

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Ana Beatriz de Goes Campos

**Concepção de uma Base Articulada para
Simulador Passivo de Bicicletas**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Mauro Speranza Neto

Rio de Janeiro
Junho de 2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Mauro Speranza Neto, principalmente pelo incentivo e confiança, mas também pelos ensinamentos e orientação ao longo desse projeto.

Aos meus pais, Lucia Maria Cabral de Goes e Marcos Paulo de Almeida Campos, por todo amor, apoio e incentivo não só durante esse curso como em toda a minha vida.

À minha família por estar ao meu lado em qualquer situação, me desejando sempre o melhor.

Ao meu companheiro, Paulo Simões P. Neto, por acreditar em mim e me incentivar durante todo esse processo.

À minha amiga, Paula S. Ferreira, pelo incentivo e parceria ao longo desses anos.

Aos meus amigos de curso, pelo companheirismo e apoio durante essa jornada.

À todos que me ajudaram durante esse projeto, principalmente Caio Aversari e Allan N. de Albuquerque.

Agradeço à PUC pelo apoio concedido no desenvolvimento deste trabalho.

Ana Beatriz de Goes Campos

RESUMO

Concepção de uma Base Articulada para Simulador Passivo de Bicicletas.

Desenvolvimento de um aparato passivo para fixação de uma bicicleta visando à futura construção de um simulador ativo com 3 graus de liberdade (velocidade longitudinal, ângulos de rolagem e guinada). Modelos 3D detalhados em Solid Works da bicicleta e do aparato para determinação das suas propriedades inerciais, a serem comparadas com testes experimentais realizados em uma bicicleta similar à detalhada no SW: posição (em relação aos pontos de contato dos pneus com o solo) e altura do centro de massa; momentos de inércia de rolagem e guinada; momentos de inércia das rodas. Avaliação do comportamento dinâmico de uma bicicleta instrumentada: velocidade e aceleração longitudinais, tempo de parada em frenagem, considerando diferentes relações de transmissão, em movimentos típicos (deslocamento em terreno plano, subida e descida de ladeiras); aceleração lateral, velocidades angulares de rolagem e guinada, ângulo de rolagem, ângulo de esterçamento do guidão, para comandos típicos do condutor em manobras padrão (skidpad, slalom e double lane change); coeficiente de dissipação nos mancais das rodas, tempo de queda. Tais informações visam a caracterização dos principais parâmetros e variáveis da bicicleta para definir as especificações do simulador: velocidade da base, limites dos ângulos de rolagem e guinada, posicionamento dos eixos de guinada e rolagem da base articulada em relação aos pontos de ancoragem da bicicleta, entre outros, de modo a garantir a maior aproximação possível do seu comportamento ao da bicicleta se deslocando normalmente/livremente. Construção de um protótipo do aparato em escala reduzida. Especificação de componentes da base articulada.

Palavras chaves: bicicleta, dinâmica da bicicleta, simulador

ABSTRACT

Design of an Articulated Base for the Passive Bike Simulator.

Development of a passive device to fix a bicycle aiming the future construction of an active simulator with 3 degrees of freedom (longitudinal speed, angles of roll and yaw). 3D models detailed in Solid Works of the bicycle and apparatus for determining their inertial properties, compared to the experimental tests on a bicycle similar to that detailed in the SW: position (in contact with the contact points of the tires with the ground) and height of the center of mass; moments of rolling and yaw inertia; moments of inertia of the wheels. Evaluation of the dynamic behavior of a bicycle: transmission speeds, stopping time in braking, change of speeds, change of direction, restriction of movement, ascent and descent of slopes; lateral acceleration, angular scroll and yaw speeds, roll angle, handlebar steering angle, for typical driver commands in standard maneuvers (skidpad, slalom and double lane change); coefficient of dissipation in the wheel bearings, fall time. This information aims to characterize the main parameters and variations of the bicycle to define as specifications of the model: base speed, roll and yaw limits, positioning of yaw axes and scrolling of the articulated base in relation to the anchor points of the bicycle, between others, in order to ensure a greater congruence of their behavior with the bicycle moving normally / freely. Construction of a prototype of the apparatus on a reduced scale. Specification of articulated base components.

Keywords: bicycle, bicycle's dynamics, simulator

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 TESTES ESTÁTICOS	11
2.1 Massa	11
2.2 Ângulos de esterçamento do guidão	12
2.3 Centro de massa	13
2.4 Momentos de inércia	15
2.5 Coeficientes de dissipação nos mancais das rodas	19
3 TESTES DINÂMICOS	21
3.1 Reta de 30 m	22
3.2 Skidpad	26
3.3 Slalom	29
3.4 Ladeira	32
4 PROTÓTIPOS EM ESCALA REDUZIDA	36
5 PROTÓTIPO EM ESCALA REAL	40
6 CONCLUSÃO	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

Lista de Figuras

2.1 Medição da reação normal dianteira com bicicleta horizontal	11
2.2 Medição da reação normal traseira com bicicleta horizontal	12
2.3 Medição da reação normal dianteira com bicicleta inclinada	14
2.4 Gráfico do coeficiente de dissipação nos mancais das rodas	20
3.1 Gráficos para ilustrar a utilização da média móvel	22
3.2 Testes na reta de 30m	22
3.3 Gráfico do RPM na reta de 30m	23
3.4 Gráfico da aceleração linear na reta de 30m	24
3.5 Modelo esquemático do Skidpad	27
3.6 Teste no circuito Skidpad	27
3.7 Gráfico da velocidade angular no Skidpad	28
3.8 Gráfico da aceleração centrípeta no Skidpad	28
3.9 Gráfico do ângulo de esterçamento do guidão no Skidpad	29
3.10 Gráfico da orientação do guidão no Skidpad	29
3.11 Modelo esquemático do Slalom	30
3.12 Teste no circuito Slalom	30
3.13 Gráfico da velocidade angular do operador 1 – 2x no Slalom	31
3.14 Gráfico da velocidade angular do operador 1 – 4x no Slalom	31
3.15 Gráfico da velocidade angular do operador 2 – 2x no Slalom	31
3.16 Gráfico da velocidade angular do operador 2 – 4x no Slalom	32
3.17 Gráfico do ângulo de esterçamento do guidão no Slalom	32
3.18 Ladeira de testes	33
3.19 Gráfico da aceleração vertical na ladeira	35
4.1 Protótipo em LEGO	36
4.2 Protótipo em MDF modelado no Solid Works	37
4.3 Protótipo em MDF	37
4.4 Bicicleta em escala reduzida modelado no Solid Works	38
4.5 Bicicleta em escala reduzida	38
4.6 Aparato em escala com bicicleta	39
5.1 Desenho esquemático do aparato em escala real	40
5.2 Bicicleta de referência	41

5.3 Bicicleta modelada em Solid Works	41
5.4 Propriedades da bicicleta em escala real	42
5.5 Ajuste de propriedades	43

Lista de Tabelas

2.1 Massas medidas para calculo de massa total	12
2.2 Ângulos de esterçamento	12
2.3 Massas medidas para cálculo de centro de massa	13
2.4 Distância entre eixos	14
2.5 Coordenadas de centro de massa	15
2.6 Período de oscilação de rolagem	16
2.7 Período de oscilação de arfagem	17
2.8 Período de oscilação de guinada	17
2.9 Dados para cálculo do momento de inércia	18
2.10 Momentos de inércia	19
2.11 Tempo de parada da roda	19
2.12 Dados para o cálculo do coeficiente de dissipação nos mancais	19
2.13 Coeficiente de dissipação nos mancais das rodas	20
3.1 Velocidade máxima em reta de 30m	23
3.2 Distância de frenagem (100% - 100%)	25
3.3 Distância de frenagem (0% - 100%)	25
3.4 Distância de frenagem (100% - 0%)	26
3.5 Velocidades e aceleração centrípeta no circuito Skidpad	28
3.6 Velocidade linear no circuito Slalom	30
3.7 Velocidade de subida em ladeira	33
3.8 Distância de frenagem na descida	34
3.9 Tempo de frenagem na descida	34
5.1 Levantamento de esteiras ergométricas	44
5.2 Momento de inércia de guinada	43
5.3 Torque de guinada	45
5.4 Coeficiente de mola	45

1 Introdução

A análise da dinâmica de uma bicicleta é fundamental para a melhor compreensão e estudo de veículos de duas rodas mais complexos como uma motocicleta. A motivação desse projeto é a elaboração de um simulador capaz de reproduzir todos os seus movimentos, de modo a servir como ferramenta para auxiliar nesse estudo, possibilitando a execução de testes mais controlados e permitindo maior repetibilidade para alcançar resultados mais consistentes.

O projeto em questão visa à futura construção de um aparato ativo com quatro graus de liberdade: deslocamento longitudinal, ângulos de rolagem, arfagem e guinada. Porém, consiste em uma versão simplificada, pois não possui todos os movimentos desejados, como o de arfagem. Será utilizada como base uma bicicleta do modelo Verden Bikes Challenge preto, aro 26, com a qual serão realizados testes dinâmicos e estáticos buscando obter suas propriedades inerciais. Tais testes servem de base de comparação para os valores obtidos através de seu detalhamento 3D em Solid Works. As propriedades como centro de massa, momentos de inércia, coeficiente de dissipação nos mancais, velocidade máxima, tempo e distancia de frenagem, entre outros, serão encontradas a partir desses testes e são de grande importância para se definir as características do aparato e especificar seus componentes.

Por fim, um protótipo em escala reduzida será construído, visando uma prova de conceito e possíveis aperfeiçoamentos do modelo. Este também terá seu modelo 3D detalhado em Solid Works para que possa ser construído, assim como sua bicicleta de referência.

Portanto, pode-se classificar os objetivos desse trabalho como:

- Desenvolvimento de um aparato passivo para fixação de uma bicicleta visando à futura construção de um simulador ativo com 3 graus de liberdade: velocidade longitudinal, ângulos de rolagem e guinada.
- Modelos 3D detalhados em Solid Works da bicicleta e do aparato para determinação das suas propriedades inerciais, a serem comparadas com testes experimentais realizados em uma bicicleta similar à detalhada.
- Avaliação do comportamento dinâmico de uma bicicleta instrumentada.
- Caracterização dos principais parâmetros e variáveis da bicicleta para definir as especificações do simulador.
- Construção de um protótipo do aparato em escala reduzida.
- Especificação de componentes da base articulada.

O Capítulo 2 diz respeito aos testes estáticos, explicando cada procedimento e apresentando seus resultados. O Capítulo 3 tratará dos testes dinâmicos e, assim como o anterior, descreverá os procedimentos e apresentará seus resultados. O Capítulo 4 é reservado para os protótipos em escala reduzida, dissertando sobre sua concepção e construção, além de apresentar desenhos 3D do Solid Works do aparato e de sua bicicleta em miniatura. Por fim, o Capítulo 5 será destinado ao protótipo em escala real, descrevendo sua concepção e apresentando cálculos para os componentes da base articulada.

2 TESTES ESTÁTICOS

Os testes estáticos visam à obtenção das propriedades inerciais da bicicleta utilizada. Tais como: posição em relação aos pontos de contato do pneu com o solo, massa, centro de massa, momento de inércia de rolagem e de guinada, momento de inércia das rodas, coeficiente de dissipação nos mancais das rodas e ângulo de esterçamento do guidão. Esses dados servirão de comparação para os modelos 3D da bicicleta e do aparato, desenvolvidos em Solid Works, baseados na bicicleta real. E assim, auxiliarão no desenvolvimento e construção do da base articulada.

Como cada instrumento de medida está associado a incertezas de medição, tanto em relação à limitação do instrumento quanto ao manuseio do operador, cada medida foi feita algumas vezes para minimizar possíveis erros. Os testes apresentados a seguir foram realizados pela turma de Introdução à Engenharia 2017.1 da PUC-Rio.

2.1 Massa

A massa da bicicleta foi calculada a partir das reações normais nos pontos de contato do pneu com o solo por conta da limitação de tamanho da mesa da balança utilizada. Assim, a medição desses valores (Tabela 2.1) foi feita com a bicicleta na posição horizontal, apoiando de cada uma de suas rodas sobre a balança, separadamente, como mostram as Figuras 2.1 e 2.2.



Figura 2.1 – Medição da reação normal dianteira com bicicleta horizontal



Figura 2.2 – Medição da reação normal traseira com bicicleta horizontal

	1ª medida	2ª medida	3ª medida	4ª medida	5ª medida	Média
Roda dianteira	6,7 kg	6,79 kg	6,80 kg	6,80 kg	6,78 kg	6,79 kg
Roda traseira	6,45 kg	6,44 kg	6,47 kg	6,48 kg	6,47 kg	6,46 kg
Massa total	-	-	-	-	-	13,25 kg*

Tabela 2.1 – Massas medidas para cálculo de massa total

*resultado obtido através de cálculos que utilizaram resultados de outras medições

2.2 Ângulo de esterçamento do guidão

Para medir o ângulo de esterçamento do guidão foi utilizado um transferidor. Porém, como um potenciômetro foi instalado na bicicleta com a função de medir esse ângulo nos testes dinâmicos, a medição com o transferidor foi limitada de modo a não danificá-lo. Os resultados se encontram na Tabela 2.2.

Ângulo máximo de esterçamento do guidão à direita	105°
Ângulo máximo de esterçamento do guidão à esquerda	100°

Tabela 2.2 – Ângulos de esterçamento

2.3 Centro de Massa

No cálculo do centro de massa foram aproveitadas as medidas das reações normais a cada roda com a bicicleta na posição horizontal, utilizadas no cálculo da massa total. Além disso, a mesma medição foi feita considerando a presença de dois condutores diferentes sobre a bicicleta, de modo a obter mudança nos resultados com a possível variação de centro de massa nessa situação. E, para finalizar, as reações normais foram medidas também com a bicicleta inclinada (Figura 2.3). A Tabela 2.3 apresenta os resultados obtidos.

(kg)	1ª medida	2ª medida	3ª medida	4ª medida	5ª medida	Média
Massa	-	-	-	-	-	13,25*
Massa com ciclista	-	-	-	-	-	61,45*
Massa da roda dianteira	6,78	6,79	6,80	6,80	6,78	6,79
Massa da roda traseira	6,45	6,44	6,47	6,48	6,47	6,46
Massa da roda dianteira com ciclista (1)	24,56	24,30	24,89	24,55	24,72	24,60
Massa da roda traseira com ciclista (1)	36,80	36,89	36,32	36,63	37,60	36,85
Massa da roda dianteira com ciclista (2)	34,30	34,92	33,45	33,80	33,69	34,03
Massa da roda traseira com ciclista (2)	49,28	49,29	49,69	47,69	48,29	48,85
Massa da roda dianteira (inclinada)	7,17	7,18	7,18	7,16	7,22	7,18
Massa da roda traseira (inclinada)	6,03	6,01	6,13	6,09	6,02	6,06

Tabela 2.3 – Massas medidas para cálculo de centro de massa

*resultado obtido através de cálculos que utilizaram resultados de outras medições



Figura 2.3 – Medição da reação normal dianteira com bicicleta inclinada

Primeiramente, foi escolhido o sistema de eixos a ser usado para encontrar as coordenadas do centro de massa da bicicleta. E, definiu-se sua origem no centro da roda traseira. O eixo horizontal é coincidente com a linha que intercepta os centros das rodas e o eixo vertical, logicamente, é o que passa pela origem.

O terceiro eixo é um eixo de simetria da bicicleta. Logo, não é preciso calcular sua coordenada do centro massa: será zero. A distância entre eixos foi previamente medida com uma trena, tanto com a bicicleta na horizontal como inclinada (Tabela 2.4).

(m)	1ª medida	2ª medida	3ª medida	4ª medida	5ª medida	Média / Resultado Final
Distância entre eixos (plano horizontal)	1,018	1,017	1,018	1,019	1,019	1,02
Distância horizontal entre eixos (bicicleta inclinada)	-	-	-	-	-	0,94*
Distância vertical entre eixos (bicicleta inclinada)	0,386	0,389	0,384	0,386	0,386	0,39

Tabela 2.4 – Distância entre eixos

*resultado obtido através de cálculos que utilizaram resultados de outras medições

Considerando a bicicleta na horizontal, pode-se calcular a coordenada longitudinal do centro de massa (X_{CM}). Com base na referência [1] e sabendo que a soma dos momentos na origem definida é igual a zero, tem-se que:

$$(m \times g) X_{CM} - R_{DH} \times L = 0 \quad (1)$$

$$X_{CM} = \frac{R_{DH} \times L}{m \times g} \quad (2)$$

onde L é a distância entre os eixos das rodas, R_{DH} é a força de reação na roda dianteira com a bicicleta horizontal, m é a massa da bicicleta e g é a aceleração da gravidade.

Através de um processo similar com a bicicleta inclinada, é possível encontrar a coordenada vertical do centro de massa (Y_{CM}). Assim como consta na referência [1].

$$Y_{CM} = \frac{L \times L' (R_{d1} - R_{d2})}{m \times g \times h} \quad (3)$$

onde, L' e h são, respectivamente, as distâncias horizontal e vertical entre eixos com a bicicleta inclinada, e R_{d1} é a força de reação na roda dianteira na mesma posição. As coordenadas encontradas para o centro de massa seguem na Tabela 2.5.

X_{CM}	0,52 m
Y_{CM}	0,14 m

Tabela 2.5 – Coordenadas de centro de massa

2.4 Momentos de inércia

O momento de inércia é a grandeza associada à inércia de rotação, ou seja, a resistência de um corpo em alterar sua velocidade angular em determinado eixo. Sendo assim, foi necessário estimar o período de oscilação da bicicleta nos eixos de rolagem (x), arfagem (y) e guinada (z). Para isso, a bicicleta foi suspensa por um aparato e presa no mesmo por barras finas a partir de seu centro de massa. Dessa forma, foi possível impulsioná-la de modo a gerar variações angulares nos eixos

desejados e, assim, medir o período de oscilações com a ajuda de um cronômetro. As Tabelas 2.6, 2.7 e 2.8 apresentam os resultados obtidos nas medições.

Para diminuir o erro do teste, foram medidos períodos relativos a 5, 10 e 15 oscilações para rolagem e arfagem e 3, 5 e 10 oscilações para guinada, visto que a perda de energia nesse grau de liberdade é maior. Além disso, cada medição foi realizada cinco vezes por operadores distintos e, dentre elas, foram escolhidas as três que menos diferiam entre si para gerar uma média.

Rolagem	1ª medida (s)	2ª medida (s)	3ª medida (s)	Média (s)	Período (s)
5 oscilações (1)	10,10	10,12	9,65	9,96	1,99
5 oscilações (2)	9,97	10,20	10,20	10,12	2,02
5 oscilações (3)	10,07	10,10	9,93	10,03	2,01
5 oscilações (4)	9,90	9,95	9,71	9,85	1,97
5 oscilações (5)	9,68	9,69	9,87	9,75	1,95
10 oscilações (1)	18,23	18,33	19,03	18,55	1,56
10 oscilações (2)	20,06	20,08	20,22	20,12	2,01
10 oscilações (3)	20,08	20,02	19,89	20,00	2,00
10 oscilações (4)	20,10	20,14	20,21	20,15	2,02
10 oscilações (5)	19,86	19,91	20,07	19,95	1,99
15 oscilações (1)	30,16	30,23	30,24	30,21	3,01
15 oscilações (2)	30,10	30,13	30,26	30,16	2,01
15 oscilações (3)	30,17	30,27	30,53	30,32	2,02
15 oscilações (4)	30,21	30,17	30,50	30,29	2,02
15 oscilações (5)	30,62	30,71	30,70	30,68	2,05

Tabela 2.6 – Período de oscilação de rolagem

Arfagem	1ª medida (s)	2ª medida (s)	3ª medida (s)	Média (s)	Período (s)
5 oscilações (1)	10,67	10,77	10,87	10,77	2,15
5 oscilações (2)	10,91	10,93	10,96	10,93	2,19
5 oscilações (3)	10,76	11,05	10,97	10,93	2,19
5 oscilações (4)	10,69	10,87	11,21	10,92	2,18
5 oscilações (5)	10,79	10,80	11,13	10,91	2,18
10 oscilações (1)	22,58	22,42	22,30	22,43	2,24
10 oscilações (2)	21,80	21,82	22,02	21,88	2,19
10 oscilações (3)	22,03	22,06	21,86	21,98	2,20
10 oscilações (4)	22,12	22,16	22,17	22,15	2,22
10 oscilações (5)	22,30	22,70	22,13	22,38	2,24
15 oscilações (1)	33,30	33,31	33,15	33,25	2,22
15 oscilações (2)	33,06	33,24	33,48	33,26	2,22
15 oscilações (3)	33,30	33,34	33,38	33,34	2,22
15 oscilações (4)	33,32	33,38	33,42	33,37	2,22
15 oscilações (5)	33,33	33,41	33,33	33,36	2,22

Tabela 2.7 – Período de oscilação de arfagem

Guinada	1ª medida (s)	2ª medida (s)	3ª medida (s)	Média (s)	Período (s)
3 oscilações (1)	10,55	10,60	10,81	10,65	3,55
3 oscilações (2)	10,93	10,94	11,44	11,10	3,70
3 oscilações (3)	10,90	10,81	10,88	10,86	3,62
3 oscilações (4)	10,75	10,80	10,85	10,80	3,60
3 oscilações (5)	10,04	10,14	10,15	10,11	3,37
5 oscilações (1)	17,88	17,88	17,90	17,89	3,58
5 oscilações (2)	17,78	17,94	17,98	17,90	3,58
5 oscilações (3)	17,94	17,94	17,90	17,93	3,59
5 oscilações (4)	17,84	17,93	17,91	17,89	3,58
5 oscilações (5)	16,93	16,96	17,08	16,99	3,40
10 oscilações (1)	35,46	35,53	35,54	35,51	3,55
10 oscilações (2)	35,50	35,54	35,79	35,61	3,56
10 oscilações (3)	35,58	35,59	35,72	35,63	3,56
10 oscilações (4)	36,44	36,44	36,42	36,43	3,64
10 oscilações (5)	36,25	36,18	36,19	36,21	3,62

Tabela 2.8 – Período de oscilação de guinada

Duas expressões foram utilizadas [1] para calcular os momentos de inércia de rolagem (I_X), arfagem (I_Y) e guinada (I_Z).

$$I_X = \frac{m \cdot g \cdot h}{4 \pi^2} T_X^2 - m \cdot h^2 + m(R + Y_{CM})^2 \quad (4)$$

$$I_Y = \frac{m \cdot g \cdot h}{4 \pi^2} T_Y^2 - m \cdot h^2 \quad (5)$$

$$I_Z = \frac{m \cdot g \cdot d^2}{4 \pi^2 L} T_Z^2 \quad (6)$$

onde tem-se:

- $m \rightarrow$ Massa da bicicleta.
- $g \rightarrow$ Força da gravidade.
- h e $L \rightarrow$ Comprimentos dos fios utilizados na suspensão da bicicleta.
- $R \rightarrow$ Raio da roda.
- $d \rightarrow$ Distância entre o eixo de rotação e o ponto de suspensão da bicicleta.
- $Y_{CM} \rightarrow$ Coordenada Y do centro de massa.
- $T_X \rightarrow$ Período médio de rolagem.
- $T_Y \rightarrow$ Período médio de arfagem.
- $T_Z \rightarrow$ Período médio de guinada.

Os valores relativos à essas variáveis se encontram na Tabela 2.9.

m (kg)	13,25
g (m/s²)	9,81
h (m)	0,99
L (m)	0,82
R (m)	0,33
d (m)	0,20
Y_{CM} (m)	0,14
T_X (s)	2,00
T_Y (s)	2,21
T_Z (s)	3,57

Tabela 2.9 – Dados para cálculo do momento de inércia

Os valores acima foram substituídos nas expressões (4) a (6) e seus resultados se encontram na Tabela 2.10.

Momento de inércia de rolagem (I_x)	3,02 kg·m ²
Momento de inércia de arfagem (I_y)	2,96 kg·m ²
Momento de inércia de guinada (I_z)	2,02 kg·m ²

Tabela 2.10 - Momentos de inércia

2.5 Coeficiente de dissipação nos mancais das rodas

Para o cálculo do coeficiente de dissipação nos mancais será avaliado o tempo que a roda demora para parar completamente após ser impulsionada (Tabela 2.11). Assim, a bicicleta foi suspensa de modo a deixar sua roda girar livremente e uma força, F , foi aplicada para fazê-la girar.

Tempo de parada da roda (s)	1ª medida	2ª medida	3ª medida	Média
Operador 1	109,67	109,72	109,70	109,70
Operador 2	110,50	110,68	110,74	110,64
Operador 3	113,61	113,65	113,65	113,64
Operador 4	107,63	107,95	107,79	107,79
Operador 5	111,89	111,83	112,60	112,11

Tabela 2.11 – Tempo de parada da roda

Para o cálculo do momento de inércia na roda, foi usada a expressão abaixo, onde m é a massa da roda dianteira e R , o raio, que foram medidos anteriormente para outros procedimentos.

$$J = mR^2 \quad (7)$$

Substituindo os valores na fórmula, foi encontrado o momento de inércia na roda. Para o cálculo do coeficiente de dissipação, também será preciso usar o tempo de parada médio da roda. Os dados necessários se encontram na Tabela 2.12.

m (kg)	R (m)	J (kg·m²)	t (s)
6,79	0,33	0,204	110,78

Tabela 2.12 – Dados para o cálculo do coeficiente de dissipação nos mancais

$$t = 4\tau \quad (8)$$

$$\tau = \frac{J}{b} \quad (9)$$

Pelas expressões acima é possível obter o coeficiente de dissipação (Tabela 2.13).

$$b = \frac{4J}{t} \quad (10)$$

	b (kg m² /s)
Coeficiente de dissipação nos mancais	7,366×10⁻³

Tabela 2.13 – Coeficiente de dissipação nos mancais das rodas

É importante ressaltar que a resistência do ar também é um fator que influencia no tempo de parada da roda e, nos cálculos feitos, ela foi desprezada. Isso pode implicar em alguns erros no resultado.

Para melhor visualização do fenômeno, foi traçado um gráfico “Velocidade angular x Tempo” (Figura 2.4). Nele é possível ver o decaimento da velocidade ao longo do tempo, o que ocorre devido ao coeficiente de dissipação.

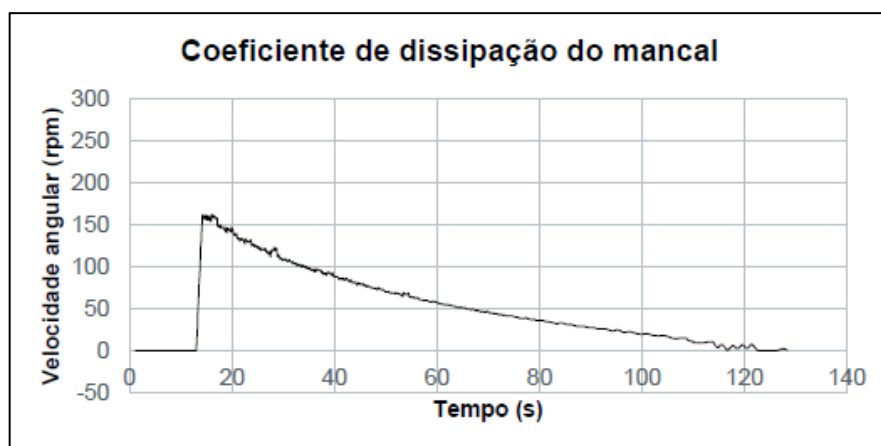


Figura 2.4 – Gráfico do coeficiente de dissipação nos mancais das rodas

3 TESTES DINÂMICOS

Analisar o comportamento dinâmico da bicicleta é fundamental para definir os principais parâmetros necessários para especificar o simulador, de modo a projetá-lo da maneira mais próxima possível ao comportamento da bicicleta. Entre esses parâmetros tem-se a velocidade da base, limites dos ângulos de rolagem e guinada, posicionamento dos eixos, entre outros.

Para isso, foram realizados os testes dinâmicos no deslocamento em terreno plano e subida e descida de ladeira, manobras como Skidpad e Slalom para, assim, obter velocidade e aceleração longitudinais, tempo de parada em frenagem, aceleração lateral, velocidades de rolagem e guinada, ângulo de rolagem e o tempo de queda. Tais testes foram realizados pela turma de Introdução a Engenharia 2017.1 da PUC-Rio.

A bicicleta foi instrumentada com potenciômetros no guidão e nos manetes de freio, além de portar sensor de efeito Hall, Arduino e IMU. Assim, todos os dados necessários podem ser coletados durante os testes.

O potenciômetro é um componente eletrônico que possui uma resistência elétrica variável e um cursor móvel. A posição desse cursor determina a voltagem do sinal de saída. Assim, é possível medir o ângulo de esterçamento do guidão ou identificar o uso dos freios, por exemplo.

O sensor de efeito Hall é um sensor magnético. Então, ele obtém informações através de mudanças no campo magnético e as converte em sinais elétricos, que são processados por circuitos eletrônicos. Dessa forma, utilizando um ímã em rotação, por exemplo, é possível determinar o número de rotações efetuadas.

O IMU é um sensor capaz de coletar a velocidade angular, aceleração linear e a orientação do veículo em relação ao campo magnético da Terra, captando sinais analógicos correspondentes aos eixos x, y e z. E o Arduino é o componente responsável pelo armazenamento dos dados enviados pelos sensores.

Como esses aparelhos estão sujeitos a possíveis problemas, os resultados obtidos apresentam erros pontuais. A maneira utilizada para filtrar esses dados, de modo a obter análises mais próximas à realidade, foi uma ferramenta do Excell chamada média móvel (Figura 3.1). Com ela, as curvas ficam mais claras e, assim, os gráficos se tornam mais compreensíveis para análise.

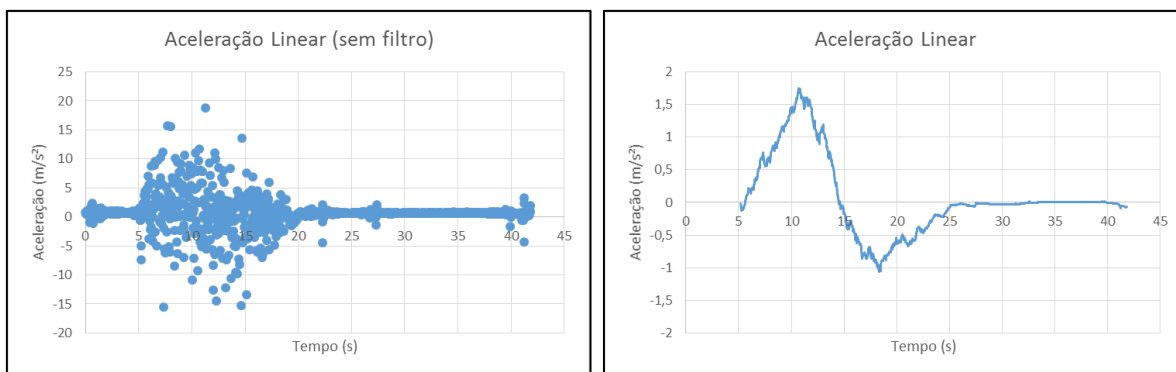


Figura 3.1 – Gráficos para ilustrar a utilização da média móvel

3.1 Reta de 30 m

O percurso se trata de uma reta de 30 metros, sem inclinação, no qual foram testadas diferentes relações de transmissão (Figura 3.2). Para a realização dos testes de medição da velocidade máxima e da distância de frenagem foram usados dois operadores diferentes, de forma a tentar obter resultados mais confiáveis. Os ciclistas pedalarão com a maior velocidade que foi possível na distância estipulada, pois o tamanho da pista limitou o alcance de uma velocidade maior. Então, os resultados obtidos não correspondem à velocidade máxima real.



Figura 3.2 – Testes na reta de 30m

Os sensores acoplados à bicicleta mediram a frequência de giro da roda, em RPM, e com esses valores foi possível obter os valores de velocidade alcançados

(Tabela 3.1). A expressão utilizada se encontra abaixo, onde R é o raio da roda e f , a frequência.

$$v = \frac{2\pi R}{60} f \quad (11)$$

Relação de transmissão	Velocidade máxima (m/s)	
	Operador 1	Operador 2
1 e 2	7,20	8,34
1 e 3	7,30	7,61
1 e 4	7,73	7,40
2 e 2	8,08	8,08
2 e 3	7,40	7,51
2 e 4	8,49	7,61
2 e 5	7,30	7,20
2 e 6	7,10	7,20
3 e 4	7,96	7,30
3 e 5	7,30	7,10
3 e 6	6,57	6,41
3 e 7	7,40	5,15

Tabela 3.1 – Velocidade máxima em reta de 30m

É possível observar pela Tabela 3.1 que o uso das diferentes relações de transmissão não interferiu significativamente no alcance da velocidade máxima, já que os resultados foram bem próximos e variaram muito. A conclusão chegada foi que o tamanho da pista utilizada para os testes (30 m) foi insuficiente para acelerar o veículo à velocidade máxima, visto que usando diferentes relações de transmissão não foi possível observar variações de velocidade coerentes.

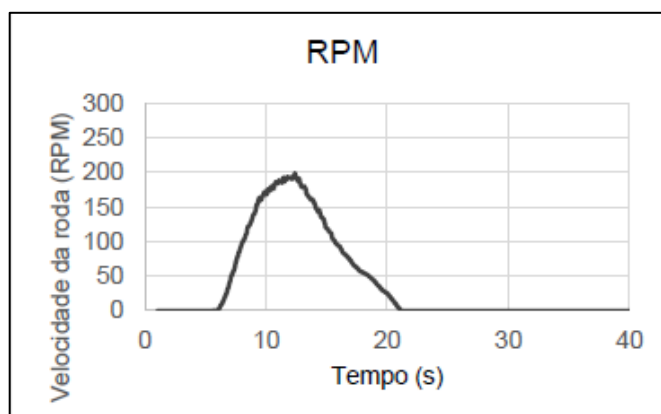


Figura 3.3 – Gráfico do RPM na reta de 30m

O gráfico das rotações (Figura 3.3) mostrou-se como o esperado. Inicialmente há um grande aumento na velocidade da roda e, aos poucos, a curva tende a se estabilizar, à medida que os valores aproximam da velocidade máxima. Além disso, as rotações caem abruptamente por volta do instante igual a 12,5 s, quando os freios são acionados.

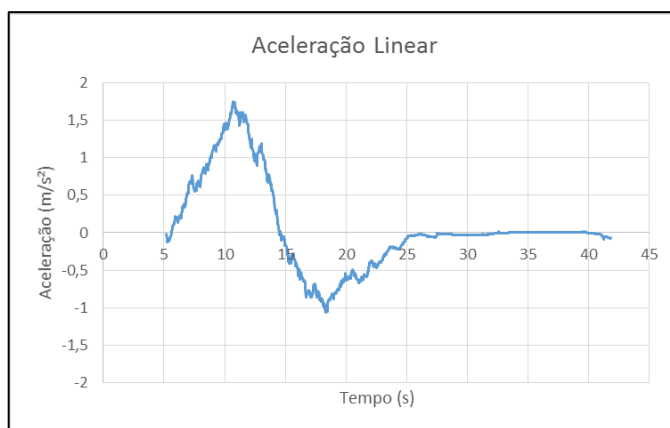


Figura 3.4 – Gráfico da aceleração linear na reta de 30m

O gráfico da aceleração (Figura 3.4) também se mostrou como o esperado, visto que seus valores aumentam abruptamente desde o momento de partida até ser atingida a velocidade máxima. E, a partir do momento em que os freios são acionados, é possível ver que sua aceleração se torna negativa até, enfim, atingir o repouso.

A distância de frenagem, por sua vez, foi registrada por sensores desde o momento em que os freios foram acionados até quando a velocidade da bicicleta se tornou nula. Três situações foram estudadas: o acionamento de ambos os freios (Tabela 3.2), o acionamento somente do freio traseiro (Tabela 3.3) e, depois, somente do dianteiro (Tabela 3.4). Assim como nos outros testes, foram utilizados diferentes relações de transmissão.

Relação de transmissão	Distância de frenagem (m) (100% dianteiro – 100% traseiro)	
	Operador 1	Operador 2
1 e 2	4,78	2,64
1 e 3	7,20	3,44
1 e 4	7,68	5,33
2 e 2	7,70	6,16
2 e 3	8,70	6,43
2 e 4	9,04	6,96
2 e 5	8,21	6,27
2 e 6	9,28	6,82
3 e 4	8,32	7,10
3 e 5	7,66	5,65
3 e 6	8,10	5,18
3 e 7	6,20	4,70

Tabela 3.2 – Distância de frenagem (100% - 100%)

Relação de transmissão	Distância de frenagem (m) (0% dianteiro – 100% traseiro)	
	Operador 1	Operador 2
1 e 2	8,30	3,56
1 e 3	11,12	4,67
1 e 4	11,78	5,95
2 e 2	13,13	4,98
2 e 3	13,82	7,99
2 e 4	15,74	7,23
2 e 5	14,27	8,35
2 e 6	12,29	8,22
3 e 4	14,88	8,44
3 e 5	13,90	7,80
3 e 6	12,52	7,01
3 e 7	9,96	8,02

Tabela 3.3 – Distância de frenagem (0% - 100%)

Relação de transmissão	Distância de frenagem (m) (100% dianteiro – 0% traseiro)	
	Operador 1	Operador 2
1 e 2	16,25	11,80
1 e 3	21,31	10,95
1 e 4	16,98	13,50
2 e 2	22,15	21,66
2 e 3	20,55	17,31
2 e 4	22,16	16,75
2 e 5	23,15	16,78
2 e 6	22,08	13,77
3 e 4	21,24	11,80
3 e 5	20,85	11,95
3 e 6	16,84	10,23
3 e 7	16,48	8,75

Tabela 3.4 – Distância de frenagem (100% - 0%)

Assim como na Tabela 3.1, os resultados de distância de frenagem relativos às relações de transmissão são inconclusivos, pois variam de forma desordenada. O que remete à mesma conclusão chagada anteriormente: a pista de 30 m foi insuficiente para a análise dos parâmetros atrelados às relações de transmissão. Porém, os resultados foram coerentes com o uso dos freios, já que as menores distâncias de frenagem foram obtidas com o uso de ambos os freios e, em segundo lugar, com o uso do freio traseiro.

3.2 Skidpad

O Skidpad é um circuito que consiste em dois círculos concêntricos de raio diferentes, formando uma pista circular, como mostra a Figura 3.5. Com ele, é possível avaliar o comportamento da bicicleta, sua aceleração centrípeta e velocidades linear e angular. O circuito utilizado possuía 5 m de raio (Figura 3.6). O teste foi efetuado duas vezes, com dois operadores diferentes, para obter resultados mais confiáveis.

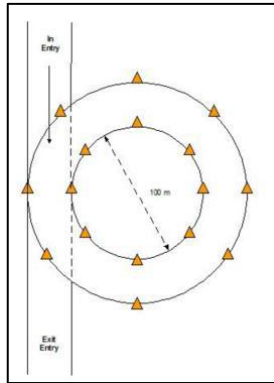


Figura 3.5 – Modelo esquemático do Skidpad



Figura 3.6 – Teste no circuito Skidpad

Para obter a velocidade linear foi utilizada a Equação (11), substituindo a frequência média obtida pelos sensores acoplados à bicicleta. A velocidade angular, por sua vez, foi obtida através da média dos módulos da velocidade angular no eixo x . Como a velocidade angular se mostrou praticamente constante, a aceleração centrípeta pode ser calculada a partir do valor da mesma, utilizando a equação (12), na qual R corresponde ao raio da roda e ω à velocidade angular.

$$a_{cp} = R\omega^2 \quad (12)$$

Ao realizar tal cálculo, o valor obtido se mostrou 34,48% menor que o valor medido pelos sensores: $0,964 \text{ m/s}^2$. Mas, ainda assim, indica certa compatibilidade do modelo teórico com o real, por ser da mesma ordem de grandeza. A Tabela 3.5

dispõe dos resultados calculados, enquanto as Figuras 3.7 e 3.8 apresentam as medições obtidas pelos sensores.

	Operador 1	Operador 2
Velocidade linear (m/s)	2,62	3,92
Velocidade angular (rad/s)	0,44	0,62
Aceleração centrípeta (m/s²)	1,47	1,81

Tabela 3.5 – Velocidades e aceleração centrípeta no circuito Skidpad

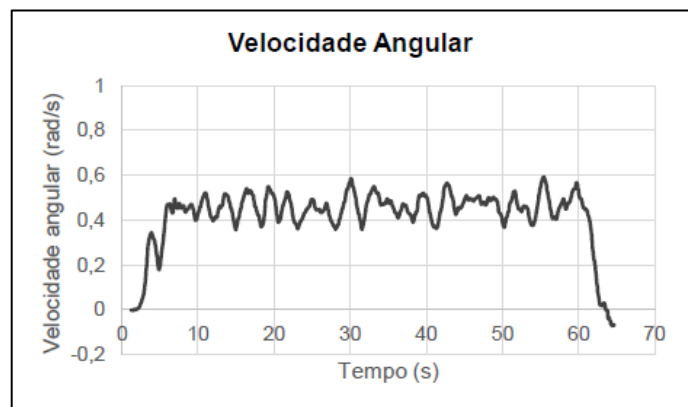


Figura 3.7 – Gráfico da velocidade angular no Skidpad

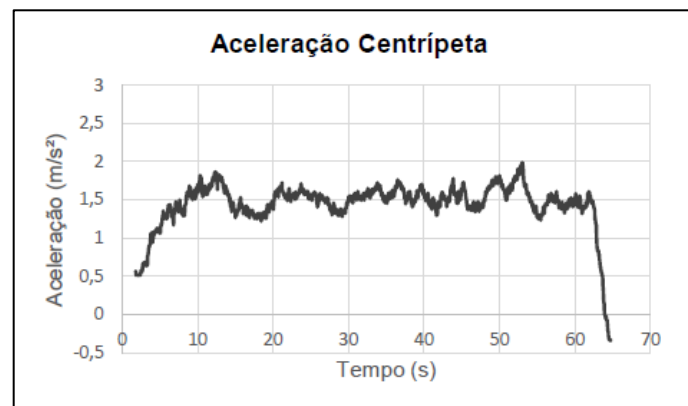


Figura 3.8 – Gráfico da aceleração centrípeta no Skidpad

O ângulo de esterçamento do guidão também foi avaliado e se mostrou com variação constante entre os valores de 20 a 25 graus. O comportamento da variável ocorreu como o esperado, pois para percorrer o percurso circular em velocidade constante a variação angular do guidão deve ser pequena, como apresentado na Figura 3.9.

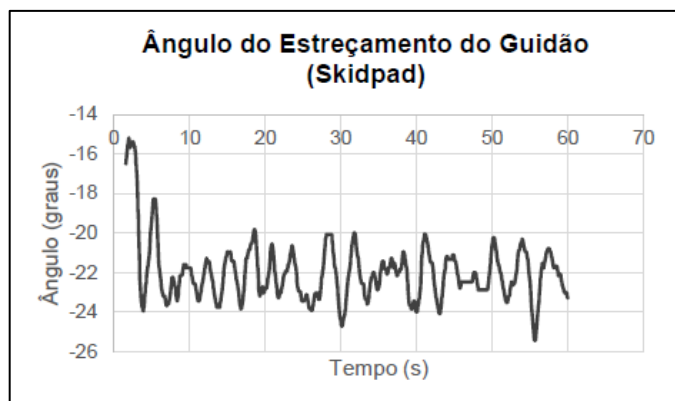


Figura 3.9 – Gráfico do ângulo de esterçamento do guidão no Skidpad

O gráfico da orientação (Figura 3.10) mostra a trajetória da bicicleta durante o circuito. Os valores máximos correspondem a quando a bicicleta estava apontada para o norte e os mínimos, para o sul. Assim, é possível dizer que o gráfico corresponde à realidade. Como a trajetória é circular, é esperado que seu comportamento seja senoidal, variando de norte a sul. Sendo uma volta completa no percurso o equivalente à curva entre dois picos.

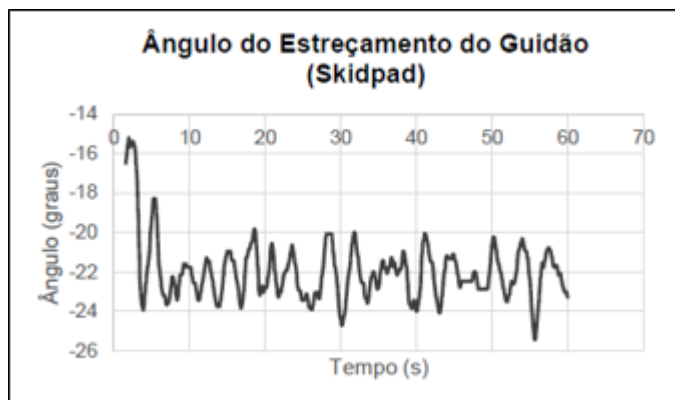


Figura 3.10 – Gráfico orientação do guidão no Skidpad

3.3 Slalom

O Slalom se trata de um circuito com cones enfileirados que o veículo deve percorrer contornando-os de maneira alternada, como é mostrado na Figura 3.11. O teste foi realizado duas vezes, alterando as distâncias entre os cones (Figura 3.12). Na primeira vez, essa distância foi o dobro da distância entre eixos (2x), já na segunda, o quádruplo (4x). Porém, assim como no Skidpad, cada teste também foi realizado duas vezes, com operadores diferentes.

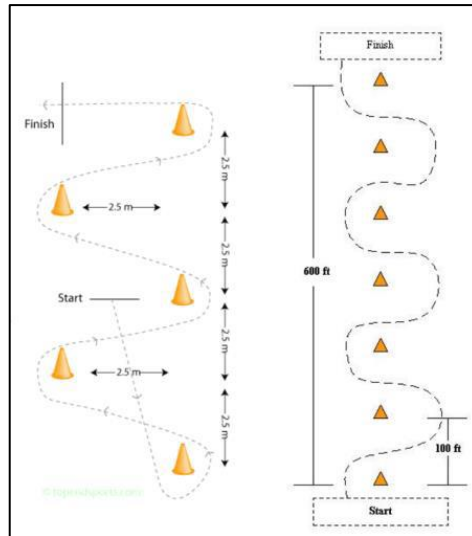


Figura 3.11 – Modelo esquemático do Slalom

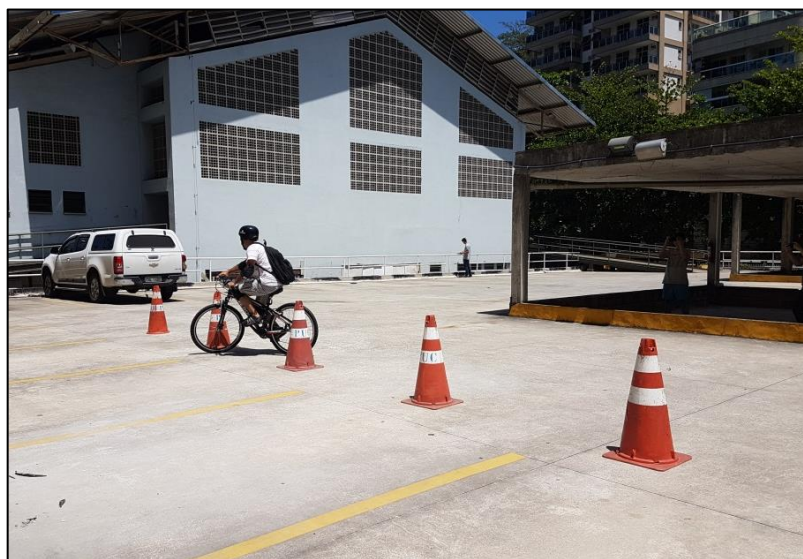


Figura 3.12 – Teste no circuito Slalom

Para calcular a velocidade linear em cada um dos testes foi usada a Equação (11), substituindo a frequência média obtida com os sensores, assim como no teste anterior. Os resultados obtidos se encontram na Tabela 3.6.

Velocidade linear (m/s)	Operador 1	Operador 2
2x	2,28	2,02
4x	2,57	2,81

Tabela 3.6 – Velocidade linear no circuito Slalom

A fim de avaliar as diferentes velocidades angulares obtidas pelos sensores acoplados na bicicleta, foram traçados os gráficos de cada operador durante os testes (Figuras 3.13, 3.14, 3.15 e 3.16). Além disso, também foi avaliado o comportamento do ângulo de esterçamento do guidão (Figura 3.17). Pode-se observar que todos os gráficos se comportam de maneira senoidal, de acordo com o esperado para o Slalom, já que há um movimento alternado ao se contornar os cones.

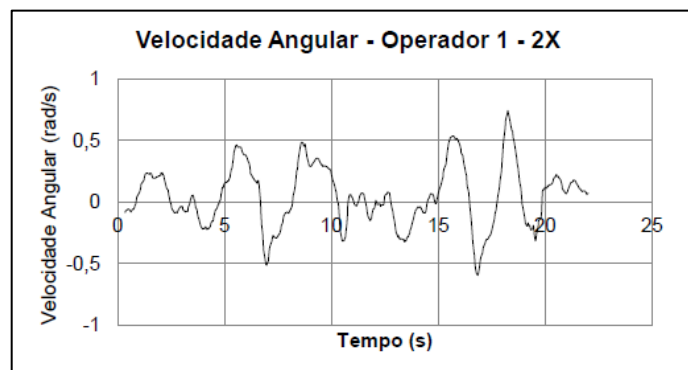


Figura 3.13 – Gráfico da velocidade angular do operador 1 – 2x no Slalom

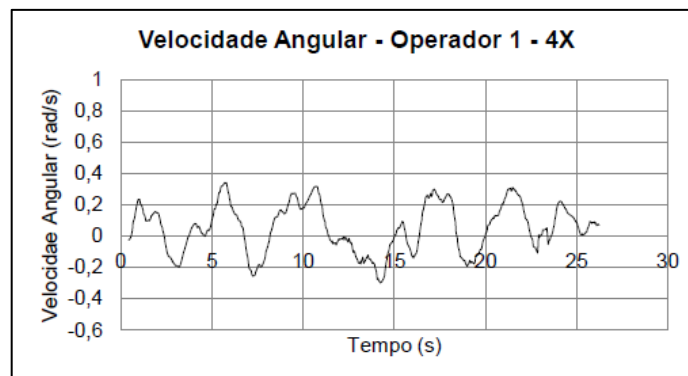


Figura 3.14 – Gráfico da velocidade angular do operador 1 – 4x no Slalom

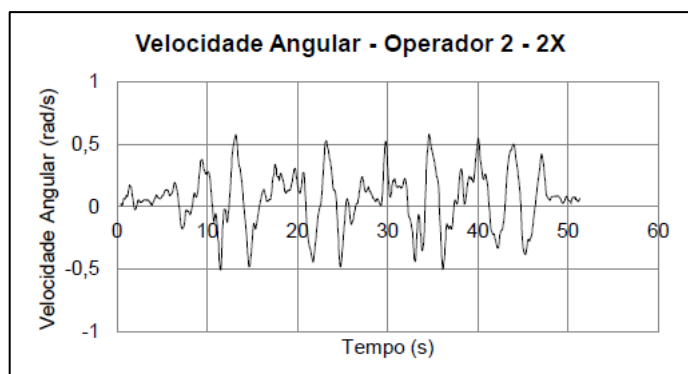


Figura 3.15 – Gráfico da velocidade angular do operador 2 – 2x no Slalom

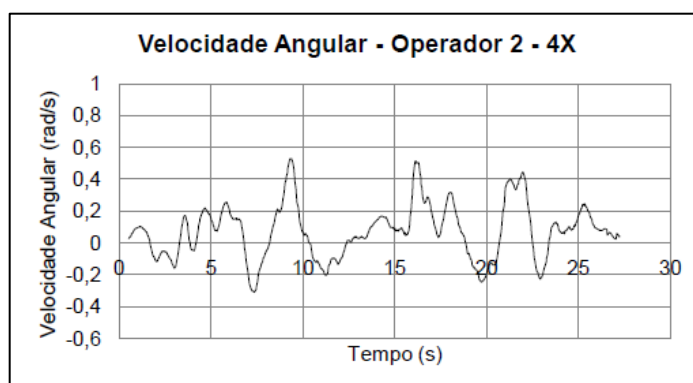


Figura 3.16 – Gráfico da velocidade angular do operador 2 – 4x no Slalom

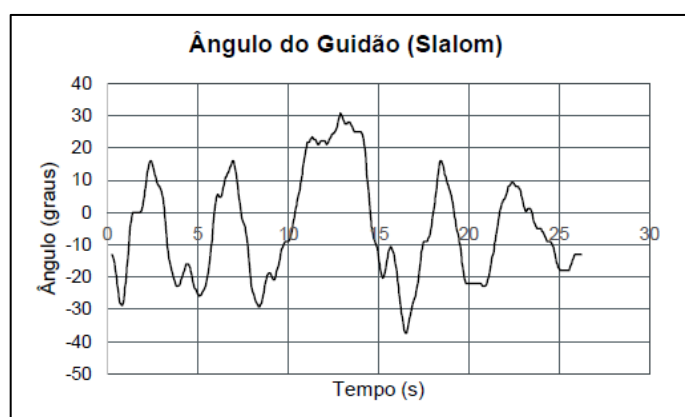


Figura 3.17 – Gráfico do ângulo de esterçamento do guidão no Slalom

3.4 Ladeira

Os testes em ladeira foram feitos com o objetivo de medir a velocidade de subida, a distância de frenagem e o tempo de descida (Figura 3.18). Para isso, foram usados diferentes relações de transmissão e dois operadores distintos. Assim como nos outros testes, para obter-se a velocidade linear foi utilizada a Equação (11).

Na Tabela 3.7, é possível observar que a velocidade de subida em ladeira diminui gradativamente com o aumento das marchas, pois com as marchas de força fica cada vez mais difícil manter a velocidade. Porém pode-se observar também que há alguns aumentos repentinos na velocidade, que podem ser caracterizados pelo nível de esforço do condutor, que é variável.



Figura 3.18 – Ladeira de testes

Relação de transmissão	Velocidade de subida (m/s)	
	Operador 1	Operador 2
1 e 2	2,11	1,84
1 e 3	2,13	1,90
1 e 4	2,37	2,01
2 e 2	2,13	1,89
2 e 3	2,05	1,66
2 e 4	2,19	1,62
2 e 5	2,04	1,62
2 e 6	1,26	1,71
3 e 4	1,68	1,54
3 e 5	1,61	1,78
3 e 6	1,51	1,62
3 e 7	1,95	1,56

Tabela 3.7 – Velocidade de subida em ladeira

A distância de frenagem foi medida com auxílio do sensor de acionamento dos freios, a partir do momento de acionamento até a parada total da bicicleta (Tabela 3.8). O procedimento repetiu-se para cada relação de transmissão. A medição do tempo de frenagem foi semelhante. Foi usado o mesmo procedimento, porém medindo o tempo levado para a parada do veículo (Tabela 3.9).

Relação de transmissão	Distância de frenagem na descida (m)	
	Operador 1	Operador 2
1 e 2	9,78	7,65
1 e 3	14,03	7,14
1 e 4	15,46	7,08
2 e 2	17,68	8,92
2 e 3	19,39	10,02
2 e 4	21,29	11,05
2 e 5	16,70	13,26
2 e 6	19,92	11,71
3 e 4	21,30	10,71
3 e 5	19,04	10,74
3 e 6	19,85	11,19
3 e 7	13,08	10,89

Tabela 3.8 – Distância de frenagem na descida

Relação de transmissão	Tempos de frenagem (s)	
	Operador 1	Operador 2
1 e 2	3,70	3,77
1 e 3	4,48	3,34
1 e 4	4,45	3,38
2 e 2	5,41	3,46
2 e 3	5,25	4,08
2 e 4	5,14	4,60
2 e 5	5,72	4,62
2 e 6	5,85	4,64
3 e 4	6,07	3,88
3 e 5	5,45	3,85
3 e 6	5,58	4,03
3 e 7	4,27	3,92

Tabela 3.9 – Tempo de frenagem na descida

Conforme o aumento da marcha, pode-se perceber que a distância de frenagem aumenta. Consequentemente, o mesmo ocorre com o tempo de frenagem. Porém, nas últimas medições, as marchas são muito pesadas, o que faz com que o piloto tenha que fazer mais esforço para que a bicicleta continue em movimento. O resultado disso é um possível aumento da velocidade ao descer a ladeira, gerando a diminuição da distância e do tempo de frenagem.

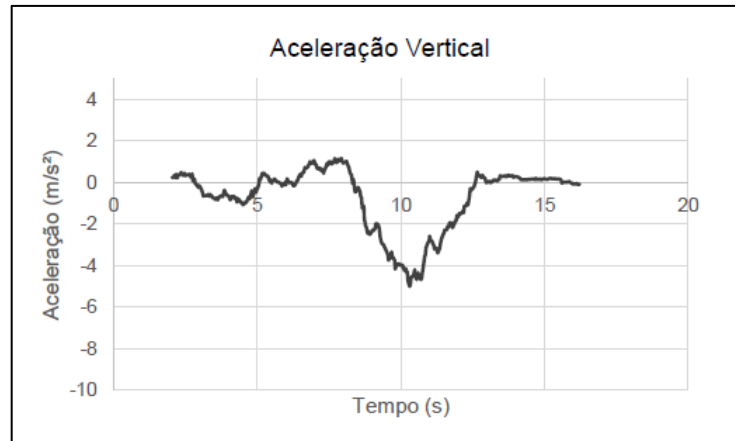


Figura 3.19 – Gráfico da aceleração vertical na ladeira

O gráfico acima (Figura 3.19) tem como objetivo observar o comportamento da aceleração vertical. Nele, é possível reconhecer o momento que a bicicleta começa a descer a ladeira, pois corresponde ao instante em que a aceleração vertical se torna negativa. Quando a bicicleta termina de descer a ladeira, sua aceleração vertical se torna nula novamente.

4 PROTÓTIPOS EM ESCALA REDUZIDA

O desenvolvimento de um protótipo é uma etapa de extrema importância no que se diz respeito da concepção de um aparato. Sua finalidade é testar o produto para detectar possíveis falhas de projeto e, assim, buscar aperfeiçoá-lo. No projeto em questão foram feitos dois protótipos em escala reduzida, com materiais diferentes. Eles visam prova de conceito e reproduzir movimentos gerados por uma possível simulação. O primeiro foi feito de LEGO (Figura 4.1) e teve como objetivo somente uma primeira visualização do aparato e de suas funções. Não tem fidelidade ao modelo real, além de seu funcionamento.



Figura 4.1 – Protótipo em LEGO

O segundo, apesar de ter os mesmos graus de liberdade da plataforma LEGO, foi feito de MDF (Figura 4.2) e possui um modelo mais aproximado do simulador em escala real. Porém, apesar de visar construir futuramente um simulador atuado, o modelo em escala não possui atuação.

O primeiro protótipo não teve necessidade de ser modelado em Solid Works, já que sua estrutura é facilmente alterável. Mas como o segundo foi feito de MDF, seu modelo 3D tem extrema importância, pois suas peças foram cortadas a laser, a fim de se obter maior precisão na hora da montagem. Seu desenho 3D é mostrado na Figura 4.3.

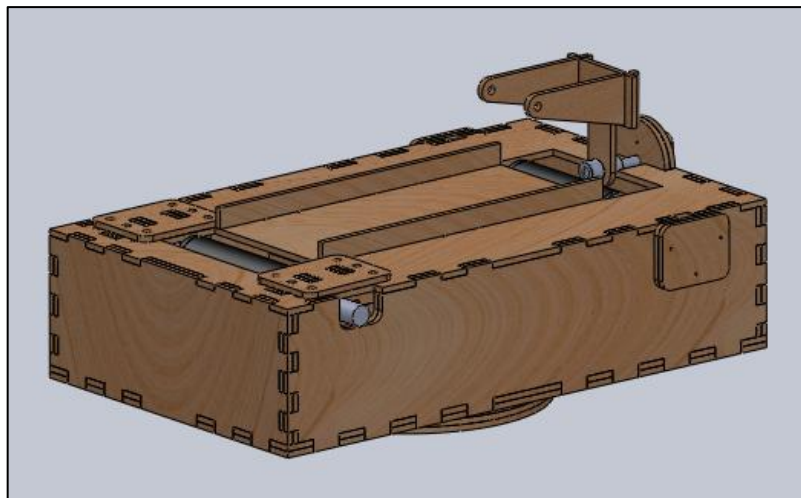


Figura 4.2 – Protótipo em MDF modelado no Solid Works

O aparato em escala reduzida dispõe de 28 cm de comprimento, 17 cm de largura e, aproximadamente, 12,5 cm de altura total (Figura 4.3). Seu material foi escolhido por sua disponibilidade e por seu preço acessível. Além disso, como é um material bastante usado para protótipos na PUC-Rio, há recursos disponíveis para lidar com ele, como a máquina de corte a laser.

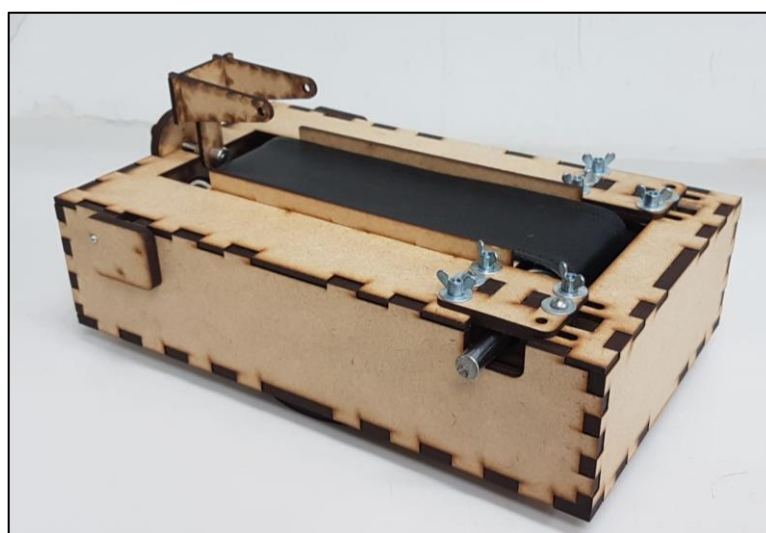


Figura 4.3 – Protótipo em MDF

Uma bicicleta em escala também foi modelada (Figura 4.4), de modo a servir como parâmetro para a concepção e dimensionamento da plataforma em MDF. Ela

foi baseada em uma miniatura feita de aço e plástico (Figura 4.5) que possui o mesmo número de graus de liberdade e tem modelo semelhante à bicicleta real.



Figura 4.4 – Bicicleta em escala reduzida modelada no Solid Works



Figura 4.5 – Bicicleta em escala reduzida

O simulador que se deseja construir possui três graus de liberdade: deslocamento longitudinal, ângulos de rolagem e guinada. Portanto, eles foram reproduzidos em seu protótipo. O deslocamento longitudinal é realizado por uma esteira, localizada no bloco superior do aparato. Ela é suportada por dois rolos, que possibilitam seu movimento, e aparada por guias, para que não se mova lateralmente.

A bicicleta é sustentada em pé sobre a esteira com o auxílio de um suporte, conectado ao eixo de sua roda traseira (Figura 4.6). Esse suporte é também responsável por seu ângulo de rolagem. Ele é conectado a um único eixo móvel, em seu centro, o que possibilita sua rotação. Além disso, é nivelado com o plano de contato da bicicleta com a esteira, para que possua os mesmos eixos de referência.



Figura 4.6 – Aparato em escala com bicicleta

O movimento de guinada é possibilitado por um rolamento localizado no bloco inferior do aparato. É um bloco circular, com 13,2 cm de diâmetro, contendo um suporte dimensionado para um motor tipo Servo Standart.

5 PROTÓTIPO EM ESCALA REAL

Esse aparato se trata de uma versão simplificada de um futuro projeto de simulador ativo de bicicletas, capaz de reproduzir o comportamento do veículo como se estivesse se deslocando livremente. Porém, considerando apenas os movimentos mais relevantes no projeto em questão. Não foi incluída a arfagem, devida ao deslocamento rotacional dos quadros sobre os pneus e/ou suspensão. Sua concepção visa possibilitar a execução de testes controlados e com maior repetibilidade para análise da dinâmica de bicicletas. Podendo ser auxiliar, futuramente, nos temas de projetos das turmas de Introdução a Engenharia, por exemplo.

O modelo do protótipo em escala real é muito semelhante ao de escala reduzida. Porém, como será adaptado a partir de uma esteira ergométrica, deverão ser feitas algumas modificações, ainda mais por se tratar de materiais diferentes. O aparato não foi reproduzido em Solid Works, foi feito apenas um desenho esquemático à mão, como mostrado na Figura 5.1.

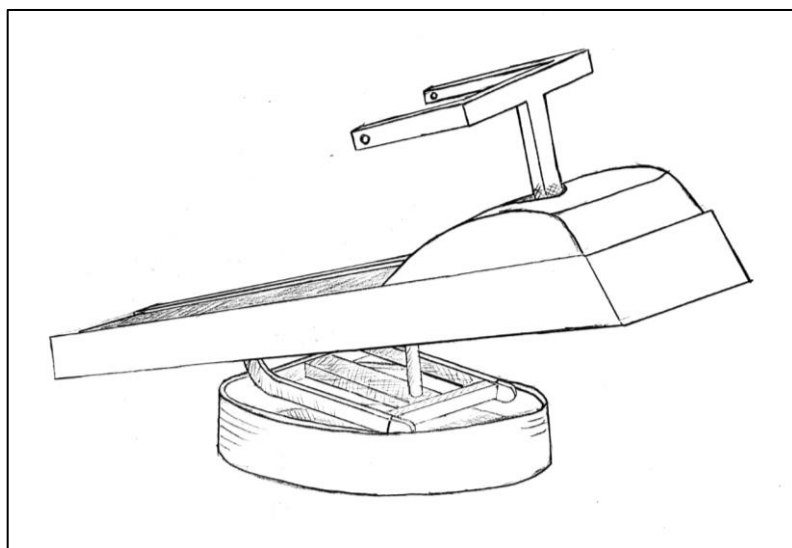


Figura 5.1 – Desenho esquemático do aparato em escala real

A reprodução da bicicleta em escala real em Solid Works (Figura 5.3) é uma etapa fundamental para a especificação desse aparato. A partir de seu desenho, é possível obter seu centro de massa e seus momentos de inércia de rolagem e guinada, utilizando ferramentas do Solid Works. Neste caso, há como referência os resultados dos testes estáticos realizados para comparação destes valores. A

bicicleta utilizada como referência se trata de uma Verden Bikes Challenge Preto aro 26, 21 marchas, e se encontra no laboratório LIENG, na PUC-Rio (Figura 5.2).



Figura 5.2 – Bicicleta de referência



Figura 5.3 – Bicicleta modelada em Solid Works

Contudo, o detalhamento da bicicleta no software em questão deve ser minucioso para gerar resultados satisfatórios. Em projetos anteriores, esse recurso foi testado desenvolvendo a bicicleta com precisão. Ela foi desmontada, medida e seus componentes foram pesados, de modo a definir corretamente suas massas específicas, já que é muito difícil saber com exatidão o material utilizado. Com todos esses procedimentos, foi possível garantir resultados muito aproximados com os reais. Porém, decidiu-se que tal detalhamento não seria empregado e o desenho em Solid Works não visou atingir a precisão necessária para determinação dos

parâmetros inerciais. Os valores de centro de massa e momentos de inércia (Figura 5.4) foram ajustados através de uma ferramenta de propriedades de massa do Solid Works a partir dos valores encontrados nos testes estáticos.

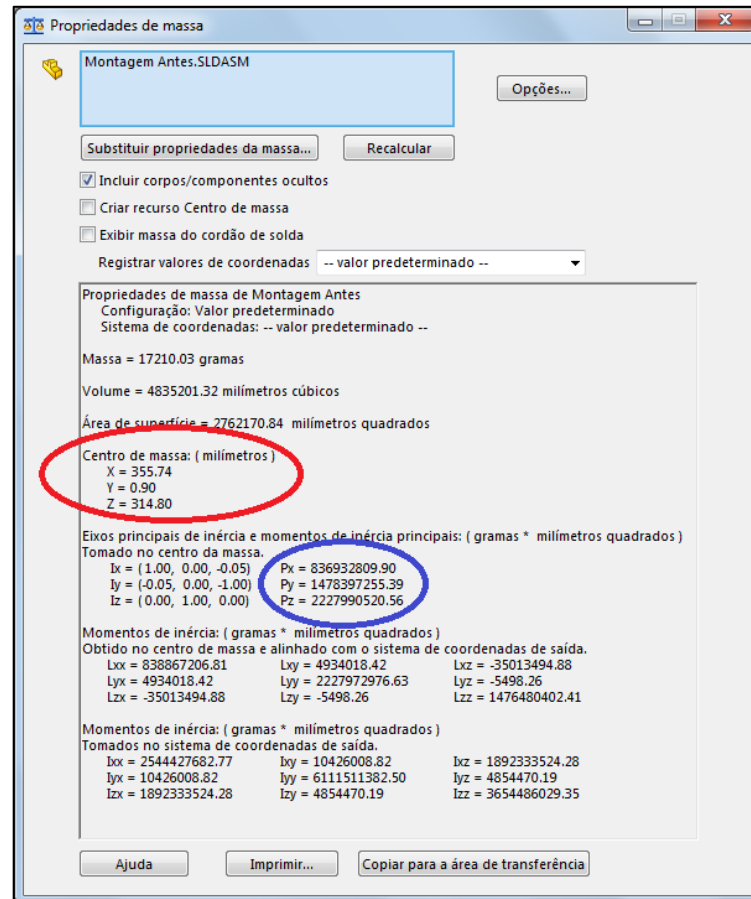


Figura 5.4 – Propriedades da bicicleta em escala real

Como é possível observar, resultados são discrepantes dos obtidos nos testes estáticos (Tabelas 2.5 e 2.10). Por isso, foi preciso utilizar recursos de ajuste do Solid para forçar esses valores, de modo a coincidirem com os testes estáticos. Para isso, primeiramente modificou-se o eixo de referência, posicionando a origem no centro da roda traseira. Com o auxílio de uma ferramenta do software, alterou-se os valores, como mostrado na Figura 5.5.

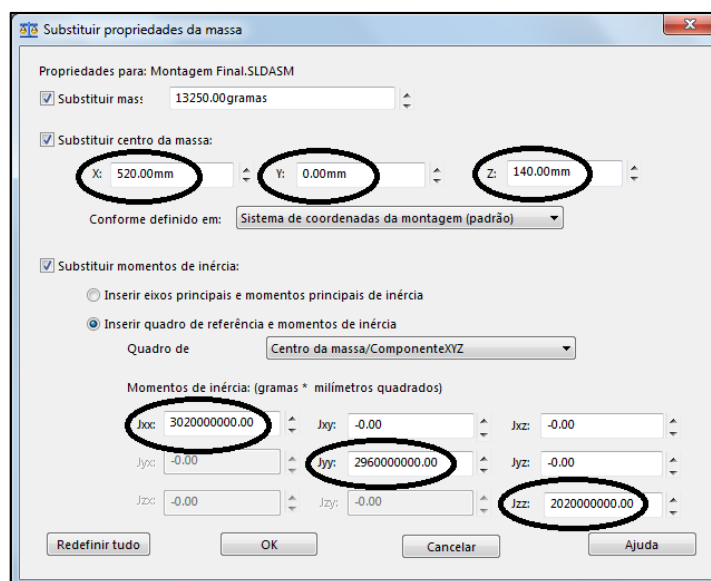


Figura 5.5 – Ajuste de propriedades

Com estes valores é possível realizar a caracterização dos componentes necessários. Primeiramente, foi escolhido um modelo de esteira ergométrica para se ter como base, escolhendo dentre as disponíveis no mercado a que mais se adequa ao projeto. Para isso, tiveram dois fatores decisivos: a área de corrida e a velocidade máxima alcançada pelo equipamento. A distância entre eixos e o raio da roda são aproximadamente 1 m e 30 cm, respectivamente. O tamanho padrão de lonas das esteiras mais comuns é de até 130 cm, o que seria muito justo para suportar a bicicleta, visto que se deve evitar o contato da roda com a caixa frontal da esteira. Além disso, a maioria das esteiras comuns tem sua velocidade máxima em torno de 12 km/h, ou seja, 3,3 m/s. Essa velocidade não é nem metade da velocidade máxima encontrada para a bicicleta nos testes dinâmicos, de acordo com a Tabela 3.1. Por isso, optou-se por esteiras um pouco mais elaboradas, que possuem velocidade máxima mais elevada e área de corrida maior.

Foi feito um levantamento de esteiras que se enquadram nos pré-requisitos e os modelos selecionados se encontram na Tabela 5.1. Vale ressaltar que a pesquisa foi feita em cima de esteiras com inclinação, visando o futuro projeto de incluir o movimento de arfagem no aparato.

Modelo	Marca	Área de corrida (cm)	Velocidade máxima (km/h)	Preço	Data	Fonte
RT250 GII	Movement	148x50	18	R\$18.390,00	20/06/18	www.shopfisio.com.br
KX9000	Kikos	160x56	24	R\$18.900,00	20/06/18	www.kikos.com.br
LT500	LifeTime	148x53	22	R\$8.990,00	22/06/18	www.lifetimefitness.com.br

Tabela 5.1 – Levantamento de esteiras ergométricas

Como a sofisticação aumentou, também aumentaram os preços. Dentre as opções acima, o modelo que mais se adequa é o KX900, da Kikos, já que possui um diferencial por alcançar uma velocidade máxima mais próxima a da bicicleta. Lembrando que essa esteira serve apenas como base para a caracterização desse projeto e que alguns de seus componentes podem ser vendidos separadamente.

O modelo escolhido também se mostra suficiente para permitir o movimento de esterçamento máximo do guidão (Tabela 2.2), visto que a roda tem aproximadamente 30 cm de raio.

Outro fator importante para se definir é o torque mínimo necessário para o motor que realiza o movimento de guinada do aparato. A expressão para torque [2] é encontrada abaixo.

$$T = I\alpha \quad (13)$$

onde, I é o momento de inércia e α a aceleração angular. Neste caso, ambos referentes ao movimento de guinada. O momento de inércia pôde ser encontrado com a soma do momento de inércia de guinada da bicicleta com o do aparato (Tabela 5.2), aproximado a partir de um paralelepípedo com as dimensões da esteira escolhida (230 x 87 x 20). O cálculo da aceleração angular foi realizado a partir de uma tangente do gráfico de velocidade angular (Figura 3.7). Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 5.3.

Momento de Inércia de guinada do aparato	Momento de Inércia de guinada da bicicleta	Momento de Inércia total
6,68 kg.m ²	2,02 kg.m ²	8,70 kg.m ²

Tabela 5.2 – Momento de inércia de guinada

Momento de Inércia (I_z)	Aceleração angular (α_z)	Torque de guinada (T_z)
8,70 kg.m ²	0,1 rad/s ²	0,87 N.m

Tabela 5.3 – Torque de guinada

Além disso, deve-se pensar em uma maneira para sustentar o suporte responsável pelo movimento de rolagem permitindo um ângulo máximo de 30°. A maneira encontrada para isso foi a utilização de molas de torção e, para isso deve-se calcular seu coeficiente (k). Utilizou-se a Equação (13) para o movimento de rolagem juntamente com a expressão abaixo [2], onde K é o coeficiente da mola e θ , o ângulo de rolagem.

$$T = K\theta \quad (14)$$

Para encontrar o valor da aceleração angular, utilizou-se a expressão abaixo (15) onde m é a massa, h a altura do centro de massa, φ o ângulo de rolagem e $\ddot{\varphi}$ a aceleração angular. Considerou-se φ igual a 30°, estipulado como ângulo máximo de rolagem da bicicleta.

$$(I_x + mh^2)\ddot{\varphi} - mgh\varphi = 0 \quad (15)$$

Igualando as duas expressões é possível encontrar o valor do coeficiente desejado. O coeficiente de mola necessário para a mola de sustentação do movimento de rolagem da bicicleta se encontra na Tabela 5.4.

Momento de inércia (I_x)	Aceleração angular (α_x)	Ângulo (rad)	Coeficiente de mola (K)
3,02 kg.m ²	0,3 rad/s ²	$\frac{\pi}{6}$	1,73 N.m/rad

Tabela 5.4 – Coeficiente de mola

6 CONCLUSÃO

Neste projeto foi desenvolvido um aparato passivo com três graus de liberdade (deslocamento longitudinal, ângulos de rolagem e guinada) para simulação dos movimentos de uma bicicleta. Sua concepção é de grande ajuda para os estudos de dinâmica de bicicletas, pois possibilita testes mais controlados e com maior repetibilidade, alcançando resultados mais consistentes.

Os parâmetros necessários para a especificação de seus componentes foram calculados com base nos testes dinâmicos e estáticos realizados, visando sua futura construção. Como pretende-se adaptá-lo a partir de uma esteira ergométrica, o tamanho da esteira e sua velocidade máxima foram fatores importantes para determinar o modelo escolhido.

Além disso, foi construído um protótipo em escala, que possui um modelo muito semelhante ao aparato em escala real, permitindo assim, sua visualização e a previsão de possíveis erros de projeto. O protótipo em escala e sua bicicleta tiveram seus modelos 3D desenhados em Solid Works, possibilitando o corte a laser das peças do aparato para obter maior precisão em sua montagem.

A bicicleta em escala real também contou com um detalhamento 3D, visando obter suas propriedades inerciais, através do software, para auxiliar na concepção do aparato. Contudo, para obter resultados satisfatórios o desenho deveria ser feito com alto grau de detalhamento. Assim, decidiu-se que tal detalhamento não seria empregado e o desenho em Solid Works não visou atingir a precisão necessária para determinação dos parâmetros inerciais.

Os próximos trabalhos envolvem a construção do simulador em escala real e a especificação de seus componentes, para que se atinja a maior similaridade possível com os movimentos de uma bicicleta se deslocando livremente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALBUQUERQUE, A. N., **Momento de Inércia e Efeito Giroscópico**, Introdução à Engenharia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2017.
2. SHIGLEY, J. E., **Elementos de Máquinas**, Vol. 2, 3ed., LTC, Rio de Janeiro, 1984.
3. ÅSTRÖM, K. J., KLEIN, R. E., LENNARTSSON, A., **Bicycle dynamics and control: adapted bicycles for education and research**, Control Systems, IEEE, v. 25, n. 4, p. 26-47, 2005.
4. FAJANS, J., **Steering in bicycles and motorcycles**, American Journal of Physics, v. 68, n. 7, p. 654-659, 2000.
5. KOOIJMAN, J. D. G., **Bicycle Rider Control: Observations, Modeling & Experiments**, Tese de Doutorado. TU Delft, Delft University of Technology, 2012.
6. LIMBEER, D. J. N., SHARP, R. S., **Bicycles, motorcycles, and models**, Control Systems Magazine, IEEE, v. 26, n. 5, p. 34-61, 2006.
7. MEIJAARD, J. P. et al., **Linearized dynamics equations for the balance and steer of a bicycle: a benchmark and review**, Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science, v. 463, n. 2084, p. 1955-1982, 2007.
8. SHARP, R. S. **The stability and control of motorcycles**, *Journal of mechanical engineering science* 13.5, p. 316-329, 1971.
9. SCHMITT, T., **Modeling of a motorcycle in Dymola/Modelica**, Tese de Doutorado, Vorarlberg University of Applied Sciences, Dornborn, 2009.
10. JAZAR, R. N., **Vehicle Dynamics Theory and Application**, 2ed, Springer, 2014.