiro dados pelo condutor, e responsáveis pelas forças de frenagem nas rodas. Outros parâmetros envolvidos neste equacionamento que anteriormente não foram citados são N_d e N_t , que, respectivamente, são as normais dianteira e traseira no contato do pneu com o solo. Neste caso, os comandos δ_d e δ_t podem variar entre 0 e 1, de acordo com a hipótese de não travamento das rodas ou a de não perda do contato pneu com solo, e qualquer valor que assumam não deve levar à ultrapassagem do limite.

$$\begin{cases} F_F^d = (\mu \cdot N_d) \delta_d \\ F_F^t = (\mu \cdot N_t) \delta_t \end{cases} \quad (2.3)$$

Supondo que o torque T_p é dado (ou conhecido), de acordo com as hipóteses de sistema de transmissão e freios rígidos e não deslizamento no contato pneu-solo, e considerando as respectivas inércias (dos pedais, engrenagens, e roda traseira) e efeitos de dissipação nos mancais, chega-se a Equação 2.4. E, de acordo com o sistema de referências e relações geométricas mostradas na Figura 2.4 as relações que regem o comportamento da bicicleta se encontram descritas na Equação 2.5. As forças de resistência ao movimento que compõe a força F_R encontram-se descritas na Equação 2.6.

$$F_T = \frac{1}{r_t} \left[N_i T_p - \frac{\dot{v}}{r_t} (J_p N_i^2 + J_t) - \frac{v}{r_t} (b_p N_i^2 - b_t) \right] \quad (2.4)$$

$$\begin{cases} \sum F_x = m \cdot \dot{v} \\ \sum F_y = 0 \\ \sum F_z = 0 \end{cases} \quad \therefore \quad \begin{cases} m \cdot \dot{v} = F_T - F_R - F_F^t - F_F^d \\ N_t + N_d - m \cdot g \cdot \cos \theta = 0 \\ N_t l_t - N_d l_d + (F_F^t + F_F^d - F_T - F_{aero} - F_{acl}) \cdot h = 0 \end{cases} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} F_R &= F_{aero} + F_{rest. \text{ ao rolamento}} + F_{active} + F_{carga \text{ roda dianteira}} \\ &= \frac{1}{2} \rho C_D S v^2 + \mu_r (N_D + N_t) + mg \sin \theta + \frac{1}{r_d} \left(J_d \frac{1}{r_d} \dot{v} + b_d \frac{1}{r_d} v \right) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Assim, manipulando-se as relações apresentadas nas Equações 2.4 a 2.6, chega-se a um modelo matemático que caracteriza a dinâmica longitudinal da bicicleta, tendo como entradas o torque imposto pelo condutor nos pedais e os comandos nos manetes dos freios, e saídas a aceleração, velocidade e deslocamento do veículo. Esse modelo é apresentado na Equação 2.7, onde m_E , b_E , N_t e N_d encontram-se descritos na Equação 2.8.

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = \frac{1}{m_E} \left(\frac{N_i}{r_t} T_p - b_E v - \frac{1}{2} \rho C_D S v^2 - (\mu_r + \mu \delta_d) N_d - (\mu_r + \mu \delta_t) N_t - mg \sin \theta \right) \\ \frac{dx}{dt} = v \end{cases} \quad (2.7)$$

$$\begin{cases} m_E = m + \frac{N_i^2}{r_t^2} J_p + \frac{1}{r_t^2} J_t + \frac{1}{r_d^2} J_d \\ b_E = \frac{N_i \dot{N}_i}{r_t^2} J_p + \frac{N_i^2}{r_t^2} b_p + \frac{1}{r_t^2} b_t + \frac{1}{r_d^2} b_d \\ N_d(t) = \frac{mg (\cos \theta (l_t + \mu \delta_t h) - \sin \theta h) - \frac{N_i}{r_t} T_p h - \frac{1}{2} \rho C_D A v^2 h}{(l_t + l_d + \mu (\delta_t - \delta_d) h)} \\ N_t(t) = \frac{mg (\cos \theta (l_d + \mu \delta_d h) - \sin \theta h) - \frac{N_i}{r_t} T_p h - \frac{1}{2} \rho C_D A v^2 h}{(l_t + l_d + \mu (\delta_t - \delta_d) h)} \end{cases} \quad (2.8)$$

3 Descrição da geometria dos sistemas mecânicos

3.1 Introdução

Uma bicicleta é tipicamente formada por cinco subsistemas: transmissão, frenagem, direção, suspensão e estrutura. O sistema de transmissão é composto por um conjunto de componentes responsáveis por conduzir um veículo. A força que o ciclista faz no pedal é transformada no torque recebido pelas rodas da bicicleta fazendo assim com que esta saia da inércia. Já o sistema de frenagem é composto por um conjunto de componentes responsáveis pela parada ou redução da velocidade.

Além desses principais sistemas também existem outros três, o sistema de suspensão, o sistema de direção e a estrutura que serão descritos na Seção 3.4. Neste Capítulo será apresentada uma breve descrição dos sistemas presentes em uma bicicleta ordinária e seus componentes.

3.2 Sistema de transmissão

Uma transmissão tradicional é composta por alavanca de troca de marcha, cabos de aço, movimento central, conjunto de engrenagens dianteira e traseira, pedivela, pedal, corrente, câmbio dianteiro e câmbio traseiro. No caso da bicicleta em questão, há um conjunto de motorização elétrica que envolve os seguintes componentes: um motor de corrente AC, uma engrenagem solidária ao lado do conjunto de engrenagens dianteiras originais e uma corrente que liga o motor a esta engrenagem solidária. Todo esse conjunto que faz parte da motorização elétrica não será analisado no projeto, dado que o objetivo é caracterizar uma bicicleta comum.

3.2.1 Descrição dos componentes

O movimento central fica localizado na parte central inferior do quadro (Figura 3.1 nº 9). O movimento central é uma peça que une um eixo e dois rolamentos, aos quais é acoplada a pedivela (Figura 3.1 nº 6), que por sua vez são braços onde ficam presos os pedais e o conjunto de engrenagens dianteira da bicicleta, conhecido como coroa. A pedivela pode ter diferentes comprimentos, quanto maior o braço, maior será o momento passado para a coroa na pedalada. Esse tamanho vai de acordo com o tamanho das coroas e das características físicas do ciclista. Já os pedais são um suporte para o pé do ciclista e é também onde se aplica a força para fazer a bicicleta andar.



Figura 3.1 - Componentes do sistema de transmissão.

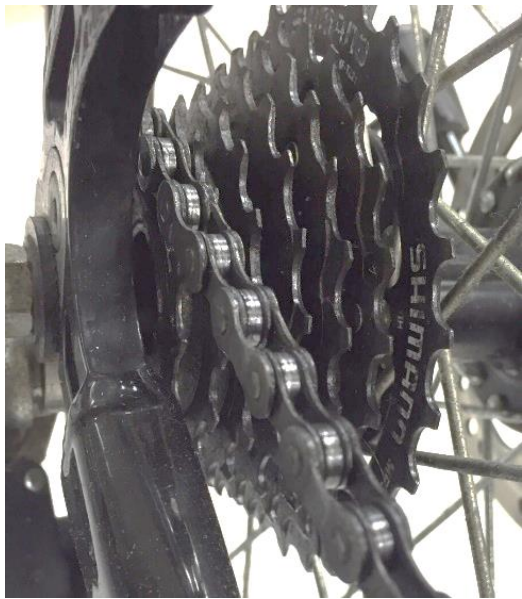
A coroa que pode ser vista na Figura 3.1 nº 3, é composta por engrenagens presas à pedivela, que é responsável pela transmissão de potência para a corrente. A corrente, Figura 3.1 nº 1, liga a coroa ao conjunto de engrenagens traseira, mais conhecido como cassete e faz a transferência de torque entre engrenagens traseiras e dianteiras. O cassete ilustrado na Figura 3.1 nº 7, fica preso no cubo traseiro e pode possuir até 11 engrenagens, sendo os mais populares os de 7 a 10 engrenagens. Uma maior quantidade de engrenagem resulta numa maior possibilidade de combinações com a coroa, que normalmente tem 1, 2 ou 3 engrenagens.

Os câmbios traseiro e dianteiro são responsáveis pela troca de marchas na bicicleta. O câmbio traseiro (Figura 3.1 nº5) fica localizado embaixo do cassete e preso ao final do quadro da bicicleta, enquanto o dianteiro (Figura 3.1 nº4), fica preso ao tubo vertical do quadro, logo acima da coroa. Para o acionamento dos câmbios são utilizadas alavancas de marcha (Figura 3.1 nº8) posicionadas no guidão, que ao serem pressionadas movimentam os câmbios por meio de cabos de aço.

3.2.2 Medição dos parâmetros significativos

Os parâmetros significativos são aqueles que irão influenciar diretamente no sistema de transmissão da bicicleta como o tamanho do braço do pedivela o número de engrenagens da coroa e do cassete, o número de dentes das engrenagens de cada conjunto e o diâmetro externo de cada engrenagem.

Uma imagem do cassete e da coroa da bicicleta em questão encontram-se na Figura 3.2.a e b respectivamente. Através das figuras pode-se observar a presença de 7 engrenagens no conjunto traseiro e de 2 engrenagens no conjunto dianteiro.



a)



b)

Figura 3.2 - Conjuntos de engrenagens. a) Traseira (Cassete) e b) Dianteira (Coroa)

O número de dentes e o diâmetro externo de cada engrenagem também foi obtido e encontram-se na Tabela 3.1, na qual, nomeou-se cada engrenagem para uma melhor identificação. Na Figura 3.2, E1a é a engrenagem de maior diâmetro que pode ser encontrada no cassete e E2a é a engrenagem de maior diâmetro que pode ser encontrada na coroa. O comprimento da pedivela foi medido e é de 172 mm.

Tabela 3.1 - Informações importantes de cada engrenagem

| Cassete | Nº dentes | D _{ext} (mm) |
|---------|-----------|-----------------------|
| E1a | 28 | 114 |
| E2a | 24 | 98 |
| E3a | 22 | 90 |
| E4a | 20 | 82 |
| E5a | 18 | 74 |
| E6a | 16 | 66 |
| E7a | 14 | 58 |

| Coroa | Nº dentes | D _{ext} (mm) |
|-------|-----------|-----------------------|
| E2a | 44 | 180 |
| E2b | 32 | 133 |

3.3 Sistema de frenagem

Os freios são parte essencial de uma bicicleta. São compostos por alavancas (manetes), cabos de aço ou componente hidráulico, calipers (pinças) e pastilhas. Existem vários tipos de sistemas de freio, entre eles os cantilevers, *V-Brakes*, freios hidráulicos e os freios a disco.

3.3.1 Descrição dos componentes

As manetes são alavancas que ficam presas ao guidão e são as interfaces que o ciclista possui para acionar todos os outros componentes do sistema de freio. Esse comando passa pelos cabos de aço e seguem para a pinça de freio que pressiona o aro da bicicleta ou o disco, isso vai depender do tipo de sistema de freio. Essas pinças possuem pastilhas que possuem determinadas propriedades que também dependem do tipo de sistema, estas pastilhas em contato com outra superfície geram atrito suficiente para parar a bicicleta.

Como foi citado na Seção 3.3, existem diversos tipos de sistemas de frenagem. O mais antigo deles são os freios cantilevers (Figura 3.3.a) que já caíram em desuso, mas ainda podem ser encontrados. O sistema dele é bem simples, um cabo de aço é ligado a outro cabo fazendo uma estrutura em "Y" onde cada lado aciona uma das pastilhas. Já os freios *V-Brakes* (Figura 3.3.b) são a evolução dos cantilevers e são mais eficientes. O cabo de aço que sai do manete aciona diretamente os dois braços da pastilha, puxando um lado e empurrando o outro ao mesmo tempo. É um freio bastante utilizado, já que funciona bem e possui baixo custo.

Os freios hidráulicos (Figura 3.3.c) são parecidos com os *V-Brakes*, porém não oferecem muitas vantagens sobre os discos. Eles são um pouco mais pesados que os *V-Brakes*, precisam de um pouco mais de manutenção por serem hidráulicos e o preço é mais alto.

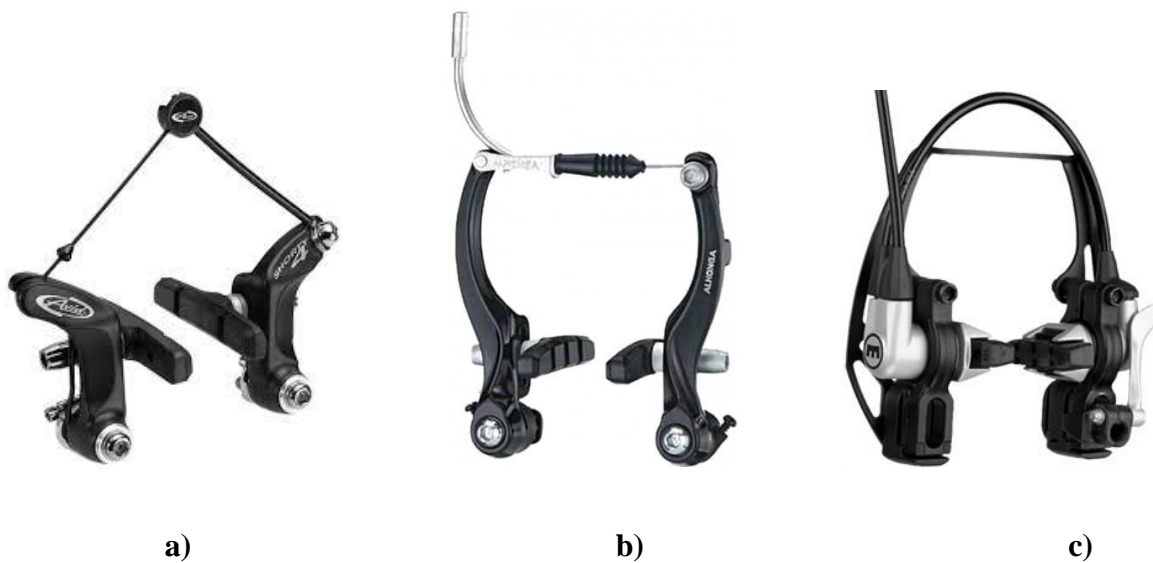


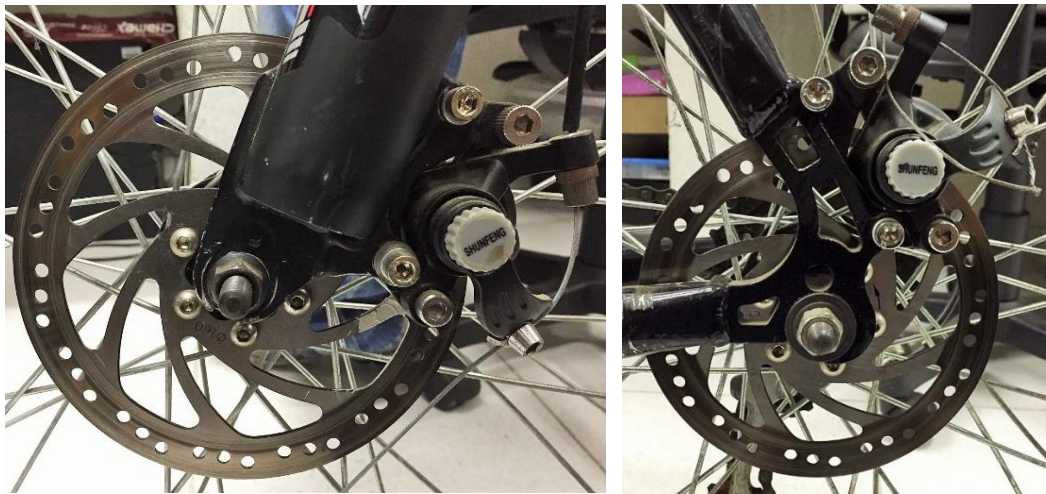
Figura 3.3 - Tipos de freio. a) Cantilevers, b) V-Brake e c) Hidráulico

Os freios a disco seguem um sistema que é considerado o mais eficiente atualmente, é também utilizado em motocicletas. As pinças do freio dianteiro são fixadas na suspensão da bicicleta ou no garfo, e os traseiros no quadro. As pinças abrigam os pistões que têm como função pressionar as pastilhas contra os discos. Sua principal vantagem é que os freios não entram em contato com o aro, portando se algo acontecer com o aro, o freio não será prejudicado.

3.3.2 Medição dos parâmetros significativos

A bicicleta em análise neste projeto possui um sistema de freio a disco mecânico, onde o acionamento do freio é feito através de cabos de aço. Esse sistema de freio a disco pode ser observado na Figura 3.4.a e Figura 3.4.b.

Os parâmetros significativos neste sistema são: diâmetro externo e interno dos discos, espessura e propriedades do material da pastilha de freio. Com estes parâmetros é possível determinar a eficiência da frenagem e a vida útil do sistema. O diâmetro externo é de 160 mm, o diâmetro interno é de 63,3 mm e a espessura é de 2 mm.



a)

b)

Figura 3.4 - Freios a disco da bicicleta em estudo. a) Dianteiro e b) Traseiro

Os principais parâmetros que são estudados durante o dimensionamento de um freio são o torque requerido e a força de atuação das pinças de freio (função do tipo e da geometria do elemento e do coeficiente de atrito nas faces deslizantes). Também é importante calcular ou estimar os aumentos de temperatura associados aos ciclos operacionais (função da energia dissipada, dos tempos de atuação e de repouso e das características do meio ambiente e das superfícies de troca de calor).

Durante o transiente de velocidade, os freios transformam energia cinética em calor através do atrito entre suas superfícies em deslizamento relativo. Logo, os materiais das pastilhas e das superfícies de frenagem têm que resistir ao desgaste e aos ciclos térmicos de aquecimento e arrefecimento, mantendo tanto quanto possível o coeficiente de atrito constante durante todos os seus ciclos operacionais.

Os freios a disco possuem furos para aumentar a sua capacidade de arrefecimento, como pode ser visto na Figura 3.4. Uma análise do freio a disco da bicicleta em estudo pode ser feita supondo desgaste ou pressão uniforme nas sapatas (pinças de freio), para se obter parâmetros importantes de funcionamento do sistema de frenagem. Esses parâmetros foram calculados através de um programa (MATLAB), o código utilizado e os resultados obtidos encontram-se no Anexo 1 deste trabalho.

3.4 Outros sistemas

O sistema de direção é formado pelo conjunto de mecanismos, uniões entre outros componentes mecânicos que permite que a bicicleta siga uma trajetória determinada. A direção é composta pela roda dianteira, garfo, mesa e guidão. O garfo é a peça que conecta o guidão e a mesa à roda dianteira, passando pelo quadro da bicicleta. Esse pode conter um amortecedor (dianteiro) ou não, e a mesa é responsável pelo movimento de rotação do guidão.

Já o sistema de suspensão conecta a bicicleta às rodas permitindo o movimento relativo entre os dois. Ela é responsável por absorver as irregularidades do terreno, evitando que os impactos recebidos pela roda sejam transmitidos para o ciclista. Esse sistema é composto pelo amortecedor que é um conjunto de elementos que permite a suavização das irregularidades do terreno. No caso da suspensão dianteira das bicicletas, o amortecedor pode ser um cartucho de ar/hidráulico, molas ou elastômeros. Este se encontra normalmente acoplado ao garfo da bicicleta.

Outro sistema é a estrutura, que é composta por tubos que conectados formam o quadro da bicicleta. Essa estrutura pode ter diversos formatos e tamanhos, conforme mostrado na Figura 3.5. Sejam esses tubos circulares, ovais, elípticos ou hidroformados, utilizam a mesma nomenclatura, independentemente do tipo ou modelo de bicicleta. A Figura 3.6 apresenta o nome de cada seguimento do quadro.

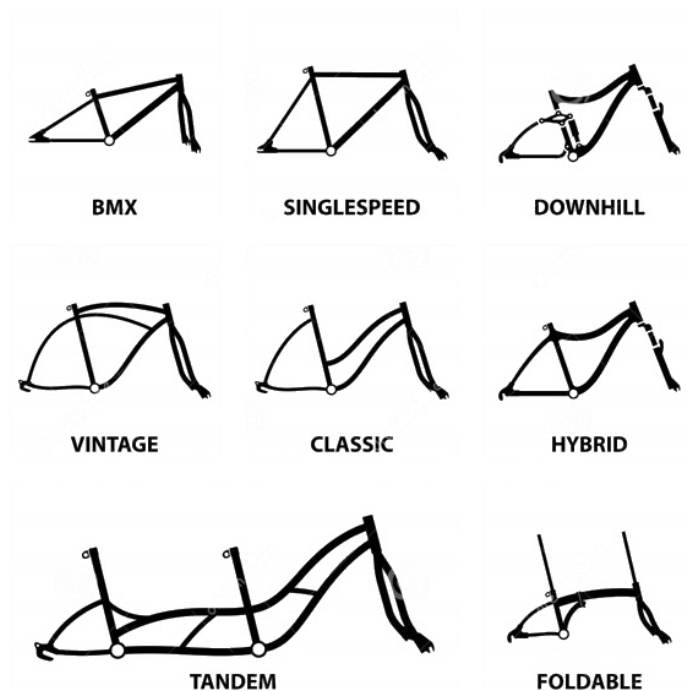


Figura 3.5 - Tipos de estrutura de quadros.



Figura 3.6 - Nome de cada seguimento do quadro da bicicleta.

O tamanho e a inclinação de cada seguimento influenciam diretamente na performance da bicicleta. Um exemplo disso é o ângulo formado entre o solo e a caixa de direção, ângulo de

cáster, que influencia diretamente a manobrabilidade e a estabilidade da bicicleta. A distância entre eixos é um outro parâmetro importante, que influencia diretamente na estabilidade em altas velocidades. Quanto maior a distância, maior a estabilidade e menor a arrancada, e o desvio do garfo (*offset*) influencia também diretamente na estabilidade, quanto maior o *offset* mais estável será a bicicleta. A Figura 3.7 apresenta as principais características da estrutura da bicicleta.

O tipo de material também é uma característica importante para se levar em consideração na estrutura da bicicleta. Os materiais mais utilizados na confecção da estrutura são aço, alumínio e fibra de carbono. Hoje, as bicicletas de alumínio estão substituindo aos poucos as de aço devido ao seu peso reduzido e sua durabilidade (corrosão/oxidação com o tempo) em comparação com as de aço.

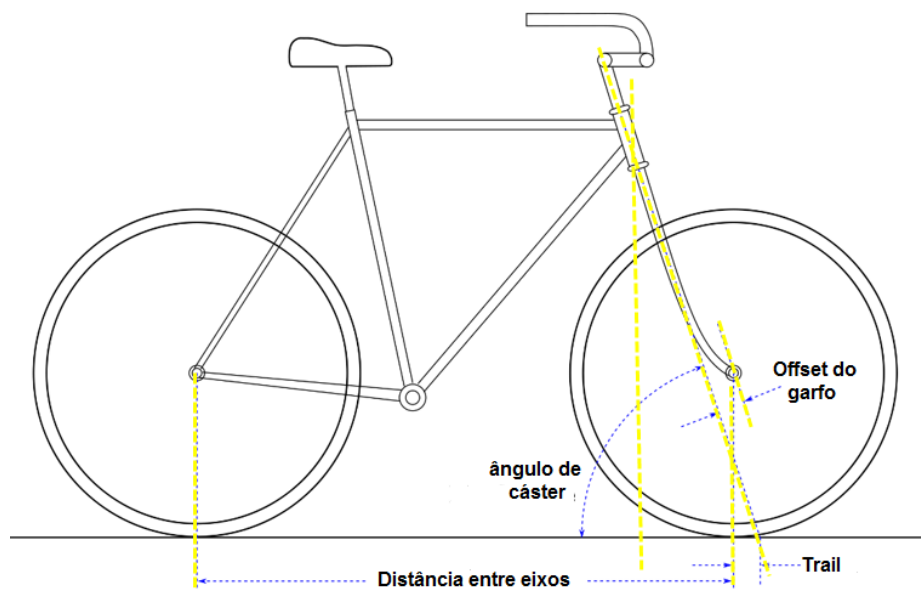


Figura 3.7 - Principais medidas características da bicicleta.

3.5 Modelagem em CAD

CAD (do inglês: *computer aided design*) é um nome genérico para *softwares* utilizados principalmente pela engenharia para facilitar a criação/desenvolvimento de projetos, neste trabalho o *software* utilizado foi o *SolidWorks*. Esse programa possui ferramentas de simulação que tem como saída parâmetros importantes que serão obtidos e comparados com os resultados provenientes dos testes experimentais. A bicicleta em estudo foi modelada de forma a se assemelhar o máximo possível com a real para melhorar a confiabilidade dos resultados fornecidos.

Neste capítulo serão encontrados *renders* dos componentes da bicicleta em estudo, organizados em conjuntos pré-definidos e especificados nas Figuras 3.8 a 3.19.

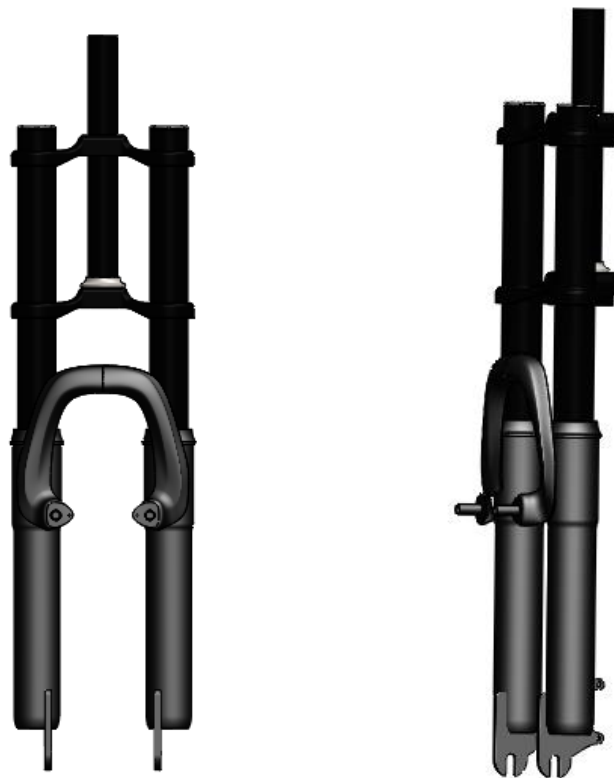


Figura 3.8 - Garfo da bicicleta.



Figura 3.9 - Guidão da bicicleta com manetes.

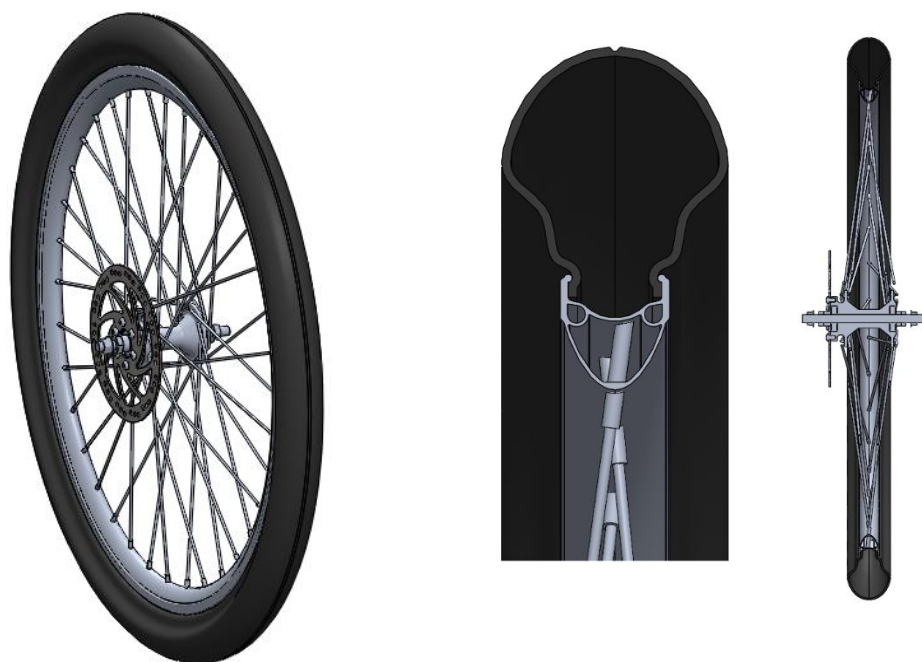


Figura 3.10 - Roda dianteira com disco do freio.

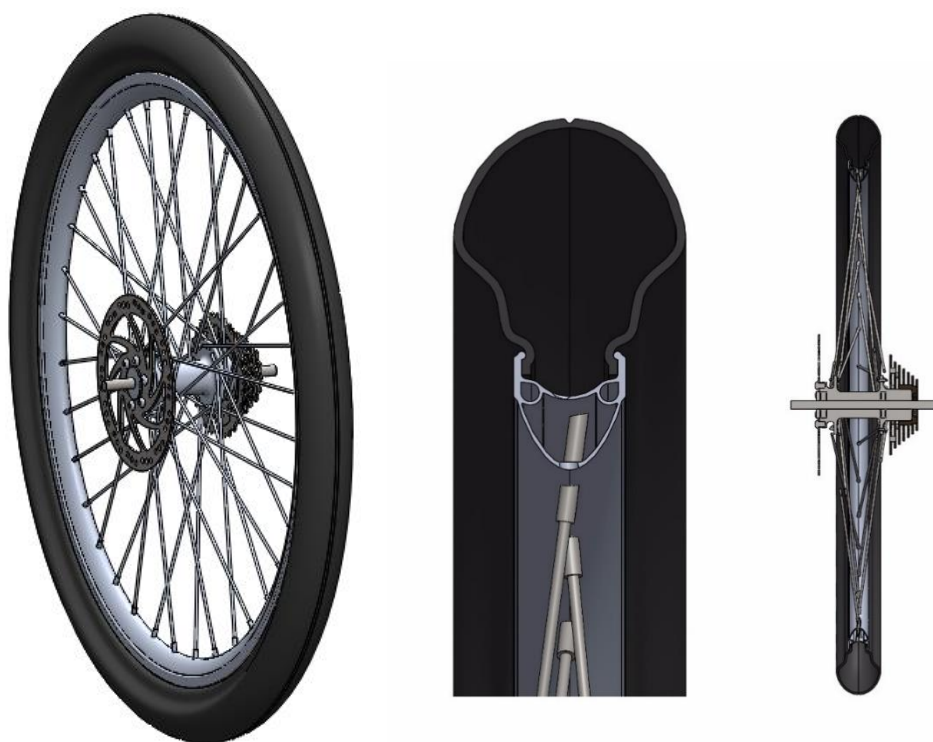


Figura 3.11 - Roda traseira com disco de freio e cassete.

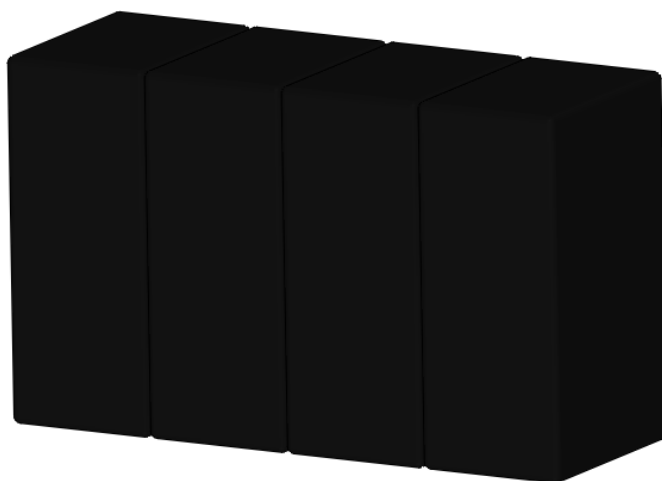


Figura 3.12 - Bateria.



Figura 3.13 - Quadro da bicicleta.

Para a modelagem do quadro da bicicleta e do selim, foi necessário usar uma técnica onde há a inserção de uma foto do componente para auxiliar no desenho, devido à dificuldade de se medir a geometria com instrumentos convencionais. As Figuras 3.14 e 3.16 ilustram essa prática.



Figura 3.14 - Modelagem do quadro da bicicleta.



Figura 3.15 - Selim.

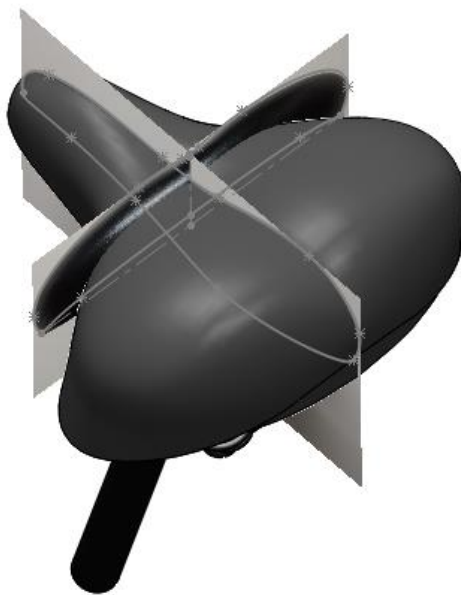


Figura 3.16 - Modelagem do selim da bicicleta.

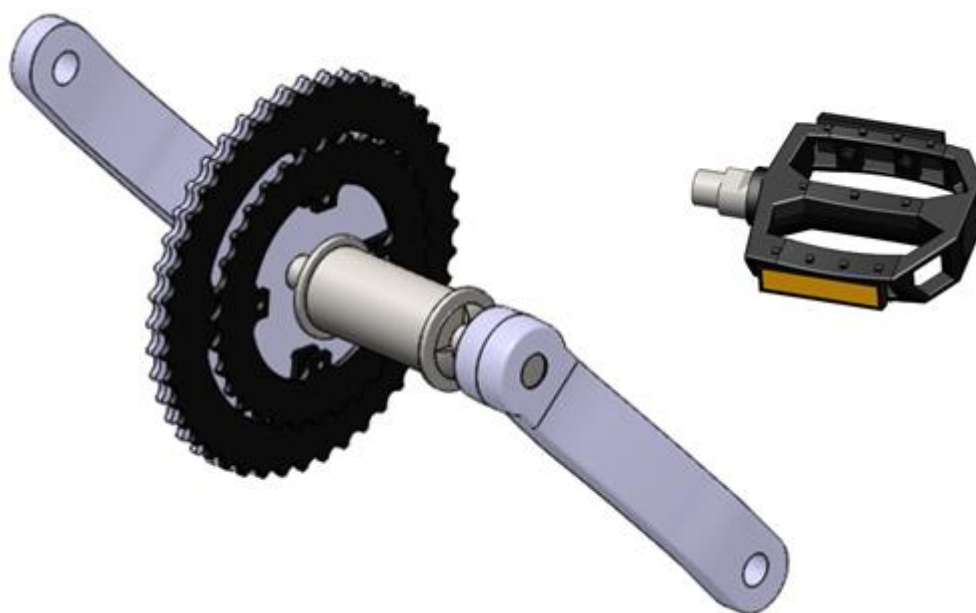


Figura 3.17 - Conjunto pedivela com movimento central e coroa e conjunto pedal.



Figura 3.18 - Montagem da bicicleta completa 1.



Figura 3.19 - Montagem da bicicleta completa 2.

Após a modelagem de cada conjunto/componente foi definido o tipo de material para cada parte, de forma a deixar o modelo mais próximo do real. Além disso, cada conjunto/componente teve seu peso medido e registrado no modelo.

Os resultados encontrados com a modelagem da bicicleta serão expostos no Capítulo 4 e comparados com os resultados obtidos experimentalmente.

4 Caracterização dos sistemas mecânicos

4.1 Introdução

Neste capítulo serão descritas com detalhe as metodologias usadas na obtenção das coordenadas do centro de gravidade e dos momentos de inércia da bicicleta em estudo. Primeiramente, serão apresentados os modelos analíticos que relacionam as grandezas diretamente mensuráveis com as grandezas calculadas. Em seguida, é descrito o procedimento experimental e são mostrados os resultados. Com isso, uma análise de incertezas é feita para avaliar a qualidade destas estimativas. No caso do momento de inércia, os resultados ainda são comparados com os obtidos através do modelo em CAD.

4.2 Obtenção das coordenadas do centro de gravidade

O centro de massa (CM) é utilizado para facilitar o estudo do movimento dos corpos rígidos, trata-se de um ponto em que toda a massa do corpo pode ser considerada como concentrada, facilitando o cálculo de vários efeitos. E o centro de gravidade (CG) representa o ponto onde todas as forças relacionadas a gravidade se concentram, ou seja, onde o peso do corpo atua. Nesse caso, da bicicleta, o CM e o CG são considerados pontos coincidentes. O cálculo dessa coordenada para a bicicleta tratada será demonstrado e apresentado no Item 4.2.1.

4.2.1 Descrição do procedimento

Considerando as rodas dianteira e traseira com mesmo diâmetro e a bicicleta em repouso e apoiada no solo com um sistema de referência conforme mostrado na Figura 4.1, pode-se tirar

as equações de equilíbrio que se encontram representadas nas Equações 4.1 a 4.3. Logo manipulando-se a Equação 4.3 chega-se a Equação 4.4.

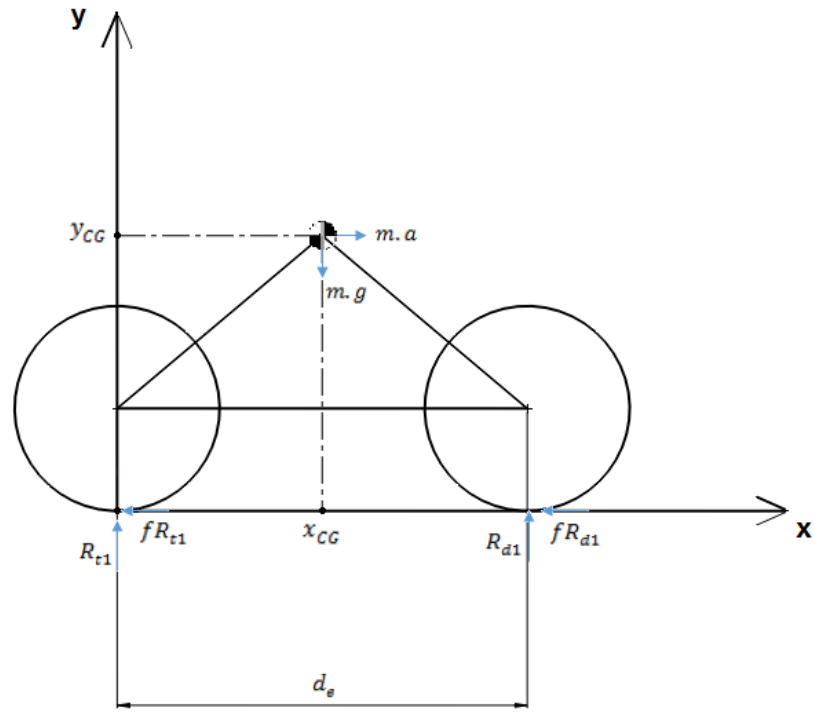


Figura 4.1 - Esquema de forças.

$$\sum F_x : m \cdot a = f \cdot R_{t1} + f \cdot R_{d1} \quad (4.1)$$

$$\sum F_y : m \cdot g = R_{t1} + R_{d1} \quad (4.2)$$

$$\sum M_o : m \cdot g \cdot x_{CG} = R_{d1} \cdot d_e \quad (4.3)$$

$$x_{CG} = \frac{R_{d1} \cdot d_e}{R_{t1} + R_{d1}} \quad (4.4)$$

Elevando-se a roda dianteira da bicicleta a uma altura h , como mostrado na Figura 4.1, chega-se às relações descritas nas Equações 4.5 a 4.7.

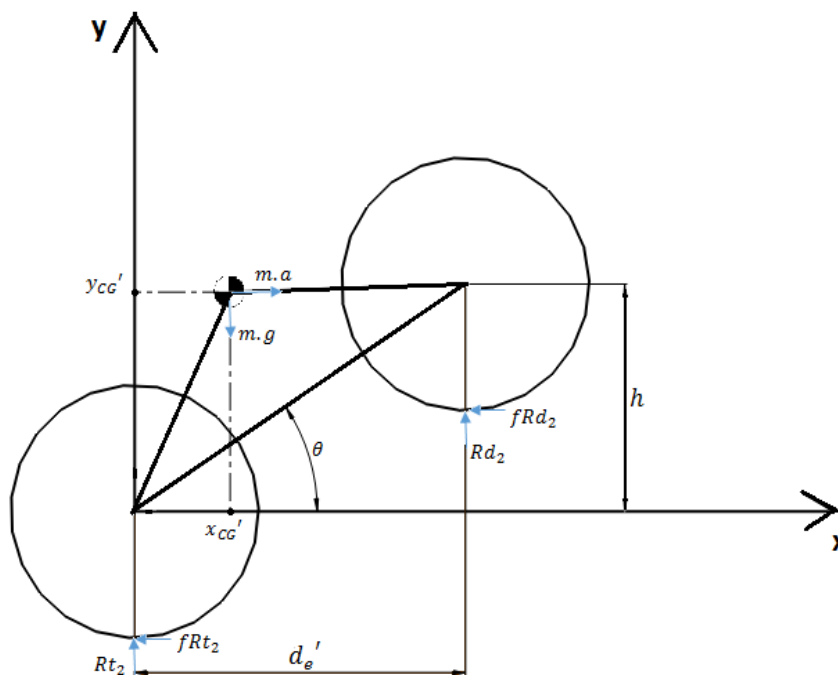


Figura 4.2 - Esquema de forças com uma das rodas erguidas.

$$\sum F_x : m \cdot a = fRt_2 + fRd_2 \quad (4.5)$$

$$\sum F_y : m \cdot g = Rt_2 + Rd_2 \quad (4.6)$$

$$\sum M_o : m \cdot g \cdot x_{CG'} = Rd_2 \cdot d_e' \quad (4.7)$$

Onde x_{CG}' e d_e' são, respectivamente, as projeções do centro de massa e da distância entre eixos no eixo x e y_{CG}' , a projeção do centro de massa no eixo y. Novamente, como foi considerado, a bicicleta se encontra em repouso então temos que $m.a = 0$. Manipulando-se a Equação 4.7, chega-se a Equação 4.8. E na Figura 4.3 são apresentadas outras relações geométricas e, a partir destas chega-se a Equação 4.9.

$$x_{CG}' = \frac{Rd_2 \cdot d_e'}{Rt_2 + Rd_2} \quad (4.8)$$

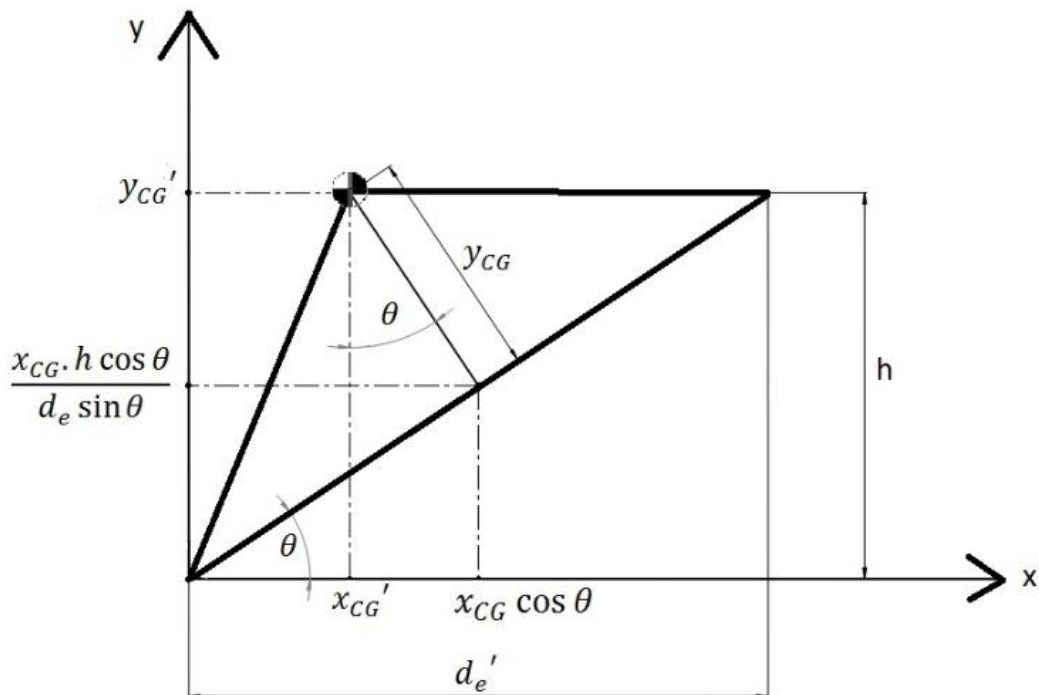


Figura 4.3 - Geometria da bicicleta com roda erguida em detalhe.

$$y_{CG} = \frac{x_{CG} \cos \theta - x_{CG}'}{\sin \theta} \quad (4.9)$$

Substituindo a Equação 4.8 na Equação 4.9, chega-se a Equação 4.10 e, usando as relações descritas na Equação 4.11, além da Equação 4.6, chega-se a Equação 4.12, que é a equação que define a localização da posição y do centro de gravidade.

$$y_{CG} = \frac{x_{CG} \cos \theta}{\sin \theta} - \frac{1}{\sin \theta} \left(\frac{Rd_2 \cdot d_e'}{Rt_2 + Rd_2} \right) \quad (4.10)$$

$$\begin{cases} \sin \theta = \frac{h}{d_e} \\ \cos \theta = \frac{d_e'}{d_e} \\ \tan \theta = \frac{h}{d_e'} \end{cases} \quad (4.11)$$

$$y_{CG} = \frac{d_e' d_e (Rd_1 - Rd_2)}{(Rt_2 + Rd_2) \cdot h} \quad (4.12)$$

4.2.2 Resultados experimentais

Para obtenção da reação da roda traseira e dianteira, de acordo com o procedimento descrito, usou-se uma balança e uma base de madeira para as rodas ficarem na mesma altura. O primeiro teste encontra-se ilustrado na Figura 4.4.



Figura 4.4 - Teste 1

Em seguida, os parâmetros como raio da roda e distância entre eixos foram medidos. Os resultados desse primeiro teste encontram-se na Tabela 4.1.

Na segunda parte do teste, para a obtenção da coordenada y do centro de gravidade, três alturas foram utilizadas para uma melhor estimativa. A roda erguida em todos os testes foi a da dianteira, já que o centro da roda traseira serviu de referência. Nos três procedimentos, a balança foi posicionada de forma que as reações pudessem ser obtidas. As Figuras 4.5 a e 4.5.b ilustram o procedimento.

Tabela 4.1 - Medidas relevantes para o teste 1

| | | | |
|---------|--|--------|----|
| Teste 1 | Medição da reação da roda traseira e dianteira na balança e medição da distância entre eixos | | |
| | Reação da roda dianteira | 15,8 | kg |
| | Reação da roda traseira | 15,2 | kg |
| | Distância entre eixos | 1120 | mm |
| | Raio das rodas | 331,00 | mm |



a.

b)

Figura 4.5 - Teste 2 a) Reação roda traseira e b) Reação roda dianteira

O procedimento para a medição da projeção da distância entre eixos pode ser observado na Figura 4.6 e os resultados obtidos no teste 2 para as três alturas encontram-se na Tabela 4.2. Utilizando a Equação 4.4 para o cálculo do x_{CG} e a Equação 4.12 para o cálculo do y_{CG} , chega-se aos resultados mostrados na Tabela 4.3.



Figura 4.6 - Medição da projeção da distância entre eixos

Tabela 4.2 - Medidas relevantes para o teste 2

| | | | |
|----------------|---|--------------------------|---------|
| Teste 2 | Medição da reação da roda traseira e dianteira com uma das rodas elevadas (3 alturas diferentes) e medição da distância entre eixos | | |
| | | Dianteira levantada | |
| | h [mm] = 255 | Reação da roda dianteira | 14,6 kg |
| | | Reação da roda traseira | 15,4 kg |
| | | Distância entre eixos | 1095 mm |
| | | Dianteira levantada | |
| h [mm] = 495 | Reação da roda dianteira | 13,2 kg | |
| | Reação da roda traseira | 17,19 kg | |
| | Distância entre eixos | 1010 mm | |
| | | Dianteira levantada | |
| h [mm] = 700 | Reação da roda dianteira | 11,2 kg | |
| | Reação da roda traseira = | 19,5 kg | |
| | Distância entre eixos = | 855 mm | |

Tabela 4.3 - Resultados obtidos através dos testes 1 e 2

| | | | |
|-----------|---|-----|----|
| Cálculo 1 | Coordenada x do centro de massa (zero no centro da roda traseira) | | |
| | Coordenada x do CG | 571 | mm |
| Cálculo 2 | Coordenada y do centro de massa (zero no centro da roda traseira) | | |
| | Coordenada y do CG ₁ | 186 | mm |
| | Coordenada y do CG ₂ | 192 | mm |
| | Coordenada y do CG ₃ | 203 | mm |

4.2.3 Análise de incerteza dos resultados

Com a responsabilidade de apresentar uma medida de confiabilidade dos dados, uma análise de incerteza foi feita para se definir uma faixa onde se estima estar localizado o valor da grandeza medida. Em geral o resultado de uma medição é apenas uma estimativa do valor

verdadeiro de uma grandeza física. Sendo assim, o resultado da medição só é completo quando acompanhado do valor de incerteza.

Os instrumentos utilizados na medição do centro de massa foram balança e trena. Suas resoluções são de respectivamente 0,1 quilogramas e 0,001 metros. Foram feitas 3 medições para cada medida durante o teste e em todas essas três medições não houve diferença na medida. Sendo assim, a incerteza do tipo A é nula.

Segundo o Guia de Medição de Incertezas (*GUM*, 2008), a incerteza do tipo A é obtida a partir de um conjunto de amostras, usando estimadores amostrais para a média e para o desvio padrão. Nada mais é do que a incerteza das medidas, dado pela variação destas quando uma mesma medição é feita.

Já a incerteza do tipo B é obtida por qualquer outro meio, tal como informação prévia fornecida pelo fabricante; aproximações conservadoras baseadas em experiência prévia com instrumentos similares; modelo matemático formal do processo de medição específico como um processo estocástico, valores da bibliografia, etc. Resumindo, é a incerteza dos instrumentos de medição. A incerteza dessa medição não pode ser zero, dado que existe uma limitação de leitura da variação do sinal devido à resolução do instrumento.

Considerando a resolução do instrumento como sendo r , pode-se assumir uma distribuição retangular com limites $\pm r/2$. Logo, a expressão para a incerteza padrão encontra-se descrita na Equação 4.13 e os resultados obtidos através dessa equação encontram -se na Tabela 4.4.

$$u_{inst.} = \frac{(r/2)}{\sqrt{3}} = \frac{r}{\sqrt{12}} \quad (4.13)$$

Tabela 4.4 - Incertezas tipo B

| | |
|---------------|-------------|
| $u_{balança}$ | 0,02887 mm |
| u_{trena} | 0,000289 mm |

Em seguida, aplicando-se a expressão de propagação das incertezas que se encontra descrita na Equação 4.14 e derivando-se parcialmente a Equação 4.4 em relação a cada um dos parâmetros como foi mostrado na Equação 4.14, chega-se ao conjunto de expressões descritos na Equação 4.15.

$$u_x^2 = \left(\frac{\partial x}{\partial R_{d1}} \cdot u_{peso}\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial R_{d1}} \cdot u_{balança}\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial de} \cdot u_{comp}\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial de} \cdot u_{trena}\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial R_{t1}} \cdot u_{peso}\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial R_{t1}} \cdot u_{balança}\right)^2 \quad (4.14)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial x}{\partial R_{d1}} = \frac{de \cdot R_{t1}}{(R_{t1} + R_{d1})^2} \\ \frac{\partial x}{\partial de} = \frac{R_{d1}}{R_{t1} + R_{d1}} \\ \frac{\partial x}{\partial R_{t1}} = -\frac{R_{d1} \cdot de}{(R_{t1} + R_{d1})^2} \end{cases} \quad (4.15)$$

Substituindo-se os valores encontrados na Tabela 4.1 junto aos valores obtidos através das equações que compõe o conjunto da Equação 4.15, chega-se a um valor de incerteza para a coordenada x do centro de gravidade, $u_x = 0,00075 \text{ m}$. Como só existem incertezas do Tipo B, o número de graus de liberdade tende a infinito, então $k = 1,96$ para um intervalo de confiança de 95% (tabela *T-Student*). Com isto, a equação para o cálculo da incerteza padrão para a medida do x_{CG} se encontra descrita na Equação 4.16.

$$U_x = k \cdot u_x \quad (4.16)$$

Substituindo os valores encontrados em cada uma das variáveis, chega-se ao valor de 1,47 mm de incerteza. Logo, a coordenada x_{CG} será igual a $571 \pm 1,47$ mm. O mesmo procedimento usado para o x_{CG} será usado na obtenção do y_{CG} . Como três medidas foram obtidas para a coordenada y (três alturas diferentes), o cálculo da incerteza será o mesmo para cada um deles. Aplica-se a expressão de propagação das incertezas que se encontra descrita na Equação 4.17, sendo os termos que envolvem as incertezas do tipo A são nulos.

$$u_y^2 = \left(\frac{\partial y}{\partial R_{d1}} \cdot u_{balan\c{c}a} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial de} \cdot u_{trena} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial R_{d2}} \cdot u_{balan\c{c}a} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial de'} \cdot u_{trena} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial R_{t2}} \cdot u_{balan\c{c}a} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial h} \cdot u_{trena} \right)^2 \quad (4.17)$$

Derivando-se parcialmente a Equação 4.12 em relação a cada um dos parâmetros como foi mostrado na Equação 4.17, chega-se ao conjunto de expressões descritos na Equação 4.18. Os valores de u_y , já calculados, encontram-se na Tabela 4.5 para cada uma das três alturas utilizadas no teste.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial y}{\partial de} = \frac{de'(R_{d1}-R_{d2})}{h(R_{t2}+R_{d2})} \\ \frac{\partial y}{\partial R_{d2}} = -\frac{de \cdot de'(R_{d1}-R_{d2})}{h(R_{t2}+R_{d2})} \\ \frac{\partial y}{\partial de'} = -\frac{de(R_{d1}-R_{d2})}{h(R_{t2}+R_{d2})} \\ \frac{\partial y}{\partial R_{t2}} = -\frac{de \cdot de'(R_{d1}-R_{d2})}{h(R_{t2}+R_{d2})^2} \end{array} \right. \quad (4.18)$$

Tabela 4.5 - Resultados das incertezas de y

| | $h = 300\text{mm}$ | $h = 495\text{mm}$ | $h = 700\text{mm}$ |
|-------|--------------------|--------------------|--------------------|
| u_y | 0,00668 m | 0,00321 m | 0,00197 m |

Como só existem incertezas do Tipo B, o número de graus de liberdade tende a infinito, então $k = 1,96$ para um intervalo de confiança de 95% (tabela *T-Student*). Logo, chega-se aos valores para o y_{CG} , esses valores encontram-se na Tabela 4.6. Pode-se observar na Tabela 4.6 que quanto maior o valor de h , menor será a incerteza relacionada e isso se deve ao fato de que na Equação 4.17 o valor da incerteza é inversamente proporcional ao valor de h .

Tabela 4.6 - Resultados finais com incertezas

| | y_{CG} |
|---------------------|---------------------------|
| $h = 300\text{ mm}$ | $186 \pm 13,10\text{ mm}$ |
| $h = 495\text{ mm}$ | $192 \pm 6,15\text{ mm}$ |
| $h = 700\text{ mm}$ | $203 \pm 3,87\text{ mm}$ |

4.3 Obtenção dos momentos de inércia

O momento de inércia de massa é a resistência imposta por um corpo em rotação a uma mudança em sua velocidade de giro. Ele depende da massa do corpo e da distância da massa ao seu eixo de rotação, desempenhando na rotação um papel equivalente ao da massa no movimento linear. O momento de inércia de um corpo não é uma quantidade única e fixa. Se um objeto é girado em torno de eixos diferentes, também terá momentos de inércia diferentes, uma vez que a distribuição de sua massa em relação ao novo eixo é normalmente distinta do que era no anterior.

O equacionamento de um exemplo simples muito parecido com o que será apresentado no Item 4.3.1 é o do pêndulo composto. O pêndulo composto é um sólido em rotação ao redor de um eixo fixo. Quando é deslocado de um ângulo θ da posição de equilíbrio e é solto, sobre este

sólido irá atuar o momento da força peso, que tem sinal contrário ao deslocamento. A decomposição da força peso do corpo (considerada no centro de gravidade) encontra-se na Figura 4.7 e, a partir do somatório de torques, chega-se ao modelo apresentado na Equação 4.19

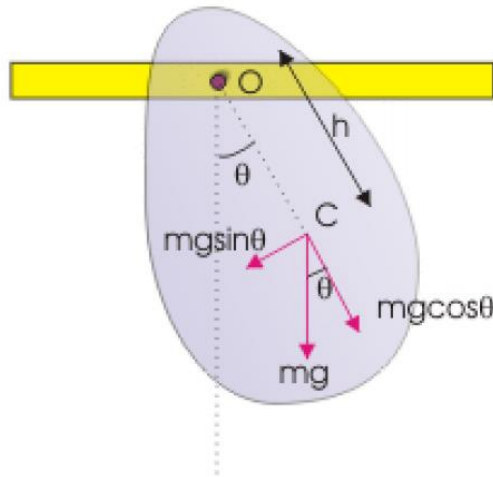


Figura 4.7 - Pêndulo composto

$$\sum \tau = I_o \cdot \alpha + m \cdot g \cdot h \cdot \sin \theta \quad (4.19)$$

Para ângulos pequenos pode-se considerar que $\sin \theta \sim \theta$, e como o corpo é apenas solto a partir do repouso, pode-se considerar também que $\sum \tau = 0$. Logo, manipulando-se a Equação 4.19 é possível chegar na equação da dinâmica de rotação do corpo (Equação 4.20).

$$\alpha = \ddot{\theta} \sim \frac{m \cdot g \cdot h \cdot \theta}{I_o} \quad (4.20)$$

Onde h é a distância entre o centro de massa e o centro de oscilação O , I_o é o momento de inércia do corpo relativo ao eixo de rotação que passa por O . Logo, a equação diferencial da dinâmica de rotação do corpo em questão encontra-se na Equação 4.21. E da solução da equação diferencial apresentada na Equação 4.21 obtém-se a frequência natural do sistema, que se encontra na Equação 4.22, onde ω é a frequência angular do sistema. O período de oscilação do pêndulo é apresentado na Equação 4.23.

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{m.g.h}{I_o}\theta = 0 \quad (4.21)$$

$$\omega^2 = \frac{m.g.h}{I_o} \quad (4.22)$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega} = \sqrt{\frac{I_o}{m.g.h}} \quad (4.23)$$

O cálculo do momento de inércia de um objeto em relação a um eixo que não é o seu eixo de simetria, pode ser bem complexo. O Teorema de Steiner foi criado para auxiliar nesse tipo de cálculo. Ele diz que, se o momento de inércia em relação a um eixo que passa pelo centro de massa pode ser conhecido, então pode-se conhecer o momento de inércia em relação a qualquer outro eixo paralelo ao primeiro que se encontra a uma distância d . A equação de Steiner encontra-se

explícita na Equação 4.24, onde I_c é o momento de inércia relativo ao ponto C da Figura 4.7 e d é distância.

$$I_o = I_c + m \cdot d^2 \quad (4.24)$$

O procedimento utilizado tem como referência uma nota técnica da NACA - *National Advisory Committee for Aeronautics*. A necessidade de se obter medições precisas de momentos de inércia de aviões tornou-se evidente pela primeira vez por volta de 1926. Em resposta a esta necessidade, a NACA desenvolveu um método experimental em que um avião foi balançado como um pêndulo. Algum tempo depois, a importância dos efeitos do “ambiente ar” sobre os momentos de inércia foi reconhecida e um procedimento para a avaliação destes efeitos foi desenvolvido (Gracey, W., 1948). Nesta Seção foi adotado o procedimento descrito nesta nota, porém, não foi levado em consideração o efeito da resistência do ar.

4.3.1 Descrição do procedimento

De acordo com Gracey, W. (1948), os momentos de inércia de um avião são determinados em torno de três eixos definidos no corpo: o eixo X que é paralelo à força de propulsão no plano de simetria, o eixo Y que é perpendicular ao plano de simetria e o eixo Z que é perpendicular à força de propulsão no plano de simetria. Os momentos de inércia em torno dos eixos X e Y são obtidos pela oscilação do avião como um pêndulo composto; já o momento de inércia em torno do eixo de Z é obtido por suspensão do avião como um pêndulo de torção bifilar (arranjo de dois filamentos, Figura 4.9). No caso da bicicleta, os eixos de rotação em Y e Z são os mesmos do que

os de um avião, porém, o eixo de rolagem X em uma bicicleta é o eixo paralelo ao eixo X que passa pelos pontos de contato dos pneus com o solo. Nas Figuras 4.8.a, 4.8 b e 4.9 são apresentados os esquemas de ensaio para a obtenção de cada um dos momentos de inércia (em relação aos eixos X, Y e Z, respectivamente) de um avião, conforme o procedimento NACA.

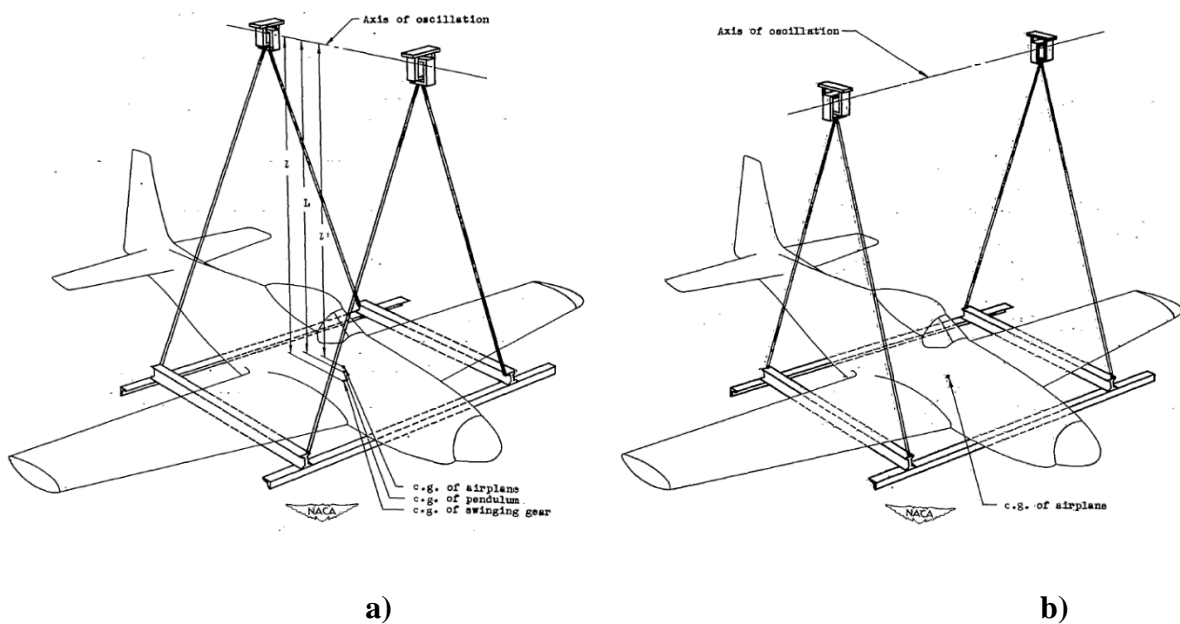


Figura 4.8 - Avião e aparato de sustentação dispostos para a determinação dos momentos de inércia. a) Momento de Inércia em X (I_{xx}) e b) Momento de Inércia em Y (I_{yy}).

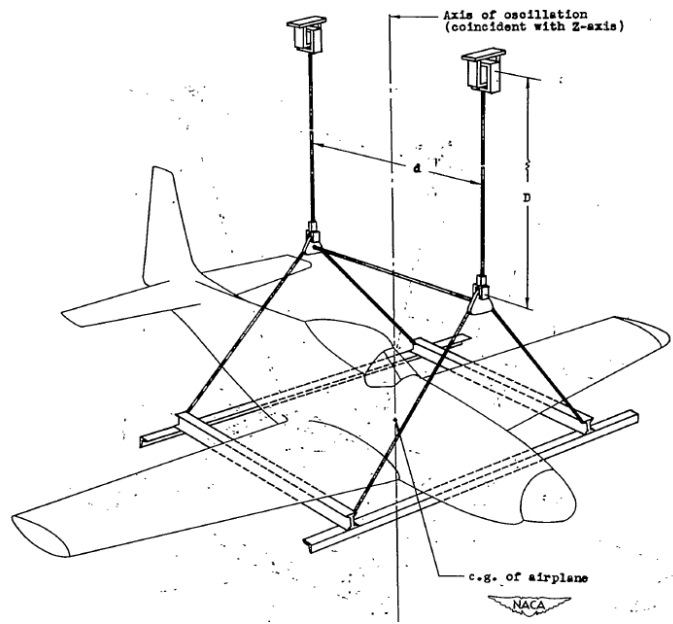


Figura 4.9 - Avião e aparato de sustentação dispostos para a determinação do momento de inércia em Z (I_{zz}).

Assim como o avião, a bicicleta foi balançada e tratada como se fosse um pêndulo composto. O estudo de onde esse aparato, de sustentação e balanço, deveria se localizar e como ele deveria ser, foi feito. O aparato de balanço e sustentação usado na medição dos momentos de inércia de arfagem e rolagem se encontra na Figura 4.10. O aparato usado na medição do momento de inércia de guinada não foi construído.

Os dados experimentais obtidos nos testes de oscilação proporcionam uma medida de momento de inércia do pêndulo completo, que consiste na bicicleta e seu equipamento auxiliar para promover o movimento oscilatório, em torno do eixo de rotação. O momento de inércia da bicicleta em relação ao eixo de rotação é então obtido subtraindo-se o momento de inércia do equipamento auxiliar em torno deste eixo.



Figura 4.10 - Aparato de sustentação desenvolvido para auxiliar na obtenção dos momentos de inércia de rolagem e de arfagem.

4.3.2 Momento de inércia de arfagem

O movimento de arfagem (*pitch*), é o movimento que a bicicleta realiza quando uma aceleração ou uma frenagem é realizada. Esse movimento ocorre em torno do eixo Y. O momento de inércia de arfagem (I_{yy}) pode ser calculado usando o Teorema dos Eixos Paralelos com a distância h do pivô ao centro de massa da bicicleta e o período T para este teste. A expressão para o cálculo desse momento de inércia se encontra na Equação 4.25 e a Figura 4.11 ilustra este teste.

$$I_{yy} = \frac{m \cdot g \cdot h}{4\pi^2} T_y^2 - m \cdot h^2 \quad (4.25)$$

A bicicleta saiu do repouso em uma condição inicial na qual o ângulo das barras de sustentação com o solo era de 5° e, assim, foi medido o tempo de 20 oscilações. A Tabela 4.7

apresenta os resultados obtidos durante as 6 medições e seus respectivos períodos. E na Tabela 4.8 encontram-se os resultados obtidos para a primeira parcela da Equação 4.25 que se refere ao momento de inércia do corpo em relação ao centro do rolamento (I_o) e a segunda parcela que se refere a transposição do eixo de rotação para o centro de massa (I_s).

Tabela 4.7 - Medidas obtidas através do teste para momento de inércia I_{yy} .

| | Lateral (I_{yy}) - ($L=0,99685m$) | | | | | | T (s) |
|-----------|---|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 20 | 42,96 | 43,17 | 43,12 | 43,18 | 43,21 | 43,08 | 2,1560 |



Figura 4.11 - Teste realizado para se obter o período para o cálculo do momento de inércia I_{yy} .

Tabela 4.8 - Resultados obtidos no cálculo experimental do momento de inércia I_{yy} .

| Cálculo (I_{yy}) - ($L=0,99685m$) | |
|---|--------------------------|
| I_{yy} | 4,877 kg/m ² |
| I_s | 30,805 kg/m ² |
| I_o | 35,682 kg/m ² |

Uma análise de incerteza para esse momento de inércia foi feita seguindo o que foi descrito no Item 4.2.3. Sabendo-se a Equação 4.25 e, seguindo os passos descritos, chega-se a uma incerteza de $\pm 3,07$ kg/m² para I_{yy} .

Comparando o resultado obtido experimentalmente com o obtido através do *software SolidWorks*, que se encontra na Figura 4.12, chega-se à conclusão de que o método funcionou e foi bastante preciso mesmo a incerteza do teste sendo muito grande, devido ao tempo de reação da pessoa ao cronometrar o tempo de oscilação.

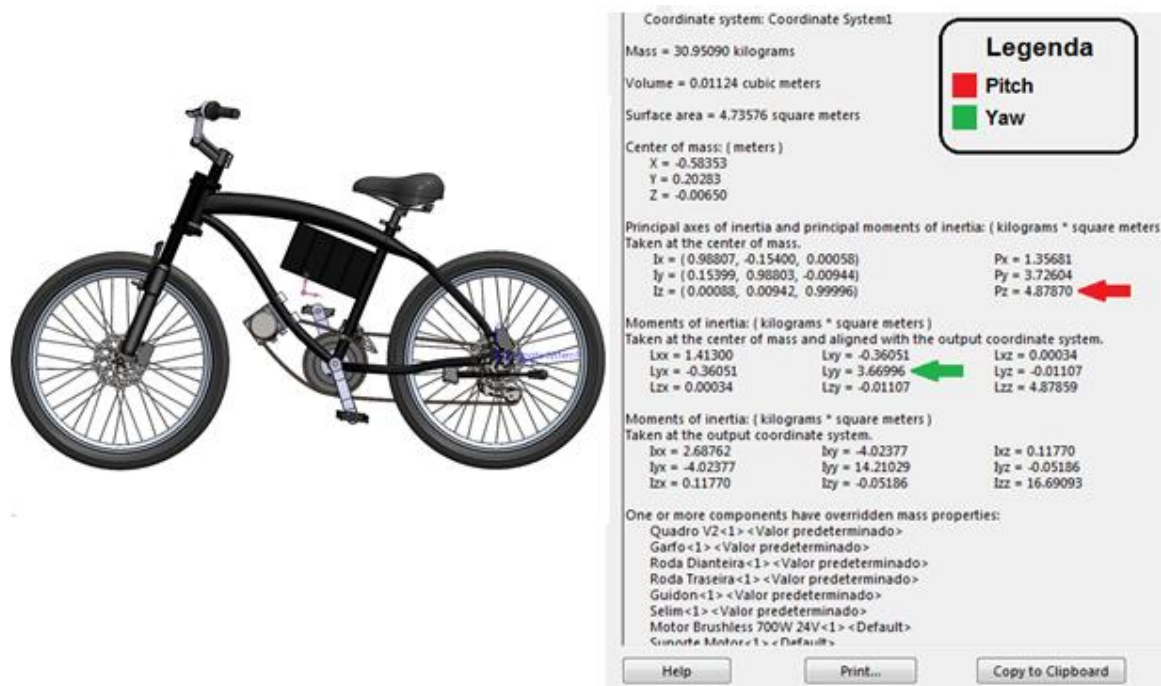


Figura 4.12 - Momentos I_{yy} (pitch) e I_{zz} (yaw) obtidos no SolidWorks.

4.3.3 Momento de inércia de rolagem

O mesmo procedimento usado no cálculo do momento de inércia de arfagem se aplica no cálculo de I_{xx} , porém, após a obtenção deste valor, o Teorema de Steiner deve ser aplicado novamente para a obtenção do momento de inércia de rolagem I_{xx}' , pois o eixo de rolagem da bicicleta passa pelos pontos de contato do pneu com o solo (Equação 4.26) e a Figura 4.12 ilustra este teste.

$$I_{xx}' = I_{xx} + m \cdot (R + y_{CG})^2 = \frac{m \cdot g \cdot h}{4 \cdot \pi^2} T_x^2 - m \cdot h^2 + m \cdot (R + y_{CG})^2 \quad (4.26)$$

, onde R é o raio da roda da bicicleta.

Assim como no Item 4.3.2, a bicicleta saiu do repouso em uma condição inicial na qual o ângulo das barras de sustentação com o solo era de 5° e, assim, foi medido o tempo de 20 oscilações.

Tabela 4.9 - Medidas obtidas através do teste para momento de inércia I_{xx} .

| Lateral (I_{xx}) - (L=0,99685m) | | | | | | | T (s) |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 20 | 40,96 | 41,02 | 40,79 | 40,89 | 40,82 | 40,94 | 2,0452 |

A Tabela 4.9 apresenta os resultados obtidos durante as 6 medições e seus respectivos períodos. E na Tabela 4.10 encontram-se os resultados obtidos para a primeira parcela da Equação 4.26 que se refere ao momento de inércia do corpo em relação ao centro do rolamento (I_o) e a segunda parcela que se refere a transposição do eixo de rotação para o eixo de rolagem (I_S).



Figura 4.13 - Teste realizado para se obter o período para o cálculo do momento de inércia I_{xx} .

Uma análise de incerteza para esse momento de inércia foi feita seguindo o que foi descrito no Item 4.2.3. Sabendo-se a Equação 4.26 e, seguindo os passos descritos, chega-se a uma incerteza de $\pm 3,59 \text{ kg/m}^2$ para I'_{xx} .

Tabela 4.10 - Resultados obtidos no cálculo experimental do momento de inércia I'_{xx} .

| Cálculo (I'_{xx}) - ($L=0,99685\text{m}$) | |
|---|--------------------------|
| I_c | 10,143 kg/m ² |
| I_s | 30,805 kg/m ² |
| I_o | 40,948 kg/m ² |

Comparando o resultado obtido experimentalmente com o obtido através do *software SolidWorks*, que se encontra na Figura 4.13, chega-se à conclusão de que o método funcionou e foi bastante preciso mesmo a incerteza do teste sendo muito grande, devido ao tempo de reação da pessoa ao cronometrar o tempo de oscilação.

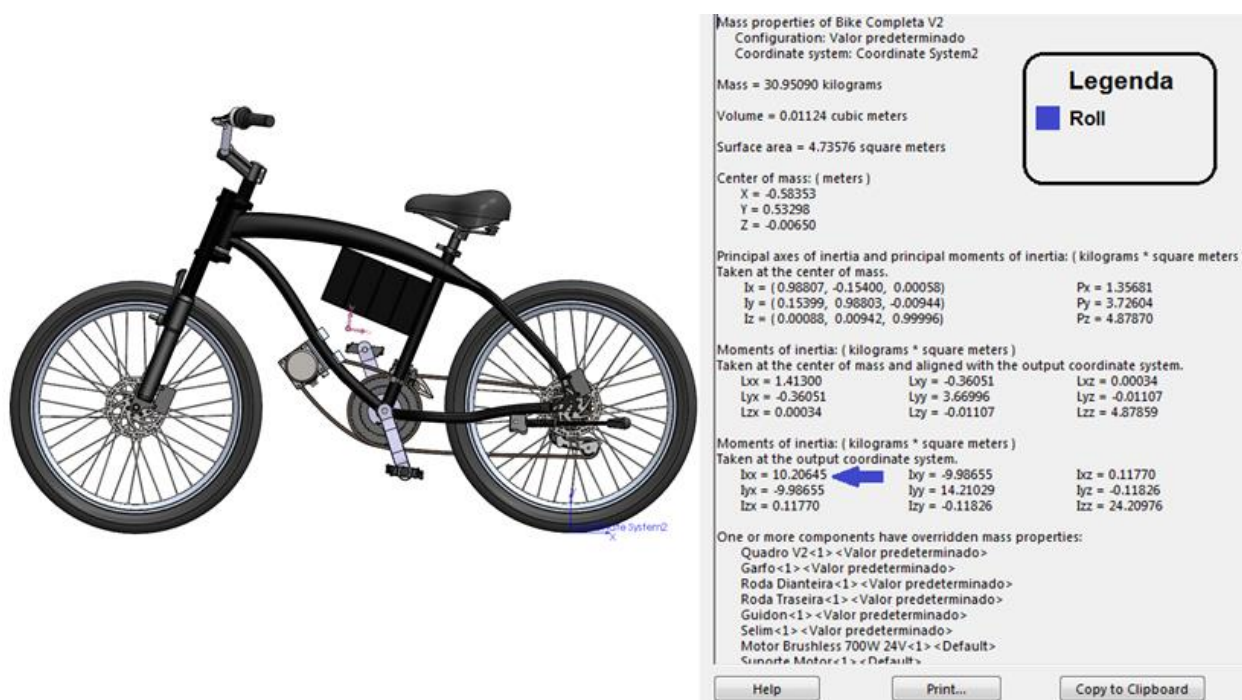


Figura 4.14 - Momento I_{xx} (roll) obtido no *SolidWorks*.

4.4 Caracterização do sistema de transmissão

Por meio da relação de marcha, a transmissão de uma bicicleta deve permitir a mudança na relação de torque fornecido pelo ciclista bem como na alteração de velocidade da bicicleta. O torque pode ser definido conceitualmente como a tendência rotacional que a aplicação de uma força exerce em um objeto sobre um eixo. Matematicamente, torque é a relação direta de uma

multiplicação do vetor de força pelo vetor da distância do ponto onde a força é aplicada em relação ao centro do eixo de giro do objeto que sofre o esforço.

A bicicleta em questão é composta por 14 marchas, isso significa que a transmissão desse veículo possui 14 associações de engrenagens, que realizam a função de transferência de torque para gerar a rotação das rodas. A relação entre engrenagem movida e engrenagem motora é chamada de relação de transmissão e pode ser calculada através da divisão da quantidade de dentes presentes na engrenagem movida pelo número de dentes presentes na engrenagem motora. Na Tabela 4.11 pode-se observar as relações de transmissão presentes na bicicleta em estudo.

Tabela 4.11 - Relações de transmissão possíveis na bicicleta tratada

| Relações Possíveis | | | | | |
|--------------------|-----|-------|-----|-----|-------|
| E1a | E2a | 0,636 | E1a | E2b | 0,875 |
| E2a | E2a | 0,545 | E2a | E2b | 0,750 |
| E3a | E2a | 0,500 | E3a | E2b | 0,688 |
| E4a | E2a | 0,455 | E4a | E2b | 0,625 |
| E5a | E2a | 0,409 | E5a | E2b | 0,563 |
| E6a | E2a | 0,364 | E6a | E2b | 0,500 |
| E7a | E2a | 0,318 | E7a | E2b | 0,438 |

4.5 Caracterização do sistema de frenagem

Com a intenção de se estudar as principais características de comportamento associados às dinâmicas longitudinal e lateral de uma bicicleta convencional com propulsão humana, foram desenvolvidos testes dinâmicos a partir de aparatos específicos (*test rigs*).

4.5.1 Descrição do procedimento

Para a aquisição de dados neste teste, foi necessária uma instrumentação onde dois transdutores e um microcontrolador foram instalados na bicicleta. Os transdutores utilizados foram

potenciômetros de 10 k Ω que tem como entrada o ângulo de atuação feito pelo ciclista nas manetes de freio e como saída uma variação de tensão obtida através da variação de resistência do potenciômetro. As diferentes tensões são processadas pelo microcontrolador que fornece valores referentes ao deslocamento angular das manetes.

O microcontrolador utilizado foi o Atmel 328P associado a plataforma de prototipagem Arduino. Ele é responsável por fazer a leitura e o processamento dos dados, além de salvar os mesmos em um cartão SD para análise dos dados em um computador.

Após a instalação, foi feita a calibração do transdutor considerando as diferentes posições de atuação e a tensão de saída do sensor para cada posição. Dessa forma, é possível se obter a porcentagem de atuação das manetes e, conseqüentemente, das pastilhas de freio durante os testes. A Figura 4.15 mostra como foi feita a instalação dos potenciômetros e na Figura 4.16 pode-se observar o microcontrolador utilizado no teste.



Figura 4.15 - Manetes instrumentadas.

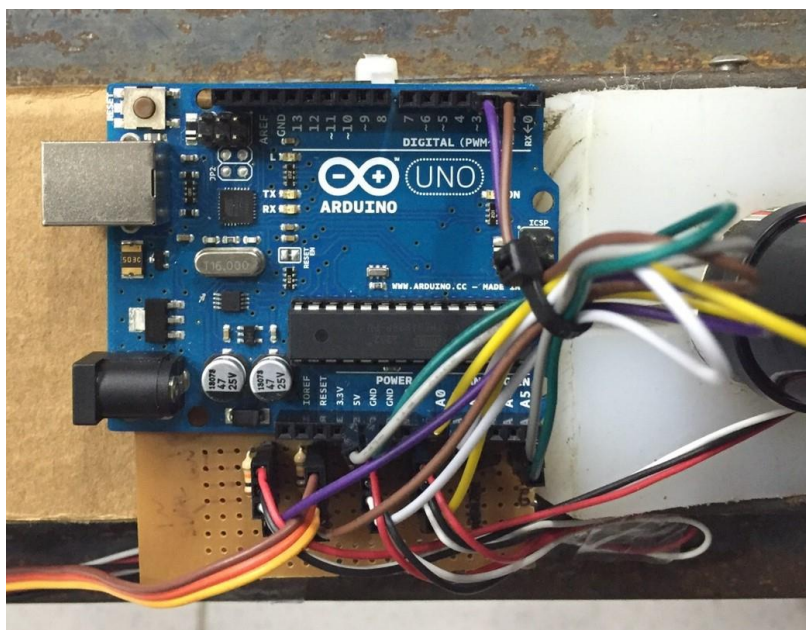


Figura 4.16 - Microcontrolador.

Para a obtenção de parâmetros relativos ao comportamento do sistema de freio da bicicleta, foram desenvolvidos três tipos de testes dinâmicos, são esses:

- Velocidade e aceleração tangencial (tração e frenagem) máximas, atingidas em uma distância limite permitida na pista, para diferentes relações de marcha;
- Distância de frenagem com solicitações distintas das pinças de freio;
- Descida de ladeira com frenagem para diferentes solicitações da pinça de freio.

O procedimento para instrumentação da bicicleta e os testes que deverão ser realizados para obtenção dos parâmetros, foram explicados e listados. Em um futuro trabalho será estudado este comportamento dinâmico da bicicleta.

5 Conclusão e trabalhos futuros

5.1 Conclusão

Neste trabalho foi feita uma breve análise de todos os sistemas da bicicleta e de suas dinâmicas, lateral e longitudinal. Alguns parâmetros foram obtidos através de experimentos, como coordenadas do centro de gravidade e momentos de inércia de arfagem e rolagem; e uma análise de incerteza para cada valor obtido também foi feito como forma de se obter valores experimentais válidos e mais precisos.

Um modelo em CAD detalhado foi desenvolvido para uma comparação dos resultados obtidos experimentalmente. Com esses dois resultados foi possível concluir que os testes foram bastante satisfatórios e conclusivos. Além de uma caracterização de alguns parâmetros associados aos sistemas de transmissão e de frenagem. Nas Tabelas 5.1 e 5.2, encontram-se alguns valores que foram medidos e encontrados durante este trabalho.

Tabela 5.1 - Parâmetros adquiridos do modelo dinâmico lateral da bicicleta.

| Parâmetro | Símbolo |
|--|-------------------------|
| Massa da bicicleta | 31 kg |
| Distância entre as rodas (eixos) | 1,12 m |
| Altura do centro de massa | 0,534 m |
| Distância entre a roda traseira e o centro de massa | 0,571 m |
| Distância entre a roda dianteira e o centro de massa | 0,549 m |
| Momento de inércia em torno do eixo x | 10,14 kg/m ² |

Tabela 5.2 - Listagem parcial preenchida com os parâmetros que são empregados no modelo dinâmico do sistema bicicleta.

| Parâmetro | Símbolo |
|---|------------------------|
| Massa (quadro, rodas-pneus-etc + condutor) | 101 kg |
| Massa do conjunto roda-pneu dianteiro | 2,56 kg |
| Massa do conjunto roda-pneu traseiro | 3,03 kg |
| Raio efetivo pneu-roda dianteiro (contato com o solo) | 0,331 m |
| Raio efetivo pneu-roda traseiro (contato com o solo) | 0,331 m |
| Raio efetivo dos pedais | 0,168 m |
| Relações de transmissão coroa-pinhão (i = marchas) | Tabela 4.11 |
| Momento de inércia em torno do eixo y | 4,88 kg/m ² |
| Momento de inércia em torno do eixo z | 3,67 kg/m ² |

5.2 Trabalhos futuros

Os próximos trabalhos envolvem a caracterização dos outros sistemas da bicicleta, como o sistema de direção, por exemplo, além da complementação dos resultados adquiridos neste trabalho.

A caracterização do sistema de freios deve ser complementada com testes dinâmicos, usando o que foi proposto na Seção 4.5, um exemplo é o teste de distância de frenagem com diferentes solicitações da pinça de freio e outros. A caracterização do sistema de transmissão também depende da instalação de um medidor de potência no conjunto pedivela-coroa da bicicleta, que está em andamento. Alguns parâmetros que deverão ser obtidos através dos testes dinâmicos encontram-se na Tabela 5.3.

Com relação à medição dos momentos de inércia, deve-se construir e realizar os testes para obtenção do momento de inércia de guinada (I_{zz}) e também, calcular os momentos de inércia de todos os acessórios usados nos experimentos para anular a influência deles na resposta final, diminuindo assim os erros obtidos.

Tabela 5.3 - Parâmetros que serão obtidos através dos testes dinâmicos.

| Parâmetro | Símbolo |
|--|----------------|
| Eficiência do sistema de transmissão | η |
| Distância do eixo dianteiro ao CM (bicicleta + condutor) | l_d |
| Distância do eixo traseiro ao CM (bicicleta + condutor) | l_t |
| Altura do CM (bicicleta + condutor) em relação ao solo | h |
| Coeficiente de resistência ao rolamento nos pneus | μ_R |
| Coeficiente de atrito estático pneu-solo (limite de aderência) | μ |
| Coeficiente de dissipação no mancal da roda dianteira | b_d |
| Área de seção reta do condutor (em uma posição) | S |
| Coeficiente de arrasto do corpo do condutor (em uma posição) | C_D |

Referências Bibliográficas

ASSAD, M. M. **Implementação e validação experimental de estratégias de controle para estabilização e acompanhamento de trajetórias de motocicletas autônomas.** Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Proposta de Tese de Doutorado. Rio de Janeiro, Brasil. Março de 2015.

ASTROM, K. J., KLEIN, R. E., LENNARTSSON, A. **Bycicle dynamics and control – Adapted bicycles for education and research.** IEE Control Systems Magazine. Agosto de 2005.

GRACY, W. **The experimental determination of the moments of inertia of airplanes by a simplified compound - Pendulum method.** National Advisory Committee for Aeronautics (NACA). Langley Memorial Aeronautical Laboratory. Langley Field, Va. Technical Note No. 1626. Washington, USA. Junho de 1948.]

Avaliação de dados de medição - Guia para a expressão de incerteza de medição – GUM 2008. Inmetro. 1ª Edição Brasileira da 1ª Edição do BIPM de 2008. Rio de Janeiro, Brasil. 2012.

SHIGLEY, J. E. **Elementos de máquinas.** Livros Técnicos e Científicos Editora S. A. 1984

SPERANZA NETO, M. **Modelos de bicicletas e motocicletas para análise, simulação e síntese do controle de estabilidade e de trajetória.** Departamento de Engenharia mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil. Julho de 2011 (revisão em Agosto de 2013).

SPERANZA NETO, M. **Modelos para a análise da dinâmica longitudinal de bicicletas.** Departamento de Engenharia mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Notas de aula. Rio de Janeiro, Brasil. Maio de 2013.

WILSON, D. G. **Bycycling Science.** The MIT Press. Third Edition. ISBN 0-262-73154-1. London, England. 2004.

Anexo 1

```
%%%%%%%%%% Freios a disco %%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%Dados%%%%%%%%%
%%%%%%%%%

dist_ee = 1.12;      % Distancia entre eixos(m)
d_CG = 0.549;      % Distancia do eixo dianteiro ao CG (m)
t_CG = 0.571;      % Distancia do eixo traseiro ao CG (m)
y_CG = 0.534;      % Distancia do solo ao CG (m)
m = 31;           % Massa da bicicleta (kg)
Dr = 0.662;       % Diametro da roda (m)
re = 0.08;        % Raio externo do disco (m)
ri = 0.0633;      % Raio interno do disco (m)
fr_s = 0.9;       % atrito pneu-solo
v = 10;          % velocidade (m/s)
g = 9.80665;     % aceleração da gravidade (m/s)

rel = ri/re

% Supomos pastilha de amianto rigido moldado
thetap = 60;      % Angulo do setor circular da pinça
f = 0.31;        % Coef. de atrito do material da pastilha
Pad = 75;        % Pressão admissivel pela pastilha(Padm/10 ->tabela)

%Forças de Reação (traseira e dianteira)

Rt = ((d_CG*m*g) - (y_CG*m*fr_s*g))/dist_ee
Rd = (m*g) - Rt

%Torques (traseiro e dianteiro)

Td = (Dr/2)*fr_s*Rd
Tt = (Dr/2)*fr_s*Rt

%%% Hipotese de Desgaste Uniforme %%%%%%%%%%

Tmax_1 = (thetap*pi*Pad*6.9*f*ri*(re^2-ri^2)*10^3)/180

%%% Hipotese de Pressão Uniforme %%%%%%%%%%

Tmax_2 = (2/3*thetap*pi*Pad*6.9*f*(re^3-ri^3)*10^3)/180

%%% t_min %%%%%%%%%%
%Segundo enenergia de frenagem dissipada adiabaticamente
%%%%%%%%%
rho = 7.8*10^-6;   % (kg/m^3)
delta_theta = 400; % Incremento de temperatura
cp = 500;         % (J/kgK)

deltaQ = (m*(v/3.6)^2)/2
```


Resultados

$$Rt = 18.5661$$

$$Rd = 285.4401$$

$$Td = 85.0326$$

$$Tt = 5.5308$$

$$Tmax_1 = 25.4488$$

$$Tmax_2 = 28.9362$$

$$\text{delta}Q = 119.5988$$