

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UM MODELO DE BICICLETA
por

Eduardo Felipe Grolli Gräbin

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, abril de 2022.

CIP - Catalogação na Publicação

Gräbin, Eduardo Felipe Grolli
ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UM MODELO DE
BICICLETA. / Eduardo Felipe Grolli Gräbin. -- 2022.
13 f.
Orientador: Herbert Martins Gomes.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto Alegre, BR-
RS, 2021.

1. Vibração mecânica. 2. Dinâmica de bicicletas. 4. Método
de Newmark. 5.VCI. 6. VMB. I. Gomes, Herbert Martins, orient.
II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Eduardo Felipe Grolli Gräbin

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UM MODELO DE BICICLETA

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Cirilo Sperb Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Dr. Herbert Martins Gomes

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Herbert Martins Gomes

Profa. Dra. Letícia Fleck Fadel Miguel

Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas

Porto Alegre, abril de 2022.

“Quando não há, entre os homens, liberdade de pensamento, não há liberdade alguma.”

Voltaire

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por sempre priorizarem a minha educação, possibilitando meu desenvolvimento e acesso à universidade pública de qualidade. Sem esse investimento e confiança, não seria possível chegar até aqui.

Agradeço ao amor da minha vida por compartilhar comigo o dia a dia, os momentos de dificuldade e os momentos de conquista, me incentivando diariamente na busca por novas conquistas.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2021

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE UM MODELO DE
BICICLETA

Eduardo Felipe Grolli Gräbin
grabinedu@gmail.com

Resumo. Bicicletas são um meio de transporte bastante difundido e cada vez mais utilizado para a mobilidade urbana, lazer e competições. Além dos benefícios para a saúde, possuem um impacto mínimo no ambiente quanto a emissões. Os modelos de bicicletas têm se modificado ao longo do tempo em função do surgimento de novos materiais, produção em massa e demandas de conforto dos usuários. O estudo do comportamento dinâmico de bicicletas tem relevância para o projeto de novos modelos que sejam mais leves, ergonomicamente mais apropriados ou mesmo mais confortáveis e eficientes em transformar o esforço humano em movimento. Neste trabalho é desenvolvido um modelo dinâmico de bicicleta que inclui a presença de um modelo biodinâmico humano a fim de quantificar e comparar o conforto para diversas situações de irregularidades do solo, além de propriedades de rigidez e amortecimento de suspensões. Gráficos e tabelas comparativas entre as diferentes situações sob o ponto de vista do usuário são indicados, traçando-se comentários sobre seus efeitos no conforto geral.

Palavras-chave: vibração mecânica, dinâmica de bicicletas, método de Newmark, VCI, VMB.

Study of the dynamic behavior of a bicycle

Abstract. Bicycles are a widespread means of transport and increasingly used for urban mobility, leisure and competitions. In addition to the health benefits, it has a minimal impact on the environment in terms of emissions. Bicycle models have changed over time due to the emergence of new materials, mass production and user comfort. The study of the dynamic behavior of bicycles is relevant for the design of new models that are lighter, more ergonomically appropriate or even more comfortable and efficient in transforming human effort into movement. In this work, a dynamic bicycle model is developed that includes the presence of a human biodynamic model to quantify and compare the comfort for different situations of ground irregularities in addition to stiffness and damping properties of suspensions. Comparative graphs and tables between the different situations from the user's point of view are indicated, with comments on their effects on general comfort.

Keywords: mechanical vibration, bicycle dynamics, Newmark method, VCI, VMB.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objetivos	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	4
3.1 A bicicleta	4
3.2 Equações para a dinâmica vertical de uma bicicleta.....	4
3.3 Equações para um modelo biodinâmico do corpo humano	5
3.4 Equações para a dinâmica lateral de uma bicicleta.....	6
3.5 Modelo de interação piso-pneu para bicicletas	7
3.6 Algoritmo de Integração no tempo de Newmark.....	7
4. METODOLOGIA	8
4.1 Troca simples de faixa e esterçamento do tipo triangular.....	8
4.2 Modelo de irregularidades de pista segundo ISO 8608/2016	8
4.3 Modelo de avaliação da vibração no corpo humano segundo norma ISO 2631-1 (1997).....	9
4.4 Variáveis geométricas, físicas e inerciais utilizadas nos experimentos	10
5. RESULTADOS.....	10
5.1 Efeito da presença do modelo biodinâmico	10
5.2 Efeito das irregularidades da pista nas forças verticais e nas vibrações no piloto.....	11
5.3 Efeito da inclusão de suspensões nas vibrações sentidas pelo usuário	12
5.4 Efeito da inclusão de suspensões na dinâmica lateral.....	13
5.5 Avaliação do conforto segundo ISO 2631-1 (1997)	14
5.6 Avaliação do risco à saúde segundo ISO 2631-1 (1997).....	14
6. CONCLUSÕES	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	16
ANEXOS	18

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – (a) Modelo físico proposto por He et al. (2005) e (b) Modelo físico proposto por Waechter et al. (2002).	3
Figura 2 – Modelo físico esquemático proposto por Zou et al. (2009).	3
Figura 3 – (a) descrição dos componentes de uma bicicleta com amortecedor (Adaptado de Canyon bikes, 2022) e (b) imagem da bicicleta Caloi Strada, desenvolvida para uso em asfalto (CALOI, 2022).	4
Figura 4 – Modelo esquemático do corpo humano sentado com 12-GDL (ZAINAL et al., 2018, adaptado).	6
Figura 5 – Manobra de troca simples de faixa (COSSALTER E SADAUCKAS, 2006 apud TOMASI, 2019).	8
Figura 6 – Guia de zonas de orientação à saúde segundo a Norma ISO 2631-1 (1997).	9
Figura 7 – Sinais da aceleração no assento no tempo para, (a) garfo rígido com biodinâmico ativo, (b) suspensões com biodinâmico ativo, (c) garfo rígido com biodinâmico inativo (piloto como um corpo rígido) e (d) suspensões com biodinâmico inativo (piloto como um corpo rígido).	11
Figura 8 – Trajetória percorrida pela bicicleta com a pista perfil D utilizando (a) garfo rígido e (b) suspensões	13
Figura 9 – Resultados extremos obtidos dentro das zonas de orientação à saúde segundo a Norma ISO 2631-1 (1997).	14
Figura A.1 – Ângulo de esterçamento do pneu dianteiro no tempo.	18
Figura A.2 – Sinal no tempo das forças verticais no pneus dianteiro e traseiro, (a) com garfo rígido pista perfil B, (b) com suspensões pista perfil B, (c) com garfo rígido pista perfil C, (d) com suspensões pista perfil C, (e) com garfo rígido pista perfil D e (f) com suspensões pista perfil D. ..	18
Figura A.3 – Irregularidades da pista para ambos os pneus no tempo, perfis (a) perfil B, (b) perfil C e (c) perfil D.	19
Figura A.4 – Sinal no tempo das acelerações no assento, (a) com garfo rígido pista perfil B, (b) com garfo rígido pista perfil D, (c) com suspensões pista perfil B e (d) com suspensões pista perfil D. .	19
Figura A.5 – Sinal no tempo das acelerações, pista perfil D, em, (a) x com garfo rígido, (b) x com suspensões, (c) y com garfo rígido e (d) y com suspensões.	19

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes da fórmula Mágica obtidos experimentalmente para um pneu de bicicleta por Doria et al. (2012).....	7
Tabela 2 – Índice de conforto para vibrações segundo classificação da Norma ISO 2631-1 (1997)..	9
Tabela 3 – Valores RMS dos resultados obtidos nas simulações considerando a pista Perfil B.	10
Tabela 4 – Valores RMS para forças, torques e acelerações em diversos pontos com Garfo rígido e Suspensões.	12
Tabela 5 – Valores RMS das acelerações vinculadas à dinâmica vertical nas simulações utilizando as pistas com perfis B, C e D.	12
Tabela 6 – Redução em percentual das acelerações verticais considerando a utilização de suspensões e do garfo rígido nas pistas com perfis B, C e D.....	12
Tabela 7 – Valores RMS das forças e acelerações vinculadas a dinâmica lateral nas simulações utilizando as pistas com perfis B, C e D.	13
Tabela 8 – Redução em percentual das forças e acelerações laterais considerando a utilização de suspensões e do garfo rígido nas pistas com perfis B, C e D.....	13
Tabela 9 – Classificação dos resultados conforme o conforto segundo ISO 2631-1 (1997).....	14
Tabela A.1 – Valores de massas da literatura e adotados neste trabalho.....	20
Tabela A.2 – Valores de dimensões geométricas da literatura e adotados neste trabalho.....	20
Tabela A.3 – Valores de rigidez da literatura e adotados neste trabalho.	20
Tabela A.4 – Valores de amortecimento da literatura e adotados neste trabalho.	20
Tabela A.5 – Valores RMS dos resultados obtidos nas simulações considerando a pista Perfil C. ..	20
Tabela A.6 – Valores RMS dos resultados obtidos nas simulações considerando a pista Perfil D. ..	20

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos tendências vinculadas ao conceito de sustentabilidade vêm ganhando espaço na mídia e se fazendo cada vez mais presente na vida cotidiana da população. Esse conceito está tão inserido no contexto atual da sociedade, que uma pesquisa da Federação Brasileira de Bancos (FEBRABAN) em parceria com o IPESP mostrou que 77% dos brasileiros afirmam que a adoção de boas práticas de sustentabilidade são prioridade em relação ao crescimento econômico (CAMPOS, 2021). Segundo essa pesquisa, 98% consideram muito importante ou importante que boas práticas de sustentabilidade sejam adotadas por cidadãos e famílias. Dentro desse cenário, o setor de transportes e mobilidade urbana possui alta visibilidade, especialmente por consumir 27% da energia do mundo e 60% de todo o petróleo extraído (CERATTI, 2017). Em função disso, meios de transporte alternativos ganham espaço na realidade cotidiana, em especial a bicicleta, que concilia benefícios em múltiplas áreas como saúde, economia e meio ambiente (ALESSI, 2018).

Desde uma ótima opção de mobilidade urbana até um equipamento de competição, a bicicleta possui inúmeras funcionalidades dentro da sociedade, de forma que sua presença é amplamente difundida e crescente. Em um cenário de pandemia, onde a preocupação com a saúde se intensifica e o receio com os meios de transportes coletivos aumenta, a demanda pela utilização de bicicletas aumentou de forma significativa, refletindo em um aumento de 50% nas vendas de bicicletas no território brasileiro em 2020 quando comparado ao ano de 2019, como indica a Associação Brasileira do Setor de Bicicletas na matéria elaborada por Granjeira (2021) que ouviu centenas de lojistas, fabricantes e montadores ao longo de 2020 até janeiro de 2021.

A partir do primeiro modelo desenvolvido pelo barão alemão Karl von Drais em 1817 (HANCOCK, 2017), os modelos de bicicleta vêm avançando e se modificando ao longo do tempo, seja em função da descoberta de novos materiais, do estudo do conforto ou de ferramentas avançadas de modelagem e projeto. Dentro desse cenário de evolução dos projetos, o estudo do comportamento dinâmico das bicicletas possui alta relevância, visto a necessidade de entendimento dos parâmetros que influenciam no conforto, na saúde do usuário e na eficiência em transformar o esforço humano em movimento.

As vibrações às quais os usuários de bicicletas estão submetidos são provenientes e consequência da interação de múltiplos fatores, como as irregularidades do solo, o material da bicicleta, o projeto do quadro, a configuração de raios da roda, a calibragem dos pneus, a utilização de suspensões, além, é claro, da interação do próprio usuário com a bicicleta e diversos outros fatores. Dentro desse cenário, as simulações numéricas ganham importância no projeto de bicicletas como uma forma de obter estimativas do comportamento dinâmico sob diversas condições de forma rápida, segura e personalizável para cada usuário, através da variação de uma grande gama de parâmetros distintos.

1.1 Motivação

Em uma realidade onde a finalidade de uso das bicicletas é tão diversa – o que se reflete em múltiplas irregularidades possíveis de solo, de quadros e de materiais utilizados na construção – é necessário que os projetos de novas bicicletas possuam alta flexibilidade e adaptabilidade durante seu desenvolvimento. Dentro desse cenário, a modelagem e a utilização de simulações se tornam fundamentais nos projetos, possibilitando a obtenção do comportamento dinâmico sob diversas condições de forma rápida e personalizável.

Dada a importância das simulações numéricas dentro dos projetos de bicicletas, esse tema vem sendo amplamente estudado nos últimos anos, ganhando espaço em diversos trabalhos acadêmicos. Sendo assim, esse artigo busca contribuir através da identificação de pontos relevantes a serem considerados durante a modelagem matemática do comportamento dinâmico de uma bicicleta, bem como apresentar o impacto no conforto do piloto em alguns cenários distintos.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo realizar a modelagem da dinâmica de uma bicicleta de forma a entender e avaliar o conforto ao qual o piloto está submetido, bem como a propensão de riscos à saúde em diversos cenários, identificando detalhes relevantes na modelagem e como a variação dos parâmetros, especialmente irregularidades do solo e a presença de suspensões, além de parâmetros de massa do usuário, impactam no resultado obtido.

O modelo utilizado será composto pela bicicleta em conjunto com o modelo biodinâmico de piloto. Esse modelo biodinâmico será composto de massas suspensas e conectadas por molas e amortecedores, de forma a representar simplificada a estrutura dinâmica do corpo humano, sendo possível estudar o impacto nesse corpo quando exposto a uma vibração proveniente da bicicleta em múltiplos cenários. Para solução da modelagem matemática, utilizar-se-á o método de Newmark, desenvolvido para resolver equações diferenciais de movimento (NEWMARK, 1959).

De forma complementar, avaliar-se-á o impacto da utilização do modelo biodinâmico nos resultados da modelagem dinâmica, identificando o grau de relevância e influência que ele possui nos resultados obtidos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Como destacado por Waechter et al. (2002), a literatura aponta a vibração nos veículos como prejudicial não somente ao conforto do piloto, mas também a capacidade de percepção e reação do piloto ao tráfego da rodovia. Em veículos como motos e bicicletas, as vibrações provêm majoritariamente das irregularidades do piso, sejam elas excitações temporárias ou permanentes. (ONAYA, 2012).

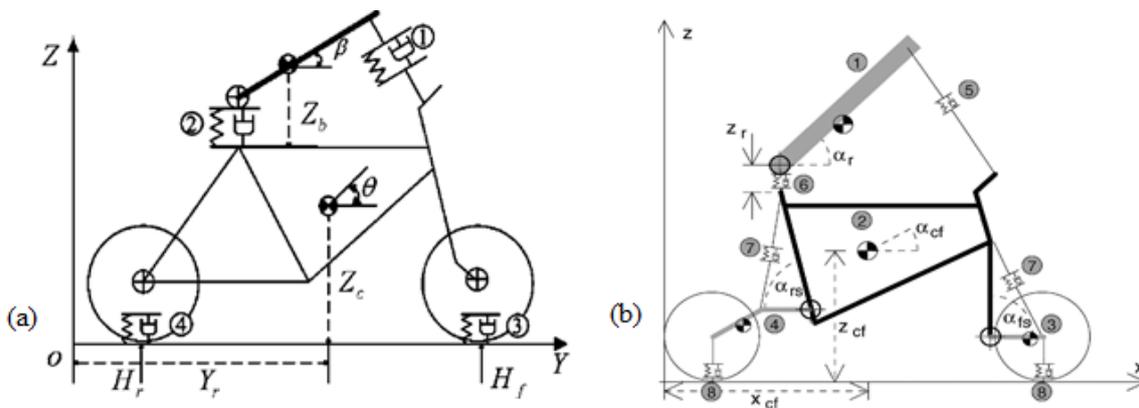
Para que a estimativa de conforto em diversos cenários seja feita, é necessária a modelagem dinâmica da bicicleta seguindo variados parâmetros. Dentro do universo da modelagem da resposta dinâmica, dois artigos da revista “*Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*” se destacam e contribuem de forma significativa no estabelecimento das hipóteses e na caracterização do sistema físico que representa a dinâmica uma bicicleta. He et al. (2005), na Escola de Engenharia Mecânica e Energia de Shanghai, trazem a proposta da modelagem de uma bicicleta sem sistema de suspensão nas rodas, conhecida comercialmente como bicicleta rígida, compondo um modelo com três graus de liberdade, conforme exibido na Figura 1(a). Esse modelo proposto segue algumas hipóteses específicas, como descrito abaixo:

1. É considerada a posição do piloto como sentado no selim;
2. Os pneus são modelados como molas lineares associadas em paralelo com amortecedores viscosos lineares. Os pneus estão inflados o suficiente para que não exista contato entre a roda e o chão, de forma que a rigidez e o amortecimento nesse ponto serão referentes a estrutura do pneu inflado;
3. A vibração existente na bicicleta vem exclusivamente das irregularidades existentes superfície, sendo desconsideradas as vibrações oriundas de outras fontes como o ato de pedalar do ciclista;
4. As rodas não perdem contato com o chão.

O outro modelo, apresentado por Waechter et al. (2002), teve como objetivo descrever bicicletas com duas suspensões, uma na roda frontal e outra na roda traseira, sendo esse modelo composto por cinco graus de liberdade, conforme representado na Figura 1(b). Esse modelo é composto por quatro corpos rígidos, conectados através de articulações rotativas e lineares, molas e amortecedores. Cada corpo rígido representa partes do sistema bicicleta-piloto e os pneus, as suspensões e o selim são representados por molas e amortecedores. A massa das pernas e pés, bem como os pedais, são considerados como parte do tronco do piloto em função da massa desses elementos não representar mais de 12% da massa total do sistema (PHESANT 1986 apud WAECHTER et al, 2002). Por fim, esse modelo segue as seguintes premissas e hipóteses simplificadoras:

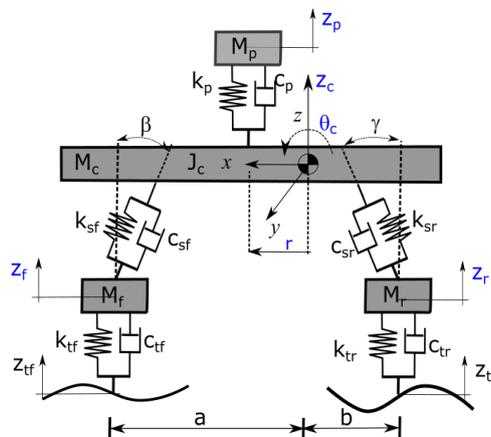
1. As forças de arrasto e sustentação devido a fluxos de ar laterais e frontais são desconsideradas nessa análise;
2. As molas e amortecedores não rotacionam;
3. Efeitos de amortecimento e dissipação adicionais de outros componentes que não sejam rodas e amortecedores são desprezíveis;
4. A vibração existente na bicicleta vem exclusivamente das irregularidades existentes na superfície, sendo desconsideradas as vibrações oriundas de outras fontes como o ato de pedalar do ciclista.

Figura 1 – (a) Modelo físico proposto por He et al. (2005) e (b) Modelo físico proposto por Waechter et al. (2002).



O estudo da modelagem dinâmica e do efeito das vibrações em veículos de duas rodas também tem sido motivo de trabalhos acadêmicos na UFRGS (TOMASI, 2019, ROCHA, 2019 e SCHIO, 2016). No estudo de Tomasi (2019) é explorada a modelagem de uma motocicleta, tendo como referência o modelo de dinâmica vertical proposto por Zou et al. (2009), que traz uma visão muito similar ao modelo de bicicleta proposto por Waechter et al. (2002), com 5-GDL. Tal modelo esquemático é representado na Figura 2.

Figura 2 – Modelo físico esquemático proposto por Zou et al. (2009).



Como forma de mensurar o conforto e a vibração do piloto, Champoux et al. (2007) sugere considerar as acelerações e forças transmitidas nos pontos de contato do usuário com a bicicleta. Em bicicletas com suspensão dianteira, especialmente o ponto de contato no selim onde a maior parte da massa do piloto está concentrada, visto a suavização gerada pela suspensão dianteira aos braços do piloto. Tal proposição vai em linha com o modelo de 5-GDL indicado por Zou et al. (2009).

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

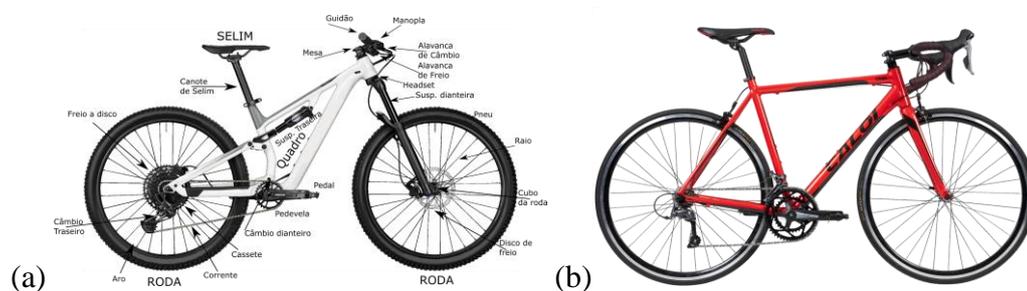
3.1 A bicicleta

Uma bicicleta é composta de múltiplos componentes com funções distintas e complementares que, quando unidos, permitem a bicicleta atingir o propósito esperado. Esses componentes, que podem ser observados na Figura 3(a), são agrupados em conjuntos através das conexões existentes.

O primeiro conjunto descrito é composto pelas rodas, aros e pneus, que possuem características específicas, em função da categoria, modelo e objetivo de uso da bicicleta. Modelos voltados para uso competitivo em velocidade possuem rodas mais rígidas, visando menor dispersão de energia, e pneus mais finos. Já bicicletas voltadas para uso em trilha possuem rodas menos rígidas, visando maior absorção de impactos e conforto, e pneus mais largos com cravos para melhor aderência a pista.

O segundo conjunto de componentes é composto pelo garfo e pelas suspensões, peças que possuem como principal objetivo absorver os impactos e as irregularidades da pista, de forma a reduzir o nível de vibração que atinge o piloto, melhorando a estabilidade e o conforto (FIGUEIREDO, 2020). Além disso, as suspensões maximizam o tempo de contato dos pneus com o chão, mantendo a tração. Esse grupo de componentes é um dos pontos de aprofundamento desse trabalho. Nesse estudo foram simuladas duas bicicletas distintas, uma considerando a presença de suspensões dianteiras e traseiras e outra com as suspensões rígidas, como é o caso da bicicleta Caloi Strada desenvolvida para uso em asfalto, mostrada na Figura 3(b). Com essa análise pretende-se entender a influência das suspensões no comportamento dinâmico da bicicleta e no conforto do piloto.

Figura 3 – (a) descrição dos componentes de uma bicicleta com amortecedor (Adaptado de Canyon bikes, 2022) e (b) imagem da bicicleta Caloi Strada, desenvolvida para uso em asfalto (CALOI, 2022).



O terceiro conjunto é composto pelo quadro, cambio dianteiro, pedivela, pedais e alguns outros pequenos componentes. Bem como os componentes dos grupos anteriores, o quadro da bicicleta é projetado de forma a destacar uma característica específica em função do objetivo de uso da bicicleta. Existem incontáveis geometrias de quadro, que são fabricados majoritariamente de alumínio, aço cromo-molibdênio e fibra de carbono. O quadro também serve como estrutura para fixação dos demais componentes, como suspensão, selim, guidão, freios, pedivelas, e etc.

Por fim, o quarto conjunto é composto pelo selim e pelo canote do selim, sendo esses componentes a última etapa de amortecimento de vibrações. O selim consiste no assento onde o piloto fica sentado, de forma que ele precisa ajudar no amortecimento das vibrações, provendo conforto e segurança ao condutor da bicicleta.

3.2 Equações para a dinâmica vertical de uma bicicleta

Para a análise da dinâmica vertical da bicicleta será utilizado o modelo com 5-GDL proposto por Zou et al. (2009) e esquematicamente apresentado anteriormente na Figura 2. Os graus de liberdade propostos pelo modelo são, em: z_c (deslocamento vertical do quadro), z_f (deslocamento vertical da

suspensão dianteira), z_r (deslocamento vertical da suspensão traseira), z_p (deslocamento vertical do assento) e θ_c (deslocamento angular de arfagem, em radianos). Esse modelo é composto por 4 massas M_f, M_r, M_c, M_p , sendo elas respectivamente, massa da suspensão dianteira, massa da suspensão traseira, massa do quadro da bicicleta, massa do piloto, além da inércia à arfagem J_c . É também formado por 5 rigidezes ($K_{tf}, K_{tr}, K_{sf}, K_{sr}$ e K_p) e 5 amortecimentos ($C_{tf}, C_{tr}, C_{sf}, C_{sr}$ e C_p) que correspondem, respectivamente, aos pneus traseiro e dianteiro, as suspensões traseira e dianteira e a ao selim. Esquemáticamente, r é a distância do piloto para o centro de gravidade do sistema (CG) e a e b são as distâncias dos eixos dianteiro e traseiro em relação a esse mesmo CG e l , o entre-eixos.

Dado o modelo esquemático e a relação proposta entre os graus de liberdade, pode-se resolver as equações diferenciais de movimento do problema partindo da Função de Lagrange, que relaciona as energias cinética (E_k) e potencial (E_p), com a dissipação de energia existente no sistema (R_D) e a força externa (Q) atuante, em coordenadas genéricas j , conforme a Equação (1).

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial q_j} - \frac{\partial E_p}{\partial q_j} + \frac{\partial R_D}{\partial \dot{q}_j} = Q_j \quad (1)$$

As equações de energia cinética, energia potencial e dissipação de energia para o modelo de 5-GDL proposto, bem como as demais hipóteses e simplificações, estão descritas no artigo original (ZOU et al., 2009). A equação diferencial de movimento no tempo que rege o sistema é mostrada na Equação (2).

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{z}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{z}} + \mathbf{K}\mathbf{z} = \mathbf{Q} \quad (2)$$

onde \mathbf{Q} é o vetor de forças externas excitadoras, $\ddot{\mathbf{z}}$, $\dot{\mathbf{z}}$ e \mathbf{z} são, respectivamente, os vetores de deslocamento, velocidade e aceleração do sistema e \mathbf{M} , \mathbf{C} e \mathbf{K} são as matrizes de massa, amortecimento e rigidez originadas das equações de energia do sistema, conforme segue na Equações (3), (4) e (5):

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_{uf} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{ur} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{sf} + c_{fr} + c_p & -c_{sf} & -c_{sr} & -c_p & bc_{sr} - ac_{sf} - lc_p \\ -c_{sf} & (c_{tf} + c_{sf}) & 0 & 0 & ac_{sf} \\ -c_{sr} & 0 & (c_{tr} + c_{sr}) & 0 & -bc_{sr} \\ -c_p & 0 & 0 & c_p & lc_p \\ bc_{sr} - ac_{sf} - lc_p & ac_{sf} & -bc_{sr} & lc_p & (a^2c_{sf} + b^2c_{sr} + l^2c_p) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{sf} + k_{fr} + k_p & -k_{sf} & -k_{sr} & -k_p & bk_{sr} - ak_{sf} - lk_p \\ -k_{sf} & (k_{tf} + k_{sf}) & 0 & 0 & ak_{sf} \\ -k_{sr} & 0 & (k_{tr} + k_{sr}) & 0 & -bk_{sr} \\ -k_p & 0 & 0 & k_p & lk_p \\ bk_{sr} - ak_{sf} - lk_p & ak_{sf} & -bk_{sr} & lk_p & (a^2k_{sf} + b^2k_{sr} + l^2k_p) \end{bmatrix} \quad (5)$$

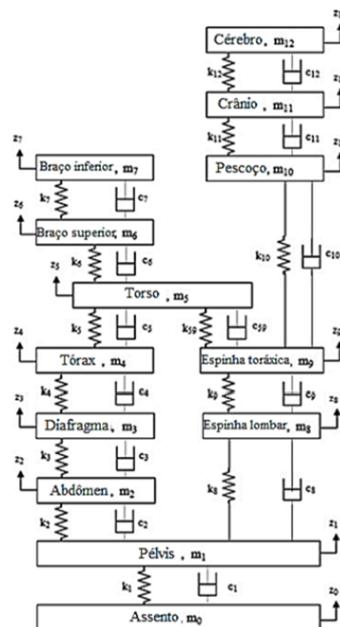
A partir de modelagem física, é possível encontrar a resposta do sistema no tempo resolvendo as equações diferenciais do problema através, por exemplo, do método de integração numérica de Newmark.

3.3 Equações para um modelo biodinâmico do corpo humano

Segundo Katu et al. (2003), pilotos de bicicletas e motocicletas estão expostos a vibrações nocivas resultantes das condições do trajeto onde passam. Tais vibrações podem aumentar a probabilidade de acidentes de trânsito (AZIZAN et al., 2016) além de causar problemas de saúde, como aumento dos batimentos cardíacos, efeitos no sistema digestivo e nos órgãos reprodutivos femininos. Desta forma, uma avaliação precisa dessas vibrações no corpo humano é fundamental durante o estudo dinâmico dos veículos.

Nesse trabalho, utiliza-se um modelo biodinâmico de 12 GDL como forma de representar acuradamente o comportamento dinâmico do corpo do piloto sentado na bicicleta (GRIFFIN, 2001). Tal modelo, representado na Figura 4, foi proposto por Zainal et al. (2018) e traz a representação do corpo humano através de massas, molas e amortecedores, sendo seu grande diferencial - com relação aos outros modelos propostos na literatura – utilizar 12 graus de liberdade, permitindo a identificação da vibração a que diversas partes importantes do corpo do piloto estão expostas, como por exemplo, o cérebro. Para relacionar o modelo biodinâmico com o modelo dinâmico da bicicleta utilizou-se o acoplamento simples. As equações com os dois modelos acoplados podem ser observadas em Tomasi (2019).

Figura 4 – Modelo esquemático do corpo humano sentado com 12-GDL (ZAINAL et al., 2018, adaptado).



Os valores de massa, rigidez e amortecimento para um ser humano médio, bem como as equações diferenciais de movimento do biodinâmico que foram utilizadas como base para elaboração deste trabalho são apresentadas no artigo original (ZAINAL et al., 2018).

3.4 Equações para a dinâmica lateral de uma bicicleta

O modelo de dinâmica lateral é responsável por descrever os efeitos do movimento do veículo no plano composto entre os eixos longitudinal (x) e lateral (y), tendo como referência as forças exercidas pelos pneus e as componentes de velocidade na carroceria do veículo (DREHMER, 2017 apud TOMASI, 2019).

O modelo utilizado nesse trabalho segue a proposição realizada no trabalho de Tomasi (2019) e considera a possibilidade de escorregamento do pneu com relação ao solo no momento do esterçamento da roda frontal da bicicleta; apresentando, assim os seguintes quatro graus de liberdade (4-GDL); x_b (deslocamento longitudinal no quadro da bicicleta, dado em metros), y_b (deslocamento lateral no quadro da bicicleta, dado em metros), ψ (deslocamento angular de guinada na roda frontal, em radianos) e φ (deslocamento angular de rolagem do quadro, em radianos).

As relações entre os componentes da dinâmica lateral veicular, bem como o desenvolvimento e as deduções necessárias para dar origem as equações são apresentadas em Drehmer (2017 apud TOMASI, 2019) no artigo original. As Equações (6), (7), (8) e (9) representam, respectivamente, o movimento longitudinal, o movimento lateral, a dinâmica de guinada e a rolagem da bicicleta.

$$m_t \ddot{x}_b = F_{x1} + F_{x2} + m_b h \Phi \ddot{\psi} + m_t y_b \dot{\psi} - m_b h \dot{\Phi} \dot{\psi} - f_r m_t g - \frac{1}{2} C_D A_f \rho x_b^2 \quad (6)$$

$$m_t \ddot{y}_b = F_{y1} + F_{y2} - m_t \dot{x}_b \dot{\psi} - m_b h \ddot{\Phi} \quad (7)$$

$$I_z \ddot{\psi} = a F_{y1} - b F_{y2} + m_b h \Phi \ddot{x}_b - m_b h \dot{x}_b \dot{\Phi} + I_{xz} \ddot{\Phi} \quad (8)$$

$$I_x \ddot{\Phi} = m_t \ddot{z}_b - m_t g h \quad (9)$$

As variáveis F_{x1} , F_{x2} , F_{y1} e F_{y2} , que representam as forças nos pneus, são calculadas através da “Fórmula Mágica” de Pacejka (2012), abordada mais detalhadamente a seguir e com parâmetros específicos para pneus de bicicleta.

3.5 Modelo de interação piso-pneu para bicicletas

Os pneus possuem grande influência no comportamento dinâmico de uma bicicleta, visto que são responsáveis pelo surgimento de forças e momentos. Além disso, conforme reforçado pela fabricante Michelin (2020), os pneus possuem influência relevante no conforto do piloto devido a sua capacidade de absorver as irregularidades do solo de modo a reduzir as vibrações no guidão e no selim.

O modelo utilizado nesse trabalho segue a linha proposta por Bakker (1987 *apud* TOMASI, 2019) e significativamente melhorada por Pacejka (2012) dando origem a chamada “Fórmula Mágica” que utiliza uma série de correlações para determinar coeficientes e calcular forças e momentos envolvidos nos pneus, baseados nos eixos locais dos pneus e na força vertical de compressão do pneu com o solo (DREHMER, 2017 *apud* TOMASI, 2019). As Equações (10), (11) e (12) exibem, respectivamente, as forças longitudinal, lateral e de torque em um determinado pneu i , já na orientação dos eixos globais.

$$F_{xi} = F_{zi} D_i \sin[C_i \tan^{-1}(B_i k_i - E_i(B_i k_i - \tan^{-1}(B_i k_i)))] \quad (10)$$

$$F_{yi} = F_{zi} D_i \sin[C_i \tan^{-1}(B_i k_i - E_i(B_i k_i - \tan^{-1}(B_i k_i)))] \quad (11)$$

$$M_{zi} = F_{zi} D_i \sin[C_i \tan^{-1}(B_i k_i - E_i(B_i k_i - \tan^{-1}(B_i k_i)))] \quad (12)$$

Para uma bicicleta temos $i = 1$ (pneu dianteiro) e $i = 2$ (pneu traseiro). Os coeficientes B_i , C_i , D_i e E_i originalmente apresentados em Pacejka (2012) são específicos para pneus de veículos automóveis. Doria et al. (2012) traz os valores desses coeficientes adaptados a pneus de bicicletas, conforme mostrado na Tabela 1. Durante a extensa revisão bibliográfica realizada, encontrou-se apenas modelos dinâmicos de bicicleta que utilizassem os modelos de interação pneu-solo desenvolvidos para automóveis. Este trabalho diferencia-se por realizar a modelagem dinâmica lateral da bicicleta utilizando dos valores da Tabela 1 medidos por Doria et al. (2012) especificamente para pneus de bicicletas.

Tabela 1 – Coeficientes da fórmula Mágica obtidos experimentalmente para um pneu de bicicleta por Doria et al. (2012).

Componente de Força/Torque	Coeficientes da Fórmula Mágica (adaptado para pneu de Bicicleta)			
	B	C	D	E
Força lateral e escorregamento F_y	11,787	1,062	0,954	-1,290
Força de Cambagem F_x	2,128	0,619	0,954	-4,038
Torque de auto-alinhamento M_z	4,194	4,824	-0,004	1,524
Torque de Arfagem M_y	2,015	0,259	0,103	0,262

3.6 Algoritmo de Integração no tempo de Newmark

O método de Newmark consiste em um algoritmo para integração numérica, sendo, como definido por Rao (2011), o mais competente dos métodos implícitos de integração numérica.

Desenvolvido por Newmark (1959), se tornou amplamente utilizado e ainda hoje assume um posto relevante em diferentes softwares de simulação dinâmica e elementos finitos. Este método assume que a aceleração varia linearmente entre dois instantes de tempo, satisfazendo as equações diferenciais no instante $t + \Delta t$, de forma a obter a resposta do sistema nesse mesmo instante. (RAO, 2011). As expressões resultantes para os vetores \mathbf{z}_{i+1} , $\dot{\mathbf{z}}_{i+1}$ e $\ddot{\mathbf{z}}_{i+1}$ para um sistema de múltiplos graus de liberdade são descritas nas Equações (12), (13) e (14) a seguir:

$$\mathbf{z}_{i+1} = \mathbf{z}_i + \dot{\mathbf{z}}_i \Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha \right) \ddot{\mathbf{z}}_i + \alpha \ddot{\mathbf{z}}_{i+1} \right] (\Delta t)^2 \quad (13)$$

$$\dot{\mathbf{z}}_{i+1} = \dot{\mathbf{z}}_i + [(1 - \beta) \ddot{\mathbf{z}}_i + \beta \ddot{\mathbf{z}}_{i+1}] \Delta t \quad (14)$$

$$\ddot{\mathbf{z}}_{i+1} = \frac{1}{\alpha (\Delta t)^2} (\mathbf{z}_{i+1} - \mathbf{z}_i) - \frac{1}{\alpha \Delta t} \dot{\mathbf{z}}_i - \left(\frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \ddot{\mathbf{z}}_i \quad (15)$$

Ainda segundo Rao (2011), os parâmetros α e β indicam as características de precisão e estabilidade do algoritmo, sendo recomendado usar, respectivamente, os valores 0,25 e 0,5 para manter o método em sua forma incondicionalmente estável (NEWMARK, 1959). Assumindo-se as condições de contorno usualmente utilizadas \mathbf{z}_{t0} e $\dot{\mathbf{z}}_{t0}$, representando, respectivamente, o deslocamento inicial e a velocidade inicial, aplica-se o método de Newmark e calcula-se a variável $\ddot{\mathbf{z}}_{t0}$ no instante inicial através da Equação (16). Neste trabalho foi adotado o passo temporal como sendo $\Delta t = 1 \times 10^{-4}$ s.

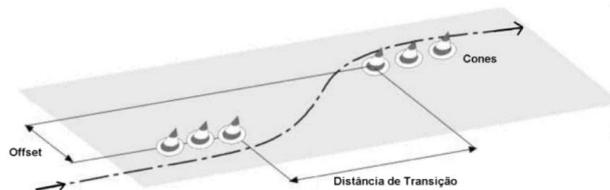
$$\ddot{\mathbf{z}}_{t0} = \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{Q}_0 - \mathbf{C}\dot{\mathbf{z}}_0 - \mathbf{K}\mathbf{z}_0) \quad (16)$$

4. METODOLOGIA

4.1 Troca simples de faixa e esterçamento do tipo triangular

De forma a avaliar a dirigibilidade e a dinâmica lateral da bicicleta, utilizou-se a manobra da troca de faixa simples, introduzida por Zeller e Weir (1978 apud TOMASI, 2019) e amplamente difundida na literatura para uso em motocicletas e bicicletas desde então. Segundo Cossalter e Sadauckas (2006 apud TOMASI, 2019), essa manobra consiste na composição de três movimentos sequenciais: durante o primeiro movimento a bicicleta anda em linha reta, em velocidade constante, por uma distância determinada; o segundo movimento é iniciado através da alteração no ângulo de esterçamento da roda dianteira da bicicleta, partindo de 0° e convergindo linearmente até um valor pré-definido, depois indo desse valor até o extremo oposto negativo e por fim retornando a 0° , de forma a construir um esterçamento triangular, onde inicia-se o terceiro movimento, novamente em linha reta. O gráfico do ângulo de esterçamento no tempo é representado na Figura A.1, junto ao Anexo. A movimento executado na manobra de troca simples de faixa é representada na Figura 5.

Figura 5 – Manobra de troca simples de faixa (COSSALTER E SADAUCKAS, 2006 apud TOMASI, 2019).



4.2 Modelo de irregularidades de pista segundo ISO 8608/2016

Conforme proposto nos modelos explorados na bibliografia, as irregularidades existentes na superfície do solo são a principal origem das vibrações no sistema bicicleta-piloto.

Desta forma, por desempenhar papel importante na modelagem dinâmica elaborada, é fundamental a utilização de uma abordagem padronizada e que reflita o mais próximo possível as condições reais na geração das irregularidades do solo.

Para a análise dinâmica proposta, utilizou-se a forma de geração de perfis apresentada por Shinozuka e Jan (1972 *apud* TOMASI, 2019), correlacionando as amplitudes das classes de rugosidades padronizadas na Norma ISO 8608 (2016) e dando origem a perfis com período entre 0 e 2π . Descrições aprofundadas sobre parâmetros e metodologia de geração de perfis são abordadas no artigo original.

A Norma ISO 8608 (2016) propõe classes que variam de A a H, conforme severidade das rugosidades da estrada, nesse trabalho utilizou-se as classes B, C e D para geração dos perfis de análise. A Figura A.3 exibe as irregularidades dos três perfis utilizados para comparação. Detalhes para a forma da geração das irregularidades podem ser vista no trabalho desenvolvido por Tomasi (2019).

4.3 Modelo de avaliação da vibração no corpo humano segundo norma ISO 2631-1 (1997)

A combinação entre as irregularidades do solo e os parâmetros físicos, geométricos e inerciais da bicicleta resultam na exposição do piloto da bicicleta às vibrações. A partir do conhecimento dos valores aos quais o piloto está exposto, é necessário avaliar se existe impacto tanto no conforto quanto na propensão a riscos de saúde nos cenários analisados.

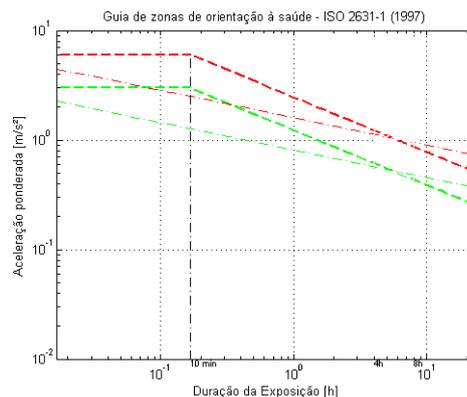
De forma a diminuir subjetividades nas avaliações sobre conforto, a norma ISO 2631-1 (1997) utiliza faixas de amplitudes de valores de aceleração para classificar o conforto do piloto, indo de “Não desconfortável” a “Extremamente desconfortável”, como indicado na Tabela 2.

Tabela 2 – Índice de conforto para vibrações segundo classificação da Norma ISO 2631-1 (1997).

Faixa de amplitudes (m/s ²)	Índice de conforto - ISO 2631-1/1997
< 0,315	Não desconfortável
$0,315 \leq e < 0,63$	Um pouco desconfortável
$0,5 \leq e < 1,0$	Levemente desconfortável
$0,8 \leq e < 1,6$	Desconfortável
$1,25 \leq e < 2,5$	Muito desconfortável
> 2,0	Extremamente desconfortável

Com relação à avaliação dos impactos na saúde do piloto, a Norma ISO 2631-1 (1997) juntamente a NR-15 (2014) anexo 8 estabelecem os limites diários de exposição no caso da vibração de corpo inteiro (VCI). Os limites de exposição para avaliação da condição de insalubridade para determinada aceleração e tempo de exposição seguem as zonas indicadas na Figura 6, sendo considerada a condição de insalubridade e propensão de risco à saúde em pontos localizados acima das linhas vermelhas.

Figura 6 – Guia de zonas de orientação à saúde segundo a Norma ISO 2631-1 (1997).



Para enquadramento e avaliação com relação aos limites determinados pela norma, nesse trabalho analisam-se as acelerações filtradas pela curva de ponderação Wh e ajustadas para equivalência de uma exposição equivalente a 8 horas.

4.4 Variáveis geométricas, físicas e inerciais utilizadas nos experimentos

Uma representação fiel dos parâmetros físicos, geométricos e inerciais de bicicletas reais é fundamental para a obtenção de resultados confiáveis e que reflitam o mais próximo possível a realidade. De forma geral, a literatura sobre testes e modelagens de bicicletas é mais restrita quando comparada aos trabalhos com motocicletas, existindo menos artigos com aprofundamentos relevantes. Tal fato refletiu-se na pesquisa e na construção dos parâmetros utilizados nesse estudo. Não se encontrou na literatura nenhum trabalho que fornecesse todas as informações necessárias de uma bicicleta específica, dessa forma os dados da bicicleta utilizada nos testes são uma construção das informações disponíveis em diversos artigos da literatura, sendo todos baseados em bicicletas reais. Na Tabela A.1 são indicados os valores de inércia, na Tabela A.2 os valores geométricos, na Tabela A.3 os valores para rigidez e na Tabela A.4 os valores para amortecimento encontrados na literatura.

5. RESULTADOS

5.1 Efeito da presença do modelo biodinâmico

O primeiro objetivo proposto no desenvolvimento deste trabalho consiste na avaliação da influência que a modelagem dinâmica do piloto – uso de um modelo biodinâmico ou simplificação como um corpo rígido de massa igual à do piloto – possui sobre os resultados da dinâmica vertical do conjunto bicicleta-piloto. De forma a determinar essa influência, nas simulações alterou-se os parâmetros de rigidez e amortecimento do biodinâmico para valores elevados (cerca de 10^5 vezes maior que o indicado como referência para um ser humano), dando origem a um corpo rígido. Em seguida, comparou-se com os resultados obtidos com a utilização do biodinâmico com os resultados obtidos através da utilização do corpo rígido. Os valores dos resultados simulados com a pista Perfil B, no cenário utilizando garfo rígido e no cenário utilizando suspensões são mostrados na Tabela 3.

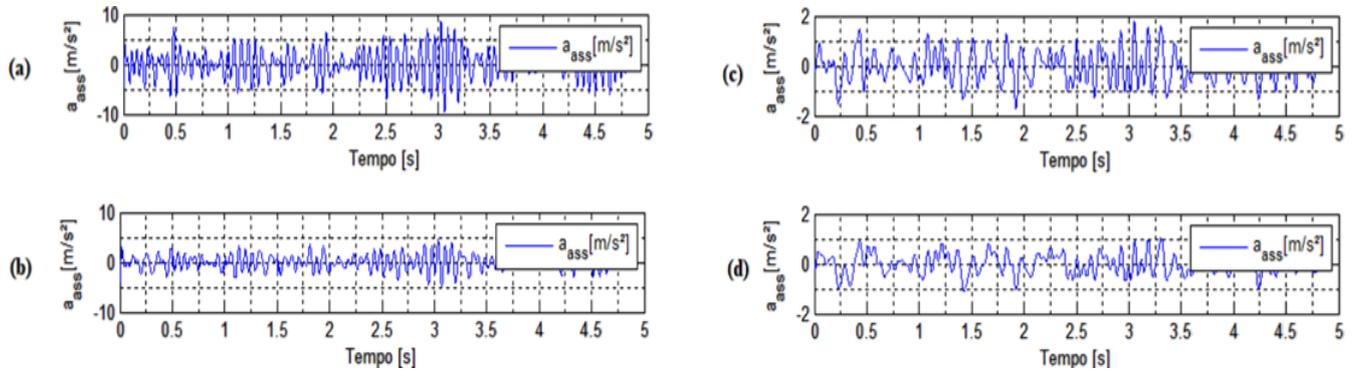
Tabela 3 – Valores RMS dos resultados obtidos nas simulações considerando a pista Perfil B.

Parâmetro	Garfo rígido - Biodinâmico	Grafo rígido – Corpo Rígido	Diferença %	Suspensões - Biodinâmico	Suspensões – Corpo Rígido	Diferença %
Aceleração no eixo x (m/s^2)	0,06	0,06	0%	0,06	0,06	0%
Aceleração no eixo y (m/s^2)	0,83	0,83	0%	0,83	0,83	0%
Aceleração chassi (m/s^2)	6,56	5,94	+9%	2,01	1,34	+34%
Aceleração assento (m/s^2)	2,81	0,63	+78%	1,52	0,41	+73%
Aceleração pélvis (m/s^2)	0,50	0,63	-28%	0,37	0,41	-10%
Aceleração cérebro (m/s^2)	0,36	0,63	-75%	0,32	0,41	-28%

Para as pistas com diferentes níveis de rugosidade (Perfis C e D) os resultados obtidos se comportaram da mesma forma, sendo estes apresentados no Anexo, Tabelas A.5 e A.6.

De forma geral, percebe-se que a utilização do modelo biodinâmico possui influência na dinâmica vertical do sistema. Em ambos os cenários – utilizando garfo rígido ou suspensões – a presença do modelo biodinâmico resulta em maiores níveis de vibração no chassi e no assento (respectivamente 9% e 78% no utilizando garfo rígido e 34% e 73% utilizando suspensões). Os sinais da aceleração do assento no tempo para os quatro cenários simulados são mostrados na Figura 7.

Figura 7 – Sinais da aceleração no assento no tempo para, (a) garfo rígido com biodinâmico ativo, (b) suspensões com biodinâmico ativo, (c) garfo rígido com biodinâmico inativo (piloto como um corpo rígido) e (d) suspensões com biodinâmico inativo (piloto como um corpo rígido).



Ainda que contraintuitivos em um primeiro momento, ao retomar a análise do comportamento básico dos sistemas massa-mola de 1-GDL é possível explorar hipóteses que justifiquem os resultados obtidos. Um oscilador massa-mola de 1-GDL submetido a determinada excitação possui determinado nível de vibração (frequência). Ao acrescentar-se uma nova massa junto àquela preexistente, assumindo que o sistema esteja próximo da situação de ressonância e mantendo a excitação anterior, o nível de vibração do sistema é reduzido. Entretanto, se ao invés de uma nova massa, fosse adicionado um novo sistema massa-mola conectado a massa anterior, o nível de complexidade do sistema aumentaria e o resultado não seria necessariamente àquele obtido com a adição de uma nova massa, pois, caso os dois sistemas estivessem sintonizados, haveria uma troca de energia entre as partes do sistema.

Assumindo a hipótese que o sistema se comporte de forma análoga ao que acontece no sistema de 1-GDL, pode-se entender o corpo rígido como equivalente a adição de uma massa ao sistema (e assim portanto, reduzindo a vibração do sistema) e a utilização do biodinâmico como a adição de um novo sistema complexo a dinâmica já existente, dificultando o entendimento do aumento no nível de vibração. Ainda assim, uma hipótese que justifique o aumento é a possibilidade de ressonância entre o biodinâmico e sistema dinâmico da bicicleta.

De forma complementar, por considerar a rigidez e o amortecimento das partes do corpo humano, a presença do biodinâmico permite uma avaliação mais precisa da vibração em diferentes partes do corpo, como o cérebro e a pélvis, de forma que sua utilização é fundamental em modelagens dinâmicas de bicicletas e motocicletas. Sendo assim, utilizou-se o modelo biodinâmico para a realização de todas as análises subsequentes.

5.2 Efeito das irregularidades da pista nas forças verticais e nas vibrações no piloto

A análise de vibração nos cenários com distintos níveis de rugosidade na pista foi realizada como uma forma de validar o modelo e verificar se havia consistência no seu comportamento. De forma empírica, é esperado que o nível de vibração ao qual o sistema está exposto aumente com o aumento da rugosidade da pista utilizada. Conforme apresentado na Tabela 4, os resultados obtidos nas simulações seguem o padrão esperado, com as vibrações aumentando em todos os pontos analisados conforme perfis mais rugosos são utilizados, tanto no cenário da utilização do garfo rígido, quanto no cenário da utilização de suspensões.

Ademais, percebe-se que as forças verticais e os momentos nos pneus são pouco influenciados com o aumento da rugosidade da pista (Figura A.2). Enquanto as acelerações no chassi e no assento aumentam, respectivamente, 300% e 335% (utilizando garfo rígido) e 300% e 300% (utilizando suspensões) entre a pista com perfil B e a pista com perfil D. As forças verticais e os momentos nos

pneus dianteiro e traseiro não possuem alterações significativas, sendo a maior alteração na ordem de 6% na força vertical no pneu dianteiro, considerando o cenário onde o garfo rígido é utilizado.

Tabela 4 – Valores RMS para forças, torques e acelerações em diversos pontos com Garfo rígido e Suspensões.

Parâmetro	Garfo Rígido			Suspensões		
	Pista perfil B	Pista perfil C	Pista perfil D	Pista perfil B	Pista perfil C	Pista perfil D
Força vertical – Pneu dianteiro (N)	456,12	456,87	483,43	454,92	456,87	463,95
Força vertical – Pneu traseiro (N)	632,25	633,82	652,44	631,66	633,82	641,51
Momento em z – Pneu dianteiro (N)	1,37	1,37	1,40	1,37	1,37	1,38
Momento em z – Pneu traseiro (N)	2,05	2,04	2,01	2,05	2,04	2,03
Aceleração chassi (m/s ²)	6,56	13,13	26,28	2,01	4,03	8,06
Aceleração assento (m/s ²)	2,81	5,62	12,23	1,52	3,03	6,08
Aceleração pélvis (m/s ²)	0,50	0,99	1,99	0,37	0,74	1,48
Aceleração cérebro (m/s ²)	0,36	0,72	1,45	0,32	0,63	1,27

O comportamento dos picos dos sinais de acelerações e forças seguem o mesmo comportamento dos valores RMS. Todas as demais forças e momentos possuem alterações menores de 3% entre as simulações utilizando a pista com perfil B e a pista com perfil D. As Figuras A.3 e A.4 mostram, respectivamente, o sinal no tempo das forças verticais em ambos os pneus e o sinal da aceleração no assento para os perfis de pista B e C.

5.3 Efeito da inclusão de suspensões nas vibrações sentidas pelo usuário

Para avaliar o impacto da presença das suspensões na dinâmica vertical, simulou-se a utilização de garfo rígido e de suspensões nos três perfis distintos de pista (B, C e D), permitindo assim identificar o impacto em pistas com diferentes níveis de rugosidades. Conforme esperado, a dinâmica vertical do conjunto analisado foi impactada de forma relevante pela utilização das suspensões. Os resultados apresentados nas Tabelas 5 e 6 mostram que a utilização de suspensões reduziu em média 69% a vibração no chassi da bicicleta, 47% a vibração no assento, 25% a vibração na pélvis do piloto e 12% a vibração no cérebro do piloto.

De forma geral, a utilização de suspensões proporciona uma redução uniforme nas vibrações do sistema, tendo um comportamento similar – em redução percentual das vibrações – independentemente do nível de rugosidade da pista.

Tabela 5 – Valores RMS das acelerações vinculadas à dinâmica vertical nas simulações utilizando as pistas com perfis B, C e D.

Parâmetro	Pista perfil B		Pista perfil C		Pista perfil D	
	Garfo rígido + Biodinâmico	Suspensões + Biodinâmico	Garfo rígido + Biodinâmico	Suspensões + Biodinâmico	Garfo rígido + Biodinâmico	Suspensões + Biodinâmico
Aceleração chassi (m/s ²)	6,56	2,01	13,13	4,03	26,28	8,06
Aceleração assento (m/s ²)	2,81	1,52	5,62	3,03	12,23	6,08
Aceleração pélvis (m/s ²)	0,50	0,37	0,99	0,74	1,99	1,48
Aceleração cérebro (m/s ²)	0,36	0,32	0,72	0,63	1,45	1,27

Tabela 6 – Redução em percentual das acelerações verticais considerando a utilização de suspensões e do garfo rígido nas pistas com perfis B, C e D.

Variação em percentual dos resultados (Suspensões x garfo rígido)			
Parâmetro	Perfil B	Perfil C	Perfil D
Aceleração chassi (m/s ²)	- 69%	- 69%	- 69%
Aceleração assento (m/s ²)	- 46%	- 46%	- 50%
Aceleração pélvis (m/s ²)	- 25%	- 25%	- 26%
Aceleração cérebro (m/s ²)	- 12%	- 12%	- 12%

5.4 Efeito da inclusão de suspensões na dinâmica lateral

Quando se observa os resultados da dinâmica lateral exibidos nas Tabelas 7 e 8, percebe-se a influência relevante do uso de suspensões na dinâmica lateral apenas em pistas mais rugosas, como visto nos resultados obtidos na pista perfil D. As trajetórias percorridas pela bicicleta nos cenários com garfo rígido e com suspensões, utilizando o perfil de pista D são mostradas na Figura 8 abaixo.

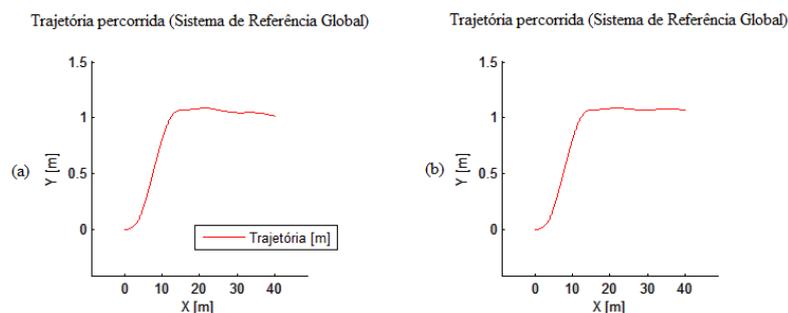
Tabela 7 – Valores RMS das forças e acelerações vinculadas a dinâmica lateral nas simulações utilizando as pistas com perfis B, C e D.

Parâmetro	Pista perfil B		Pista perfil C		Pista perfil D	
	Garfo rígido + Biodinâmico	Suspensões + Biodinâmico	Garfo rígido + Biodinâmico	Suspensões + Biodinâmico	Garfo rígido + Biodinâmico	Suspensões + Biodinâmico
Força em x – Pneu dianteiro (N)	18,24	18,17	18,28	18,28	29,50	19,35
Força em y – Pneu dianteiro (N)	158,43	158,25	158,31	158,31	169,76	158,87
Força em x – Pneu traseiro (N)	17,63	17,60	17,66	17,66	22,27	17,98
Força em y – Pneu traseiro (N)	163,49	163,33	163,61	163,61	176,43	164,76
Aceleração no eixo x (m/s ²)	0,06	0,06	0,06	0,06	0,19	0,07
Aceleração no eixo y (m/s ²)	0,83	0,83	0,84	0,83	1,27	0,83

Tabela 8 – Redução em percentual das forças e acelerações laterais considerando a utilização de suspensões e do garfo rígido nas pistas com perfis B, C e D.

Variação em percentual dos resultados (Suspensões x garfo rígido)			
Parâmetro	Perfil B	Perfil C	Perfil D
Força em x – Pneu dianteiro (N)	0,4%	0,0%	34,4%
Força em y – Pneu dianteiro (N)	0,1%	0,0%	6,4%
Força em x – Pneu traseiro (N)	0,2%	0,0%	19,3%
Força em y – Pneu traseiro (N)	0,1%	0,0%	6,6%
Aceleração no eixo x (m/s ²)	0,0%	0,0%	63,2%
Aceleração no eixo y (m/s ²)	0,0%	1,2%	34,6%

Figura 8 – Trajetória percorrida pela bicicleta com a pista perfil D utilizando (a) garfo rígido e (b) suspensões.



Nos perfis menos rugosos de pista simulados, não há impacto considerável do uso de suspensões nas forças laterais (eixos x e y) aos quais os pneus estão expostos. Também não há impacto nas acelerações laterais do conjunto, como observado nas Tabelas 7 e 8. Entretanto, os resultados obtidos nas simulações utilizando o perfil de pista D – mais rugoso – mostram redução significativa das forças nos pneus e das vibrações do conjunto, sendo os maiores impactos nas forças em x nos pneus dianteiro e traseiro e nas acelerações em x e y, com reduções de, respectivamente 34%, 19%, 63% e 35%. A Figura A.5 mostra o sinal no tempo das acelerações em x e y para a pista perfil D.

No cenário mais crítico de rugosidade (pista perfil D) a utilização de suspensões reduz as forças de reação vertical, tal fato impacta as forças e acelerações laterais, visto a relação diretamente proporcional existente entre elas conforme exposto nas Equações (10) e (11) originárias da “Fórmula

Mágica” de Pacejka (2012). Portanto, a tendência é que o uso de garfo rígido traga mais impacto em perfis mais rugosos de pista, onde existirão maiores forças de contato e, por consequência, maiores forças laterais durante o movimento de esterçamento da roda.

5.5 Avaliação do conforto segundo ISO 2631-1 (1997)

Na avaliação do conforto para VCI, analisou-se a aceleração no assento considerando as ponderações determinadas pela Norma nos diferentes cenários de perfil de pista e o uso de garfo rígido ou o uso de amortecedores. Os resultados obtidos são exibidos na Tabela 9.

Tabela 9 – Classificação dos resultados conforme o conforto segundo ISO 2631-1 (1997)

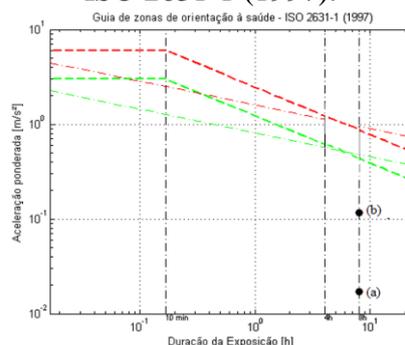
Perfil de pista	Cenário	Aceleração ponderada no assento (m/s ²)	Classificação Conforto para VCI
B	Garfo rígido + Biodinâmico	2,26	de muito desconfortável a extremamente desconfortável
B	Suspensões + Biodinâmico	1,31	de desconfortável a muito desconfortável
C	Garfo rígido + Biodinâmico	4,52	extremamente desconfortável
C	Suspensões + Biodinâmico	2,63	extremamente desconfortável
D	Garfo rígido + Biodinâmico	9,10	extremamente desconfortável
D	Suspensões + Biodinâmico	5,26	extremamente desconfortável

Considerando os critérios definidos pela norma e as simulações na pista perfil B, na utilização de garfo rígido a classificação conforme o conforto foi “de muito desconfortável a extremamente desconfortável”, apresentando uma melhora no cenário da utilização de suspensões, enquadrando-se como “de desconfortável a muito desconfortável”. Nos demais cenários de perfis de pista mais rugosos, ainda que a utilização de suspensões tenha reduzido consideravelmente a aceleração ponderada no assento, todas as simulações se enquadraram em “extremamente desconfortável”.

5.6 Avaliação do risco à saúde segundo ISO 2631-1 (1997)

Para avaliação dos riscos à saúde conforme parâmetros determinados pela Norma ISO 2631-1 (1997), analisou-se, para diversos cenários, a aceleração no assento filtrada pela curva de ponderação W_h . De forma complementar, pelas simulações contemplarem apenas 5 segundos, foi necessário ajustar as acelerações filtradas de forma a obter uma aceleração equivalente a uma exposição de 8 horas. As simulações abrangeram os três perfis de pista e a utilização de garfo rígido ou suspensões. Em todos os cenários simulados, não houve algum em que uma situação de insalubridade fosse identificada, de forma que não há propensão a problemas de saúde. Os dois cenários com resultados extremos obtidos (maior e menor vibração equivalente) foram plotados na Figura 9, sendo, (a) pista perfil B com a utilização de suspensões e (b) pista perfil D com a utilização de garfo rígido.

Figura 9 – Resultados extremos obtidos dentro das zonas de orientação à saúde segundo a Norma ISO 2631-1 (1997).



Por fim, identifica-se que não existe relação direta entre as classificações referentes a saúde e conforto, especialmente pela determinação de conforto considerar apenas um curto período, enquanto a avaliação da propensão ao risco de saúde considera o cenário de equivalência para uso em 8 horas. Para avaliação de ambas as classificações, seguiu-se as metodologias predefinidas pela norma ISO 2631-1 (1997).

6. CONCLUSÕES

Este trabalho propôs a construção do modelo de uma bicicleta abrangendo a dinâmica vertical com 5 graus de liberdade e a dinâmica lateral com 4 graus de liberdade. Múltiplas análises foram construídas a partir da modelagem elaborada, algumas delas avaliando pontos importantes do próprio modelo, como a representação do piloto por um corpo rígido ou por um modelo biodinâmico, outras avaliando o impacto da utilização de componentes específicos, como a presença de um garfo rígido ou de suspensões, e outras concluindo sobre o impacto das vibrações sobre o piloto em pistas com diferentes níveis de rugosidade de pista.

A modelagem proposta foi elaborada a partir de inúmeras referências, trabalhos e experimentos existentes na bibliografia, possibilitando assim concatenar o conhecimento existente e consolidá-lo em um modelo robusto da dinâmica de uma bicicleta. O algoritmo referência em MATLAB utilizado foi desenvolvido por Tomasi (2019) para a avaliação da dinâmica de motocicletas, sendo completamente adaptado para a aplicação em bicicletas. A modelagem da dinâmica vertical seguiu o modelo proposto por Zou et al. (2009) e a modelagem da dinâmica lateral seguiu o modelo proposto por Drehmer (2017 *apud* TOMASI, 2019). O modelo de interação entre pneu-solo utilizado é uma evolução do originalmente apresentado por Pacejka (2012) para automóveis, sendo utilizado neste trabalho a versão posteriormente adaptada por Doria et al. (2012) para pneus de bicicleta. Os parâmetros geométricos, de massas, de rigidez e de amortecimento de bicicleta utilizados foram obtidos através dos trabalhos desenvolvidos por diversos autores (BARATTO, 2022, BRUNCKHORST, 2018, BULSINK et al., 2015, LIU et al., 2013, SUAREZ et al., 2017 e WAECHTER et al., 2002). O modelo desenvolvido se destaca dentro da bibliografia analisada por contemplar, de forma inédita, as dinâmicas vertical e lateral considerando parâmetros, relações e modelagens específicas de bicicletas.

Através da análise comparativa da modelagem do piloto como um corpo rígido ou como um modelo biodinâmico com 12 graus de liberdade, percebeu-se o alto nível de importância da utilização do modelo detalhado. Além de existir impacto nos resultados da dinâmica vertical e da dinâmica lateral da bicicleta, com o biodinâmico é possível fazer uma análise aprofundada das vibrações em diferentes partes importantes do corpo humano, como o cérebro. A utilização de suspensões – em contraponto a utilização do garfo rígido – trouxe significativa redução das vibrações no conjunto, reduzindo em média a vibração no chassi da bicicleta e no assento em, respectivamente, 69% e 47%. Com relação ao impacto das suspensões na dinâmica lateral, só houve alteração significativa nas simulações com perfil mais rugoso de pista – perfil D – onde as forças laterais (nos eixos x e y) tiveram reduções da ordem de 20% a 35%. Por fim, com relação ao impacto no conforto e na saúde do piloto, ainda que todos os cenários simulados tenham sido classificados entre “desconfortável” e “extremamente desconfortável”, nenhum deles encontra-se como uma situação de insalubridade, de forma que não há propensão de riscos à saúde para uma utilização diária. Em futuros trabalhos, dada a utilização do modelo biodinâmico, pode-se avaliar a condição de propensão a saúde considerando a vibração em pontos distintos do corpo humano não explorados nesse artigo, como por exemplo o cérebro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALESSI, G. **Quer mais tempo, dinheiro e saúde? Vá de bike.** El País. 14/05/2018. <https://brasil.elpais.com/brasil/2018/05/09/politica/1525876469_167766.html> . Acesso em 25/02/2022
- AZIZAN, A., FARD, M., AZARI, M.F., BENEDIKTSDÓTTIR, B., ARNARDÓTTIR, E.S., JAZAR, R., MAEDA, S. **The influence of vibration on seated human drowsiness.** Ind. Health 54(4), 296–307, 2016.
- BARATTO, A. **Abordagem teórica e prática no desenvolvimento de uma bicicleta do tipo mountain bike full suspension.** Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica, UFSM. Santa Maria, RS, 2022.
- BRUNCKHORST, B. **Design of Hydraulic Bottom-Out Control for Mountain Bike Suspension.** Faculty of Engineering, Architecture and Information Technology. THE UNIVERSITY OF QUEENSLAND, 2018.
- BULSINK, E. B., DORIA, A., VAN DE BELT, D., KOOPMAN, B. **The effect of tyre and rider properties on the stability of a bicycle.** Advances in Mechanical Engineering, Vol. 7(12) 1–19. 2015.
- CALOI. **A bike Strada foi desenvolvida especialmente para aqueles que querem iniciar no ciclismo de estrada.** 2022. <<https://caloi.com/produto/strada/>>. Acesso em 01/03/2022.
- CAMPOS, A. **Para 77%, sustentabilidade deve ter prioridade sobre crescimento ou lucro, diz Febraban/Ipespe.** Valor Econômico. 30/09/2021. <<https://valor.globo.com/financas/noticia/2021/09/30/para-77percent-sustentabilidade-deve-ter-prioridade-sobre-crescimento-ou-lucro-diz-febrabanipespe.ghtml>> . Acesso em 25/01/2022.
- CANYON BIKES. Outlet. 2022. <<https://www.canyon.com/pt-br/outlet-bikes/mountain-bikes/>>. Acesso em 01/03/2022.
- CERATTI, M. **Contra as mudanças climáticas, América Latina busca “limpar” o setor de transportes.** El País. 09/02/2017. <https://brasil.elpais.com/brasil/2017/02/09/internacional/1486646070_740348.html> . Acesso em 25/02/2022.
- CHAMPOUX, Y., RICHARD, S., DROUET, M. **Bicycle Structural Dynamics.** Sound and vibration Magazine, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, 2008.
- DORIA, A., TOGNAZZO, M., CUSIMANO, G., BULSINK, V., COOKE, A., KOOPMAN, N. **Identification of the mechanical properties of bicycle tyres for modelling of bicycle dynamics.** Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 51:3, 405-420. 2012.
- FIGUEIREDO, G. **Suspensão na bicicleta vale a pena?** Blog pedal.com.br. 20/09/2022. <https://www.pedal.com.br/suspensao-bicicleta-vale-a-pena_texto14499.html>. Acesso em 25/01/2022.
- GRANJEIA, J. **Explosão na demanda, aperto na oferta: como a pandemia impactou o mercado de bicicletas no Brasil.** BBC News, Brasil. 19/02/2021. <<https://www.bbc.com/portuguese/brasil-56119561>> . Acesso em 18/02/2022.
- GRIFFIN, M.J. **The validation of biodynamic models.** Clin. Biomech. 16(1), S81–S92, 2001.
- HANCOCK, J. **Há 200 anos foi criada a primeira bicicleta: estes foram os primeiros modelos.** BBC News, Brasil. 19/04/2017. <https://brasil.elpais.com/brasil/2017/04/19/deportes/1492597692_626497.html>. Acesso em 19/02/2022.

HE, Q., FAN, X., & MA, D. **Full Bicycle Dynamic Model for interactive Bicycle Simulator.** *Journal of computing and information Science in Engineering.* Journal of computing and information Science in Engineering, December ASME vol. 5 2005.

ISO 2631-1, 1997. Mechanical vibration and shock – **Evaluation of human exposure to whole-body vibration** – Part 1: General requirements. International Organization for Standardization, Geneva, 2nd edition.

ISO 8608, 2016, **Mechanical vibration – Road surface profiles – Reporting of measured data**, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2016.

KATU, U.S., DESAVALE, R.G., KANAI, R.A. **Effect of vehicle vibration on human body - RIT experience.** Proceedings of the 11th National Conference on Machines and Mechanisms, pp. 1–9, 2003.

LIU, Y., TSAY, T., WANG, T., LIU, C., **Analyzing the influences of bicycle suspension systems on pedaling forces and human body vibration.** Feng Chia University, Taichung, Taiwan, R. O. C, 2013.

MICHELIN. **O conforto dos pneus de Bicicleta: definição e fatores.** 2022. <<https://www.michelin.com.br/bicycle/dicas-e-conselhos/conselhos-bicicleta/o-conforto-dos-pneus-de-bicicleta-definicao-e-fatores>>. Acesso em 06/02/2022.

NEWMARK, N. M. **A Method of Computation for Structural Dynamics;** Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 85 (EM3) 67-94. 1959.

NR-15. **Norma Regulamentadora No.15. Atividades e operações insalubres - Anexo N°8 Vibrações.** 2014. <http://www.guiatrabalhista.com.br/legislacao/nr/nr15.html>. Acesso em 24/02/2022.

ONAYA, A. F. **Modelagem dinâmica de bicicletas com suspensão integral (full suspension).** Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica, USP. São Paulo, SP, 2012.

PACEJKA, H. B. **Tire characteristics and vehicle handling and stability. Tire and vehicle dynamics,** Elsevier Ltd, 2012

RAO, S. S. **Mechanical Vibrations.** 5th Edition, Prentice Hall. 1112 p. 2011.

ROCHA, G. O. **Investigação dos níveis de vibração em usuários de diferentes modelos de bicicletas.** Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica, UFRGS. Porto Alegre, RS, 2019.

SCHIO, R. **Análise de exposição a vibrações em motocicletas: um estudo de caso para VCI e VMB.** Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica, UFRGS. Porto Alegre, RS, 2016.

SUAREZ, M., ROMERO, J., LEGARDA, J., ENRIQUEZ, H. **Estabilización Automática de una Bicicleta sin Conductor mediante el Enfoque de Control por Rechazo Activo de Perturbaciones.** Revista Iberoamericana de Automatica e Informática Industrial, 001 – 15. 2017.

TOMASI, V. **Otimização multiobjetivo dos parâmetros da suspensão de uma motocicleta.** Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica, UFRGS. Porto Alegre, RS, 15p., 2019.

WAECHTER, M., RIESS, F., ZACHARIAS, N. **A multibody Model for the Simulation of Bicycle Suspension Systems.** Journal of Vehicle System Dynamics, vol. 37 No1, pp3-28. 2002.

ZAINAL, N.A., ZAKARIA, M. A., BAARATH, K. **A study on the exposure of vertical vibration towards the brain on seated human driver model,** Intelligent Manufacturing & Mechatronics, 2018.

ZOU, X., SHI, X., SHI, Q., XIAO, S. **Motorcycle Dynamics Modeling and Simulation Based on Road Simulation.** Applied Mechanics and Materials Vols. 16-19 pp 307-312, 2009.

ANEXOS

Figura A.1 – Ângulo de esterçamento do pneu dianteiro no tempo.

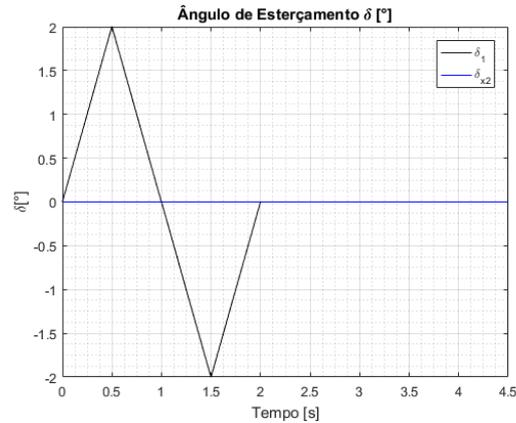


Figura A.2 – Sinal no tempo das forças verticais no pneus dianteiro e traseiro, (a) com garfo rígido pista perfil B, (b) com suspensões pista perfil B, (c) com garfo rígido pista perfil C, (d) com suspensões pista perfil C, (e) com garfo rígido pista perfil D e (f) com suspensões pista perfil D.

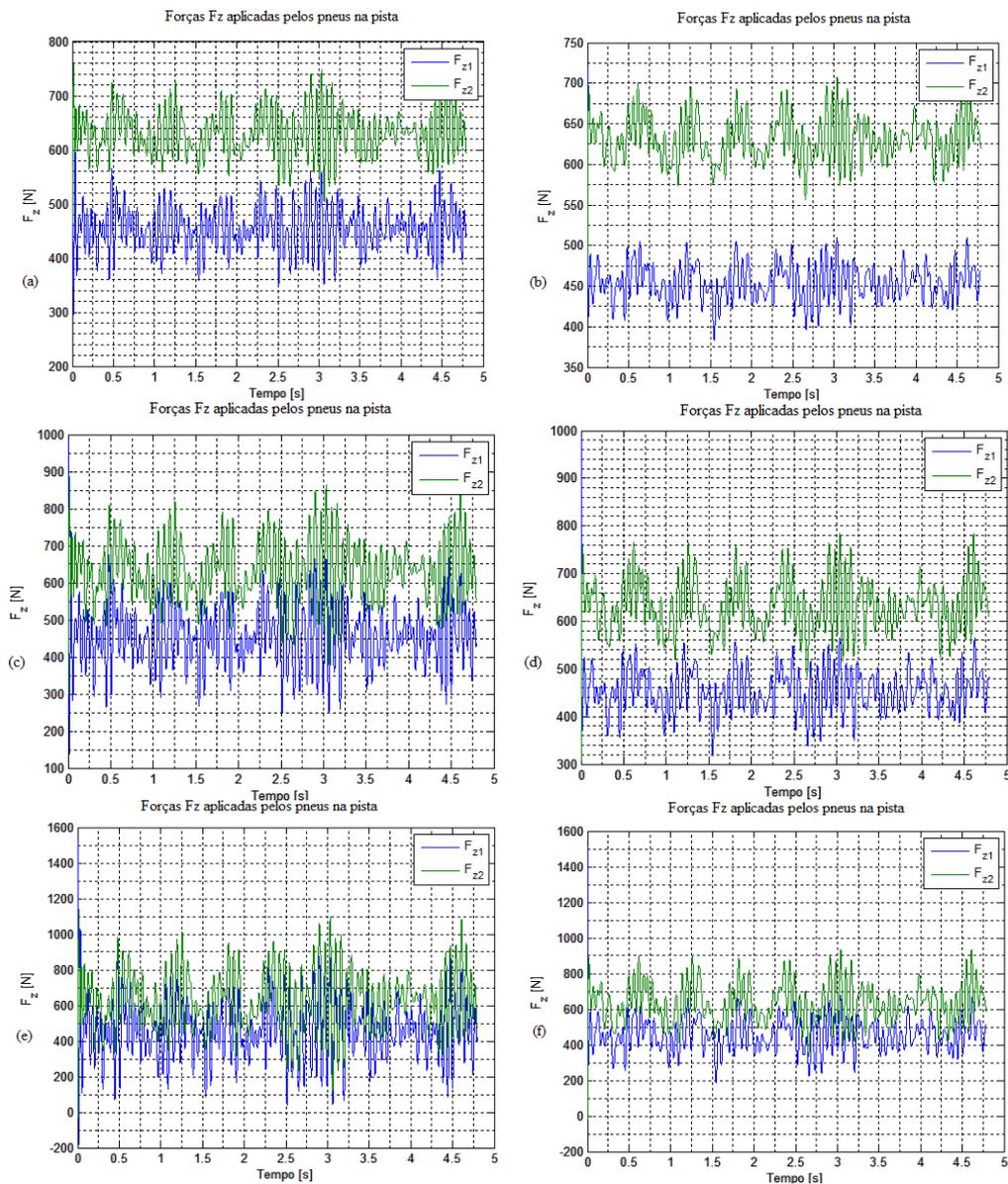


Figura A.3 – Irregularidades da pista para ambos os pneus no tempo, perfis (a) perfil B, (b) perfil C e (c) perfil D.

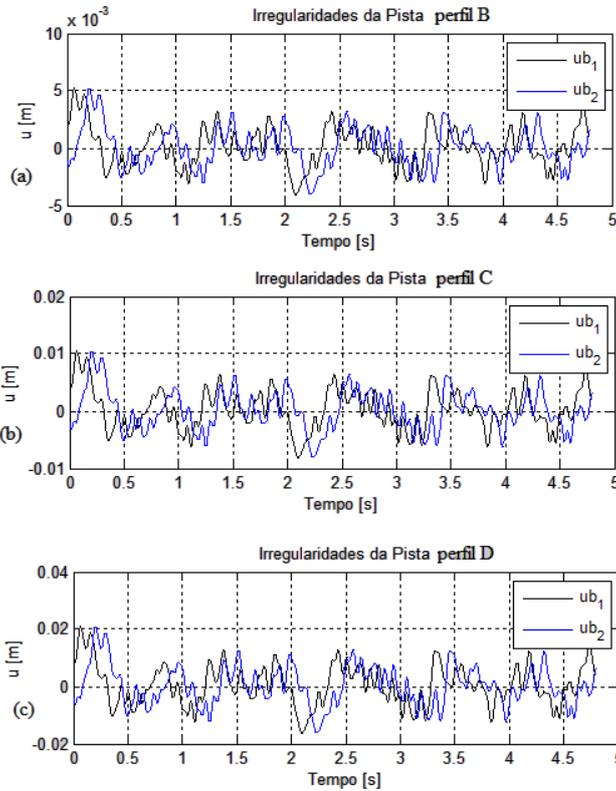


Figura A.4 – Sinal no tempo das acelerações no assento, (a) com garfo rígido pista perfil B, (b) com garfo rígido pista perfil D, (c) com suspensões pista perfil B e (d) com suspensões pista perfil D.

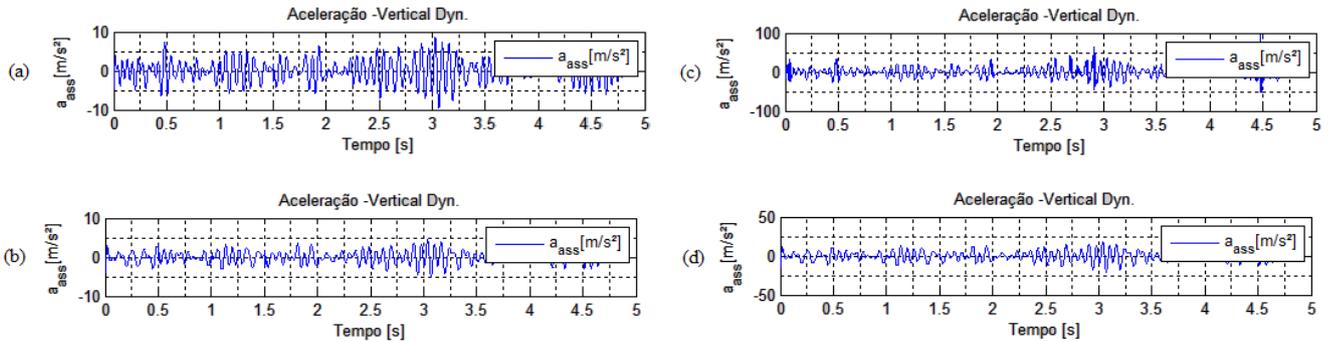


Figura A.5 – Sinal no tempo das acelerações, pista perfil D, em, (a) x com garfo rígido, (b) x com suspensões, (c) y com garfo rígido e (d) y com suspensões.

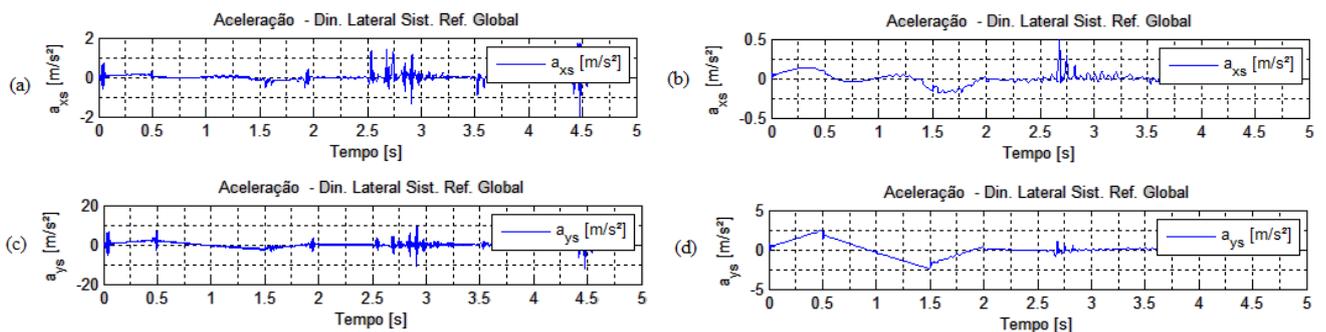


Tabela A.1 – Valores de massas da literatura e adotados neste trabalho.

Massas (kg)	SUAREZ et al. (2017)	BULSINK et al. (2015)	Utilizado
Massa do corpo da bicicleta	10,91	15,65	15,65
Massa da suspensão dianteira garfo	1,25	2,42	2,42
Massa da suspensão traseira	0,0	0,875	0,875
Massa do assento	0,35	N/A	0,35

Tabela A.2 – Valores de dimensões geométricas da literatura e adotados neste trabalho.

Geometria (m)	SUAREZ et al. (2017)	BARATTO (2022)	Utilizado
Distância entre eixos da bicicleta	1,06	1,14	1,14
Distância do CG para roda dianteira	0,54	0,58	0,58
Distância do CG para roda traseira	0,51	0,56	0,56
Altura do CG em relação ao solo	0,60	0,60	0,60

Tabela A.3 – Valores de rigidez da literatura e adotados neste trabalho.

Rigidez (N/m)	BRUNCKHORST (2018)	LIU et al. (2013)	Utilizado - Garfo rígido	Utilizado - Suspensões
Rigidez equivalente susp. dianteira	8.700	18.000	Muito alto (10⁸)	18.000
Rigidez equivalente susp. traseira	N/A	36.000	Muito alto (10⁸)	36.000
Rigidez radial pneu dianteiro	150.000	N/A	150.000	150.000
Rigidez radial pneu traseiro	150.000	N/A	150.000	150.000
Rigidez do assento	46.700	N/A	46.700	46.700

Tabela A.4 – Valores de amortecimento da literatura e adotados neste trabalho.

Amortecimento (Ns/m)	LIU et al. (2013)	WAECHTER et al (2002)	Utilizado - Garfo rígido	Utilizado - Suspensões
Amort.equiv. susp. dianteira	600	N/A	Muito alto (10⁸)	600
Amort. equiv. susp. traseira	1200	N/A	Muito alto (10⁸)	1.200
Amort. radial pneu dianteiro	N/A	272	272	272
Amort. radial pneu traseiro	N/A	272	272	272
Amort. do assento	N/A	1000	1.000	1.000

Tabela A.5 – Valores RMS dos resultados obtidos nas simulações considerando a pista Perfil C.

Parâmetro	Garfo rígido – Biodinâmico	Grafo rígido – Corpo Rígido	Diferença %	Suspensões – Biodinâmico	Suspensões – Corpo Rígido	Diferença %
Aceleração no eixo x (m/s ²)	0,06	0,06	2%	0,06	0,06	0%
Aceleração no eixo y (m/s ²)	0,84	0,84	0%	0,83	0,83	0%
Aceleração chassi (m/s ²)	13,13	11,89	9%	4,03	2,67	34%
Aceleração assento (m/s ²)	5,62	1,26	78%	3,03	0,82	73%
Aceleração pélvis (m/s ²)	0,99	1,26	28%	0,74	0,82	11%
Aceleração cérebro (m/s ²)	0,72	1,26	75%	0,63	0,82	28%

Tabela A.6 – Valores RMS dos resultados obtidos nas simulações considerando a pista Perfil D.

Parâmetro	Garfo rígido – Biodinâmico	Grafo rígido – Corpo Rígido	Diferença %	Suspensões – Biodinâmico	Suspensões – Corpo Rígido	Diferença %
Aceleração no eixo x (m/s ²)	0,19	0,13	32%	0,07	0,06	9%
Aceleração no eixo y (m/s ²)	1,27	1,03	19%	0,83	0,83	0%
Aceleração chassi (m/s ²)	26,28	23,78	10%	8,06	5,34	34%
Aceleração assento (m/s ²)	12,23	2,53	79%	6,08	1,63	73%
Aceleração pélvis (m/s ²)	1,99	2,53	-27%	1,48	1,63	10%
Aceleração cérebro (m/s ²)	1,45	2,53	-75%	1,27	1,63	29%