

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

MODELAMENTO DE UMA MOTOCICLETA COM PILOTO BIODINÂMICO DE 8 GDL E
ALGORITMO QUADRÁTICO DE INTEGRAÇÃO NO TEMPO.

por

Alison Nunes de Lima

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 2023.

CIP - Catalogação na Publicação

Lima, Alison Nunes de
MODELAMENTO DE UMA MOTOCICLETA COM PILOTO BIODINÂMICO DE
8 GDL E ALGORITMO QUADRÁTICO DE INTEGRAÇÃO NO TEMPO. / Alison
Nunes de Lima. -- 2023.
15 f.
Orientador: Herbert Martins Gomes.
Coorientador: Leonardo Roso Colpo.

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. Dinâmica de motocicletas. 2. Método de Newmark quadrático. 3. modelo biodinâmico. 4. dinâmica lateral. 5. conforto e segurança veicular. I. Gomes, Herbert Martins, orient. II. Colpo, Leonardo Roso, coorient. III. Título.

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

Alison Nunes de Lima

MODELAMENTO DE UMA MOTOCICLETA COM PILOTO BIODINÂMICO DE 8 GDL E
ALGORITMO QUADRÁTICO DE INTEGRAÇÃO NO TEMPO.

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

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

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Dr. Herbert Martins Gomes

Coorientador: Me. Leonardo Roso Colpo

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Herbert Martins Gomes (Presidente)

Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas

Prof. Dr. Felipe Tempel Stumpf

Porto Alegre, abril de 2023.

“Você não consegue ligar os pontos olhando pra frente; você só consegue ligá-los olhando pra trás. Então você tem que confiar que os pontos se ligarão algum dia no futuro”

Jobs, Steve

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente aos meus pais por todo suporte na minha trajetória até aqui, que nunca mediram esforços para verem minha felicidade. Não há dúvidas de que nada disso seria possível sem eles ao meu lado.

Aos meus familiares que sempre me motivaram em busca dos meus sonhos e vibraram comigo com cada conquista, e que nunca duvidaram da minha capacidade de ultrapassar obstáculos.

Em especial ao meu estimado dindo Paulo que nos deixou no meio deste caminho e infelizmente não pode participar deste momento que ele sempre comentava. Aonde estiveres, esta vitória é sua também e espero que fiques feliz por isso.

Agradeço à minha namorada por sempre me apoiar e incentivar em todos os momentos, por ser meu porto seguro e minha inspiração. Sem ela, esta conquista não teria este sabor e sou grato por tê-la ao meu lado, em todas as etapas da minha vida.

Ao professor Herbert Martins Gomes pela incansável parceria nesta jornada, utilizando de seu vasto conhecimento para orientação e ensinamentos valiosos. O agradecimento vai também pela sua disponibilidade por me auxiliar em todos os momentos.

Por último, aos meus fiéis amigos de jornada nessa graduação, que participaram de todos os momentos, bons e ruins. E que tornaram essa caminhada muito menos desgastante do que ela poderia ter sido. À essa amizade, sou muito grato, e que possamos reviver os momentos de “Café da Física” por muitos e muitos anos.

MODELAMENTO DE UMA MOTOCICLETA COM PILOTO BIODINÂMICO DE 8 GDL E ALGORITMO QUADRÁTICO DE INTEGRAÇÃO NO TEMPO

Alison Nunes de Lima

alison.nuneslima@gmail.com

Resumo. O número de motocicletas utilizadas como meio de transporte tem crescido ano após ano, principalmente como uma alternativa menos custosa e mais ágil em termos de deslocamento. O projeto para a suspensão desses veículos requer a análise de diversos fatores, incluindo a finalidade do uso da motocicleta, bem como aspectos estéticos, ergonômicos, de conforto e segurança. Nesse sentido, este trabalho propõe um estudo comparativo para verificar os fatores que afetam a vibração sentida pelo piloto com o objetivo de melhorar a dirigibilidade. Para tanto, é proposta a modelagem do sistema de suspensão da motocicleta, com 5 graus de liberdade (GDL) para a dinâmica vertical, 4-GDL para a dinâmica lateral e uma proposta de dois modelos biodinâmicos, um com 8 e outro com 12-GDL. Para uma das variáveis definidas de uma moto, propõe-se o modelamento do comportamento dinâmico vibracional utilizando dois métodos de integração, Newmark tradicional e outro quadrático. O outro parâmetro avaliado é o trajeto estabelecido pela ISO 2631-1 (1997), que pode ser alternado entre uma pista irregular com solavancos e uma perfeitamente lisa, além de uma manobra de troca simples de faixa conforme a ISO 3888-2 (2011). Os resultados indicam que o acréscimo de novos GDL no piloto ou o método quadrático não fazem diferença significativa nos resultados de acelerações desenvolvidas, porém permite fazer com a mesma acuracidade, análises com intervalos de tempo maiores tornando a análise mais rápida. No caso das irregularidades, as considerações de pista lisa e irregular apresentaram grandes variações de acelerações para o piloto.

Palavras-chave: dinâmica de motocicletas, método de Newmark quadrático, modelo biodinâmico, dinâmica lateral, conforto e segurança veicular.

Modeling a motorcycle with 8-DOF biodynamic pilot and a quadratic time integration algorithm

Abstract. The number of motorcycles used as a means of transportation has grown year after year, mainly as a less expensive and more agile alternative in terms of travel. The design for the suspension of these vehicles requires the analysis of several factors, including the purpose of using the motorcycle, as well as aesthetic, ergonomic, comfort, and safety aspects. In this sense, this work proposes a comparative study to verify the factors that affect the vibration felt by the pilot with the objective of improving drivability. For this, it is proposed to model the motorcycle suspension system, with 5 degrees of freedom (DOF) for the vertical dynamics, 4-DOF for the lateral dynamics and a proposal of two biodynamic models, one with 8 and another with 12-DOF. For one of the defined variables of a motorcycle, it is proposed to model the vibrational dynamic behavior using two integration methods, traditional and quadratic Newmark. The other parameter evaluated is the track established by ISO 2631-1 (1997), which can be alternated between an uneven track with irregularities and a perfectly smooth one, in addition to a simple lane change maneuver according to ISO 3888-2 (2011). The results indicate that the addition of new DOFs in the pilot or the quadratic method makes no significant difference in the results of developed accelerations, but allows to make with the same accuracy, analyses with larger time intervals making the analysis faster. In the case of irregularities, the smooth and uneven track considerations presented large variations in accelerations for the pilot.

Keywords: motorcycle dynamics, quadratic Newmark method, biodynamic model, lateral dynamics, comfort and vehicle safety.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação.....	1
1.2	Objetivos	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	3
3.1	A motocicleta	3
3.2	Equações para a dinâmica vertical da motocicleta e do piloto	3
3.3	Integração numérica pelo método Newmark Tradicional e Quadrático	6
3.4	Equações de movimento para a dinâmica lateral da motocicleta.....	7
3.5	Equações de Pacejka para forças nos pneus de motocicletas.....	7
4	METODOLOGIA	8
4.1	Padrão de irregularidade vertical de pistas estabelecido ISO 8608 (2016).....	8
4.2	Trajeto de troca simples de faixa segundo a ISO 3888-2 (2011).....	8
4.3	Definição de conforto pela Norma ISO 2631-1 (1997)	9
5	RESULTADOS.....	9
5.1	Análise para motocicleta com pista irregular, biodinâmicos de 12-GDL, algoritmo quadrático, biodinâmico flexível.....	9
5.2	Avaliação da influência do tipo de pista nas acelerações	11
5.3	A influência do modelo biodinâmico.....	12
5.4	A importância de utilizar 8 ou 12-GDL	13
5.5	Comparações para algoritmo de Newmark simples e quadrático	13
5.6	Análise para os casos mais críticos de aceleração no assento.....	14
6	CONCLUSÕES	15
6.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	15
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	16
	ANEXOS	18
	APÊNDICES.....	19

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – (a) Esquema representativo de uma motocicleta com 5-GDL. (Zou et al., 2009, adaptado). (b) Esquema vibracional do piloto sentado com 8-GDL (Zainal et al., 2018, adaptado).	4
Figura 2 – Esterçamento no guidão dianteiro da moto para realizar a troca simples de faixa.....	9
Figura 3 – (a) Deslocamento, velocidade e aceleração do cérebro; (b) Deslocamento, velocidade e aceleração do assento; (c) Aceleração de rolagem e (d) Aceleração de guinada;.....	10
Figura 4 – (a) Deslocamento, velocidade e aceleração lateral; (b) Deslocamento, velocidade e aceleração lateral; (c) Força de reação dos pneus na pista e (d) Força de reação do solo nos pneus dianteiro e traseiro;.....	11
Figura A.1 – Classificação das estradas, classes A a H.	18
Figura A.2 – Modelo para dinâmica lateral da moto com 4-GDL (x_b , y_b , ψ e φ)	20
Figura A.3 – Modelo para piloto com 12-GDL (adaptado de Zainal et al., 2018)	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Descrição dos demais graus de liberdade da motocicleta.	5
Tabela 2. Parâmetros dos modelos biodinâmicos adotados (Zainal et al., 2018).	6
Tabela 3. Padrões de conforto de acordo com a ISO 2631-1 (1997).	9
Tabela 4. Influência do tipo de pista nas acelerações para 12-GDL específicos (moto e biodinâmicos).	12
Tabela 5. Influência da flexibilidade do modelo biodinâmico de 12-GDL em algumas acelerações da moto e do biodinâmico.	12
Tabela 6. Influência da quantidade de GDL do modelo biodinâmico em algumas acelerações da moto e do biodinâmico.	13
Tabela 7. Influência do algoritmo de integração em algumas acelerações da moto e do biodinâmico.	14
Tabela 8. Maiores acelerações RMS avaliadas no assento e na pélvis.	14
Tabela A.1 – Todos os testes paramétricos realizados e respectivos valores RMS de aceleração. ...	15

1 INTRODUÇÃO

Com a pandemia, o modo de locomoção do brasileiro alterou-se. As motocicletas aumentaram sua participação no mercado, como uma alternativa aos carros que são bem mais caros, possuem custos de manutenção mais elevados e possuem autonomia muito menor que as motocicletas. De acordo com a ABRACICLO (2022), Associação Brasileira dos Fabricantes de Motocicletas, Ciclomotores, Motonetas, Bicicletas e Similares, o número de motocicletas emplacadas no país foi de 636 mil no primeiro semestre de 2021, um aumento de 32% em relação ao mesmo período do ano anterior. Este número representa o melhor desempenho desde 2015, comprovando que as motocicletas se estabeleceram como uma opção aos outros meios, tendo em vista principalmente sua praticidade. Ainda, de acordo com a ABRACICLO (2022), a expectativa é que até o final do ano de 2022 tenha-se mais de 1,26 milhão de motos emplacadas, participando do montante de 30,5 milhões de motos licenciadas atualmente no Brasil. Este número é bastante representativo, pois significa que um em cada 4 veículos que circulam pelas ruas serão motocicletas (ABRACICLO, 2022).

No mês de março de 2022, a venda de carros 0 km caiu 23% enquanto que a de motos subiu 76%. Isso demonstra que as motos se tornaram uma escolha de baixo custo em meio à bolha dos preços de carros zero e usados, por conta das diversas crises globais nos últimos anos. Outra explicação para essa discrepância é a alta no preço dos combustíveis, já que uma motocicleta possui uma autonomia superior a um carro, em alguns casos chegando a ser até 3 vezes maior.

O número de habilitações da categoria A, isto é, para pilotagem de motocicletas, também cresceu nestes últimos anos, saiu de 23,3 milhões em 2012 para 35,2 milhões em 2021, um aumento de 50,9% (ABRACICLO, 2022). Isto se deve aos consumidores buscarem uma nova alternativa para escapar dos engarrafamentos e das péssimas condições do transporte público brasileiro. Este número também engloba o aumento de pessoas que utilizam as motocicletas como trabalho principal ou renda extra, isto é, motoboys, moto táxis, entregadores, etc. Contudo, este aumento no contingente de motos nas ruas representa mais acidentes, por consequência. Por ser um público mais vulnerável a sofrer lesões em razão da exposição física, os números de sinistros envolvendo motocicletas crescerem 14,3% em relação a 2021, representando 54% de todos os acidentes de trânsito no Brasil (Auto Esporte, 2021). Este número fica evidenciado quando se percebe quanto custa para os cofres públicos, pois somente no ano de 2021, mais de 300 mil motociclistas necessitaram de internação hospitalar, custando ao SUS quase 280 milhões de reais (Abramet, 2021).

1.1 Motivação

Avaliar o comportamento biodinâmico de motocicletas é importante para poder projetar modelos que solucionem total ou parcialmente problemas de vibração para os seus usuários, sobretudo aqueles que passam muitas horas na condução de motocicletas. Estas condições agravam-se com as horas de uso e também com as condições irregulares das pistas. Desta forma, fatores como conforto e ergonomia precisam ser levados em consideração na hora de propor soluções para estes veículos. Levando em consideração estes fatores, o presente trabalho visa buscar condições ergonômicas construtivas que proporcionem o maior conforto possível ao condutor.

1.2 Objetivos

Este trabalho consiste no modelamento e simulação numérica de um modelo biodinâmico de um ser humano sentado, pilotando sua motocicleta. Para isso, aspectos dinâmicos como a movimentação vertical e lateral são considerados no modelo. Estas avaliações auxiliam no ponto de vista de conforto do piloto, contribuindo com o objetivo de diminuir o impacto de acelerações e desacelerações e reduzir o efeito de irregularidades na pista ao fazer manobras, trocar de faixa, etc. Assim, neste trabalho é traçado um comparativo do efeito do tipo de algoritmo, inclusão do modelo biodinâmico na simulação (e sua quantidade de graus de liberdade) e o efeito das irregularidades de pista para a vibração da moto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo de suspensões em geral tem ganhado evidência na literatura, tendo em vista a crescente preocupação com a ergonomia dos usuários. Neste contexto, a suspensão automotiva em particular alcançou maior relevância através de modelos que podem ter desde um ou dois graus de liberdade (GDL) até alguns mais complexos, chegando a 15 graus de liberdade (Drehmer, 2017).

Os estudos científicos mais relevantes nesta área datam do final da década de 70, principalmente a partir do desenvolvimento do *Koch Index (KI)*, uma métrica utilizada para aferir conforto em motos urbanas (Koch, 1978). Em 1978, Zellner e Weir propuseram analisar o conceito de uma simples troca de faixa (*Lane Change – LC*). Esta análise se dá a partir de dados retirados do campo, com motociclistas fazendo manobras a fim do desenvolvimento de um procedimento padrão para manobrabilidade (*Handling Test Procedures*). Ainda em 1978, Rice também propôs testes de campo e apontou para a necessidade de considerar o desempenho da motocicleta como um todo, isto é, qualidade construtiva, projeto do veículo, etc. junto com a qualidade de pilotagem, e não apenas a dinâmica do veículo.

Quanto ao material bibliográfico disponível, este tema começou a ganhar destaque no campo de otimização somente anos 90, com a grande expansão dos métodos de simulação computacional. Com a divulgação da ISO-2631, 1997, que estabelece alguns critérios e orientam valores para simulações e ensaios com o foco no projeto de suspensão veicular voltada para a área de saúde, conforto e ergonomia. Esta Norma foi publicada com algumas melhorias em relação à britânica BS-6841, 1987. A Norma ISO-8608:2016 é dentre estas a que mais enfoca suas regras no perfil de pista, estabelecendo dados para pesquisas em dinâmica vertical. Desde que alguns critérios mínimos foram estabelecidos, muitos trabalhos foram desenvolvidos na área.

Baumal, McPhee e Calami, 1998, trabalharam na otimização de uma suspensão veicular de 5-GDL utilizando uma técnica global para otimização de funções chamada algoritmo genético, considerando duas variáveis: arfagem e deslocamento vertical do assento do motorista. Esta pesquisa concluiu que as perturbações oriundas da estrada contribuem muito pouco para a aceleração do assento do motorista.

Cossalter e Saudauckas, 2006, avaliaram um índice de rolagem LCI (*Lane Change Index*) em comparação com o já conhecido índice Koch. Concluíram que esta nova forma de medir caracterizava melhor a manobrabilidade das motocicletas justamente em troca de faixa, além de que quanto menor fosse este índice, menor é o torque necessário no guidão da moto para obter uma rolagem satisfatória, conferindo mais conforto ao veículo. Os autores notaram ainda que poderiam simplificar o modelo estudado de maneira mais adequada a partir da roda dianteira, sendo ela mais sensível às variações sofridas pelo conjunto.

Uma evolução desta manobra é a DLC (*Double Lane Change*, idealizada para carros), analisada por Drehmer, 2017, através de funções multiobjetivos que poderiam prever incertezas de fabricação das suspensões e de outros fatores externos, como a montagem dos componentes, irregularidades da pista e até mesmo de erro humano do motociclista em um complexo modelo de 15-GDL. Em sua pesquisa, conclui que fatores que podem contribuir para a diminuição da aceleração RMS vertical e lateral podem ser diminuídas com o uso de encostos para a cabeça e costas do motorista.

Outras partes da motocicleta também foram objeto de estudo, como os pneus, por exemplo. Pacejka, 2012, desenvolveu um modelo matemático para simulação capaz de descrever com precisão aceitável a geometria e formato dos pneus, considerando também a sua deformabilidade. Este modelo tornou-se bastante útil para outras pesquisas, pois junta propriedades elásticas do material com propriedades do meio, como o deslizamento, permitindo que esta abordagem possa descrever com bastante confiabilidade o comportamento do pneu no estado estacionário e transitório. As contribuições

desse trabalho o fazem muito presente em literaturas de dinâmica veicular como base no estudo de pneus.

Ainda no campo da simulação, foi proposto por Massaro et. al, 2016, um simulador de pilotagem de motocicleta de alta fidelidade com a intenção de permitir que o desenvolvimento de veículos seja feito com mais acuracidade. Através deste simulador, percebeu-se que o grau de liberdade da rolagem e o comportamento de contra-esterço são muito importantes para a avaliação completa da dinâmica da motocicleta, e uma conclusão bastante intuitiva de que pilotos profissionais possuem, em termos de conforto, vantagens de dirigibilidade sobre pilotos comuns, pois pilotos profissionais apresentam concentração elevada, melhorando o tempo de respostas em manobras e curvas.

A evolução desta linha de pesquisa é o desenvolvimento de um modelo biodinâmico, apresentado por Zainal et. al (2018), destacando um corpo humano que é representado por massas suspensas, molas e amortecedores, que neste caso caracterizam aspectos da anatomia humana como ossos, músculos e articulações. Contudo, o modelo proposto por Zainal et. al (2018) apresentava 8 e 12-GDL, e foi proposto com a finalidade de analisar a relação de vibração do crânio com o resto do corpo durante a realização de manobras. A sua maior conclusão foi o fato de que a relação de vibração e picos de impacto de vibração são diretamente relacionadas, sendo que o aumento da vibração pode provocar impactos perigosos no cérebro, podendo ainda gerar lesões e traumas nesta região.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A seguir, são introduzidos os conceitos teóricos relativos à construção deste trabalho. Serão apresentadas informações sobre a motocicleta como as equações da dinâmica vertical e lateral, modelo de contato do pneu, métodos de integração das equações e o modelo biodinâmico.

3.1 A motocicleta

Inventada na segunda metade do século XIX, a motocicleta surgiu com um motor a vapor, em 1869 nos Estados Unidos. Contudo, o modelo como conhecemos foi desenvolvida 16 anos depois, na Alemanha, já com motor a gasolina de apenas um cilindro. O projeto foi se aperfeiçoando até chegar naquilo que conhecemos hoje, composta de partes essenciais como motor, chassi, guidão, suspensões, rodas, tanque, bateria, etc.

Todas as suas partes devem ser cuidadosamente projetadas, pois possuem funções estruturais complexas, como o chassi, por exemplo, que deve absorver as forças que tracionam as rodas. O desenho dessa estrutura pode variar conforme o tamanho, peso ou a finalidade da motocicleta. As suspensões são outro elemento importante que influenciam diretamente na dinâmica do veículo, melhorando o conforto dos motociclistas ao aumentar o contato das rodas com o chão, tornando mais seguro a dirigibilidade em curvas, aclives, declives, frenagens, etc. Composto de braço de suspensão, mola e amortecedor, o conjunto serve para suportar cargas deformando o mínimo possível, absorvendo e dissipando parte da força de compressão da mola.

3.2 Equações para a dinâmica vertical da motocicleta e do piloto

O modelo adaptado de Zou et al. (2009) pode ser visto na Figura 1(a) a partir de um desenho esquemático, onde pode-se notar as variáveis que avaliam o deslocamento vertical da carroceria (z_c), o deslocamento vertical da suspensão traseira e dianteira (z_{ur} e z_{uf}), o deslocamento vertical do assento (z_a) e o deslocamento angular de arfagem, dado em radianos (θ). As demais variáveis estão descritas na Tabela 1, e este modelo simplificado da moto no plano pode ser visualizado como na Figura 1 (a). Maiores detalhes das equações de movimento para cada grau de liberdade serão omitidos neste trabalho. As respectivas equações e matrizes finais do modelo de moto podem ser encontradas no trabalho de Gräbin (2022) e Tomasi (2019).

O modelo biodinâmico utilizado foi o mesmo idealizado por Zainal et al. (2018). É um modelo dinâmico que originalmente foi pensado com 4, 5, 7, 10 e 11-GDL, mas neste trabalho serão avaliados os modelos com 8-GDL e 12-GDL onde os valores utilizados nestes dois esquemas estão dispostos na Tabela 2. Estes 8 graus de liberdade do piloto são pélvis (z_1), abdômen (z_2), diafragma (z_3), tórax (z_4), torso (z_5), costas (z_6), crânio (z_7) e cérebro (z_8), representados na Figura 1(b). Já o modelo de 12-GDL possui estes mesmos graus de liberdade, com a exceção das costas, porém com o acréscimo de variáveis como pescoço, antebraço, braço superior, coluna torácica e espinha lombar (Figura A.3 do Apêndice). Este modelo de 12-GDL tem equações diferentes do modelo de 8-GDL (Tomasi, 2019). A massa total de referência do piloto foi a do modelo de 12-GDL. A diferença de massa para o de 8-GDL foi acrescentada igualmente para que os modelos tenham a mesma massa total.

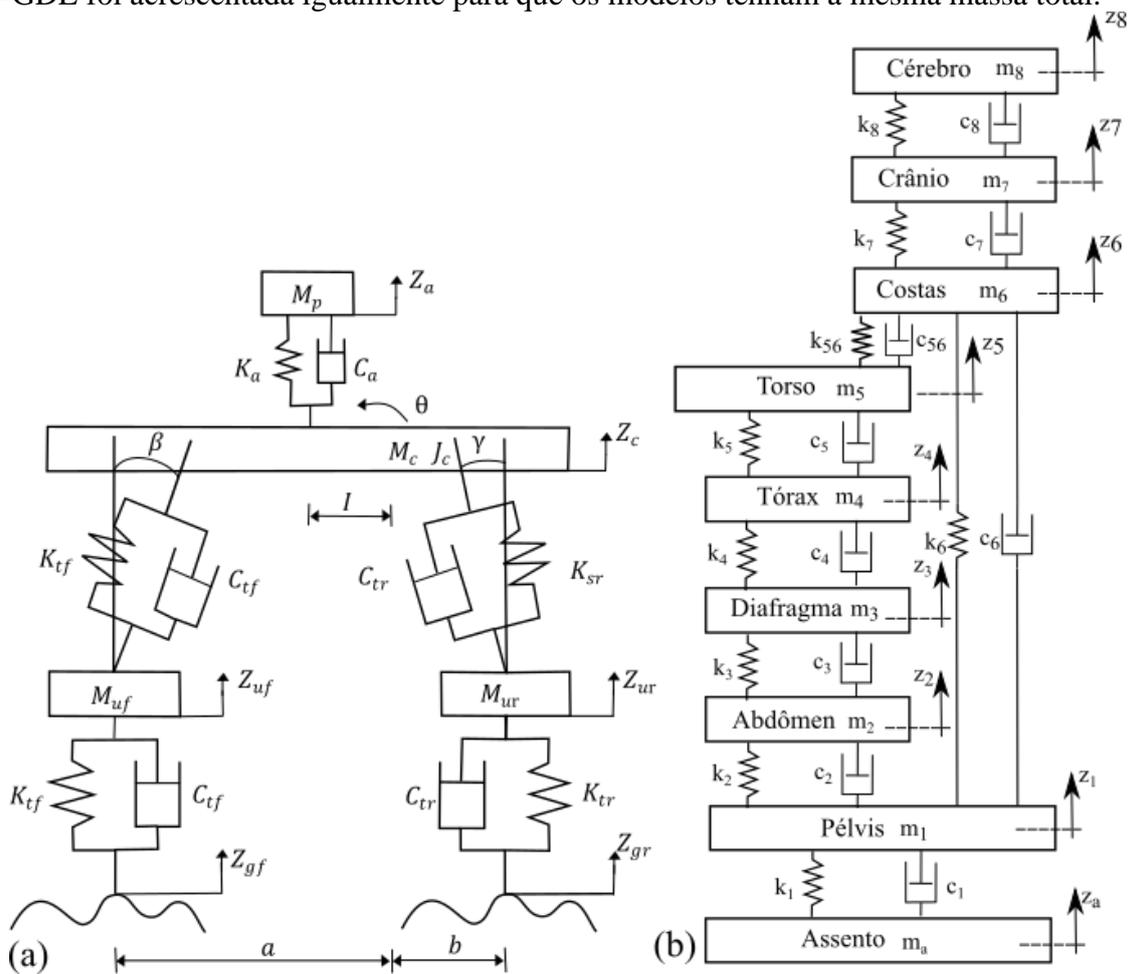


Figura 1 – (a) Esquema representativo de uma motocicleta com 5-GDL. (Zou et al., 2009, adaptado). (b) Esquema vibracional do piloto sentado com 8-GDL (Zainal et al., 2018, adaptado).

O artigo original de Zou et al. (2009) apresenta as equações diferenciais que regem a dinâmica vertical da motocicleta em forma matricial, bem como as demais matrizes auxiliares que contribuem para esta análise. Contudo, a equação completa em função do tempo pode ser vista na Equação (1), com $[M]$, $[C]$ e $[K]$ representando as matrizes de massa, amortecimento e rigidez, respectivamente, vistas nas Equações (2), (3) e (4), e \vec{f} é o somatório de forças externas excitadoras em função do tempo e \vec{z} , $\dot{\vec{z}}$ e $\ddot{\vec{z}}$ são os vetores que representam o deslocamento, velocidade e aceleração dos 8-GDL.

$$[M]\ddot{\vec{z}} + [C]\dot{\vec{z}} + [K]\vec{z} = \vec{f}(t) \quad (1)$$

$$[\mathbf{M}] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_8 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[\mathbf{K}] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 + k_6 & -k_2 & 0 & 0 & 0 & -k_6 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & -k_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_4 & k_4 + k_5 & -k_5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_5 & k_5 + k_{56} & -k_{56} & 0 & 0 \\ -k_6 & 0 & 0 & 0 & -k_{56} & k_{56} + k_6 + k_7 & -k_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_7 & k_7 + k_8 & -k_8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_8 & k_8 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[\mathbf{C}] = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 + c_6 & -c_2 & 0 & 0 & 0 & -c_6 & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_3 & c_3 + c_4 & -c_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_4 & c_4 + c_5 & -c_5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -c_5 & c_5 + c_{56} & -c_{56} & 0 & 0 \\ -c_6 & 0 & 0 & 0 & -c_{56} & c_{56} + c_6 + c_7 & -c_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_7 & c_7 + c_8 & -c_8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_8 & c_8 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Tabela 1. Descrição dos parâmetros da motocicleta.

Símbolo	Significado	Valores	Unidades
K_{tf}	Rigidez do pneu dianteiro	180000	N/m
K_{tr}	Rigidez do pneu traseiro	180000	N/m
C_{tf}	Amortecimento do pneu dianteiro	250	Ns/m
C_{tr}	Amortecimento do pneu traseiro	250	Ns/m
M_{uf}	Massa da suspensão dianteira	15	Kg
M_{ur}	Massa da suspensão traseira	20	Kg
K_{sf}	Rigidez da suspensão dianteira	14000	N/m
K_{sr}	Rigidez da suspensão traseira	30000	N/m
C_{sf}	Amortecimento da suspensão dianteira	2000	Ns/m
C_{sr}	Amortecimento da suspensão traseira	2200	Ns/m
M_{sf}	Massa da suspensão dianteira	15	Kg
M_{sr}	Massa da suspensão traseira	20	Kg
M_c	Massa do corpo da moto	170,7	Kg
K_a	Rigidez do assento	50000	N/m
C_a	Amortecimento do assento	500	Ns/m
M_p	Massa do piloto	91,3	Kg
l	Distância do piloto para o CG	0	m
h^*	Altura entre o CG e o centro de rolagem	0,3	m
a^* e b^*	Distâncias dos eixos dianteiro e traseiro para o CG	0,70; 0,823	m

*Estes valores constituem valores médios usuais, mas não representam nenhuma moto em específico.

Tabela 2. Parâmetros dos modelos biodinâmicos adotados (*apud* Zainal et al., 2018).

Modelo	Massa (kg)	Amortecimentos (Ns/m)		Rigidezes (N/m)	
8-GDL	$m_1 = 27,230$ $m_2 = 5,291$	$C_1 = 371,0$	$C_2 = 292,0$	$k_1 = 25\ 500,0$	$k_2 = 877,0$
	$m_3 = 0,455$ $m_4 = 1,362$	$C_3 = 292,0$	$C_4 = 292,0$	$k_3 = 877,0$	$k_4 = 877,0$
	$m_5 = 32,762$ $m_6 = 6,820$	$C_5 = 292,0$	$C_6 = 3\ 580,0$	$k_5 = 877,0$	$k_6 = 52\ 600,0$
	$m_7 = 3,500$ $m_8 = 1,500$	$C_7 = 450,0$	$C_8 = 340,0$	$k_7 = 800\ 000,0$	$k_8 = 156\ 000,0$
		$C_{56} = 3\ 580,0$		$k_{56} = 52\ 600,0$	
12-GDL	$m_1 = 27,230$ $m_2 = 5,906$	$C_1 = 370,8$	$C_2 = 292,3$	$k_1 = 25\ 016,0$	$k_2 = 877,0$
	$m_3 = 0,454$ $m_4 = 1,362$	$C_3 = 292,3$	$C_4 = 292,3$	$k_3 = 877,0$	$k_4 = 877,0$
	$m_5 = 32,697$ $m_6 = 5,470$	$C_{54} = 292,3$	$C_{59} = 3\ 581,6$	$k_5 = 877,0$	$k_{59} = 52\ 621,0$
	$m_7 = 5,297$ $m_8 = 2,002$	$C_6 = 3\ 581,6$	$C_7 = 3\ 581,6$	$k_6 = 67\ 542,0$	$k_7 = 67\ 542,0$
	$m_9 = 4,806$ $m_{10} = 1,084$	$C_8 = 3\ 581,6$	$C_9 = 3\ 581,6$	$k_8 = 52\ 621,0$	$k_9 = 52\ 621,0$
	$m_{11} = 3,500$ $m_{12} = 1,500$	$C_{10} = 3\ 581,6$	$C_{11} = 450,0$	$k_{10} = 52\ 621,0$	$k_{11} = 1\ 800\ 000,0$
		$C_{12} = 340,0$		$k_{12} = 156\ 000,0$	

3.3 Integração numérica pelo método Newmark Tradicional e Quadrático

O método de Newmark consiste em uma forma numérico no domínio do tempo, permitindo fazer aproximações com séries de Taylor das equações diferenciais de um sistema dinâmico. Diferentemente do método de Newmark tradicional, onde temos uma aproximação de 1ª. ordem para a resolução de equações diferenciais de movimento como deslocamento, velocidade e acelerações, por exemplo, o Newmark quadrático aproxima de forma quadrática a resolução das equações diferenciais.

Adaptando as equações de Rao (2009), chega-se nas Equações (5), (6) e (7), que representam o deslocamento, aceleração e velocidade, respectivamente, para o método de Newmark tradicional. Estas são as chamadas equações de recorrência que caracterizam Newmark. Elas ainda precisam respeitar os dois parâmetros (α e β) que garantem que o método seja incondicionalmente estável, bem como características de precisão, onde $\alpha \geq 0,25 (\beta + 0,5)^2$ e $\beta \geq 0,5$. Na literatura, encontra-se valores de referência de 0,25 para α e 0,5 para β a fim de garantir a sua forma incondicionalmente estável (Newmark, 1959).

$$\{z\}_{i+1} = \left[\frac{1}{\alpha(\Delta t)^2} [M] + \frac{\beta}{\alpha \Delta t} [C] + [K] \right]^{-1} \times \left\{ \vec{F}_{i+1} + [M] \left(\frac{1}{\alpha(\Delta t)^2} \{z\}_i + \frac{1}{\alpha \Delta t} \{\dot{z}\}_i + \left(\frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \{\ddot{z}\}_i \right) + [C] \left(\frac{\beta}{\alpha \Delta t} \{z\}_i + \left(\frac{\beta}{\alpha} - 1 \right) \{\dot{z}\}_i + \left(\frac{\beta}{\alpha} - 2 \right) \frac{\Delta t}{2} \{\ddot{z}\}_i \right) \right\} \quad (5)$$

$$\{\ddot{z}\}_{i+1} = \frac{1}{\alpha(\Delta t)^2} (\{z\}_{i+1} - \{z\}_i) - \frac{1}{\alpha \Delta t} \{\dot{z}\}_i - \left(\frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \{\ddot{z}\}_i \quad (6)$$

$$\{\dot{z}\}_{i+1} = \{\dot{z}\}_i + [(1 - \beta)\{\ddot{z}\}_i + \beta\{\ddot{z}\}_{i+1}]\Delta t \quad (7)$$

O método de Newmark quadrático se estabelece a partir da variação não-linear das acelerações entre os intervalos de integração determinados. Desta forma, e por ser também um método de integração numérica implícita, eles possuem bastante similaridades, contudo, o método quadrático leva vantagem por conta da sua maior acuracidade quando comparados em um mesmo intervalo de tempo de integração. Isso é explicado pelo aumento de termos da série de Taylor utilizados neste método, possibilitando aumentar a ordem de aceleração (Gholampour, 2013). Ao truncar a aproximação de Taylor até a quarta ordem e fazendo os desenvolvimentos e substituições que podem ser vistas no artigo original supracitado, temos as Equação (8) e (9), que são as equações finais de recorrência do método de Newmark quadrático.

$$\{z\}_{i+1} = \{z\}_i + \Delta t \{\dot{z}\}_i + \left[\left(\alpha - \frac{1}{12} \right) \{\ddot{z}\}_{i-1} + \left(\frac{1}{2} - 2\alpha \right) \{\ddot{z}\}_i + \left(\alpha + \frac{1}{12} \right) \{\ddot{z}\}_{i+1} \right] \Delta t^2 \quad (8)$$

$$\{\dot{z}\}_{i+1} = \{\dot{z}\}_i + \left[\left(\delta - \frac{1}{4} \right) \{\ddot{z}\}_{i-1} + (1 - 2\delta) \{\ddot{z}\}_i + (\delta + 1/4) \{\ddot{z}\}_{i+1} \right] \Delta t \quad (9)$$

3.4 Equações de movimento para a dinâmica lateral da motocicleta

O modelo segundo Drehmer (2017) apresenta 3-GDL, contudo será incluído mais um grau de liberdade neste trabalho. Esta dinâmica, diferentemente da vertical, representa os esforços nos eixos x e y da motocicleta, oriundas dos efeitos exercidos pelos pneus e suas reações quando decompostas. Os GDL originais são o deslocamento longitudinal do corpo da moto (x_b), o deslocamento lateral do corpo da moto (y_b) e o deslocamento angular de guinada, dado em radianos (ψ) e o último GDL incluído neste trabalho será o deslocamento angular de rolagem, também em radianos (φ).

Ainda de acordo com o que pode ser observado na tese original (Drehmer, 2017), bem como o desenvolvimento dessas equações e os seus significados, a Equação (10), descreve o movimento na direção longitudinal, a Equação (11) descreve o movimento lateral, a Equação (12) detalha a dinâmica da guinada da carroceria da motocicleta, e por último a Equação (13) que representa a dinâmica de rolagem da carroceria do veículo. A Figura A2 nos Apêndices representa este modelo.

$$m_t \ddot{x}_b = F_{x1} + F_{x2} + m_b h \varphi \ddot{\psi} + m_t y_b \dot{\psi} - m_b h \dot{\varphi} \dot{\psi} - f_r m_t g - \frac{1}{2} C_D A_f \rho x_b^2 \quad (10)$$

$$m_t \ddot{y}_b = F_{y1} + F_{y2} - m_t \dot{x}_b \dot{\psi} - m_b h \ddot{\varphi} \quad (11)$$

$$I_z \ddot{\psi} = a(F_{y1}) - b(F_{y2}) + m_b h \varphi \ddot{x}_b - m_b h \dot{x}_b \dot{\varphi} + I_{xz} \ddot{\varphi} \quad (12)$$

$$I_x \ddot{\varphi} = m_t \ddot{z}_b - m_t g h \quad (13)$$

3.5 Equações de Pacejka para forças nos pneus de motocicletas

O modelamento dos pneus foi retirado do trabalho de Pacejka (2012). Conforme o próprio autor cita, é uma das partes mais complexas de equacionar, tendo em vista que se deve considerar variáveis como sustentação, amortecimento, deformação, atrito, forças longitudinais e laterais. O desenvolvimento completo das equações e da modelagem pode ser visto no artigo supracitado. As equações mais relevantes para este trabalho são a Equação (14) que possibilita modelar a força longitudinal (em x) e a Equação (15) para a força lateral (em y), para pneus dianteiros e traseiros onde $i = 1, 2$.

$$F_{l,xi} = F_{zi} D_i \sin \{ C_i t g^{-1} [B_i \kappa_i - E_i (B_i \kappa_i - t g^{-1} (B_i \kappa_i))] \} \quad (14)$$

$$F_{l,yi} = F_{zi} D_i \sin \{ C_i t g^{-1} [B_i \alpha_i - E_i (B_i \alpha_i - t g^{-1} (B_i \alpha_i))] \} \quad (15)$$

Os demais coeficientes tais como B_i , C_i , D_i e E_i possuem valores distintos e dependem de condições definidas no artigo original e especificamente para pneus de moto. As equações para a força longitudinal e a lateral são bastante similares, diferindo essencialmente pelos coeficientes κ_i e α_i , representando respectivamente o escorregamento dos pneus presente somente no sentido longitudinal e o ângulo de deslizamento formado entre o plano do pneu e a direção do movimento. Ela inclui as dimensões, as propriedades geométricas e as características de superfície para pistas de ensaio, incluindo curvas, retas, rampas e superfícies de frenagem. Seguir as recomendações da Norma ISO 8608:2016 é importante, porque ajuda a garantir que os testes de segurança de veículos sejam realizados de maneira consistente e confiável em diferentes locais. Ela também garante que os resultados dos testes sejam comparáveis entre diferentes veículos e diferentes fabricantes. A ISO 8608:2016 é amplamente utilizada pelos fabricantes de veículos, reguladores e órgãos de segurança rodoviária para avaliar a segurança dos veículos e identificar possíveis melhorias. Em resumo, a ISO 8608:2016 é uma Norma que estabelece os requisitos para pistas padronizadas utilizadas em testes de segurança de veículos, a fim de garantir a consistência e confiabilidade dos testes e melhorar a segurança dos usuários.

4 METODOLOGIA

Neste trabalho é feita a comparação entre as situações em que a moto trafega ora com pista com irregularidade vertical (ISO 8608, 2016), ora sem qualquer perturbação vertical, ou seja, com a pista lisa. Também é comparado qual o efeito de utilizar-se dois modelos biodinâmicos diferentes em número de graus de liberdade (8 ou 12-GDL), mas com a mesma massa. Ainda sobre o biodinâmico, é comparado qual o efeito de tornar o biodinâmico ativo (os graus de liberdade do biodinâmico podem se mover livremente) com um modelo biodinâmico desativado (os graus de liberdade do biodinâmico são travados entre si, impedindo o movimento relativo entre eles), simulando a condição de se ter apenas uma massa representando o piloto. Referente ao algoritmo de integração numérica, é comparada a precisão do algoritmo de Newmark tradicional com o algoritmo de integração de Newmark quadrático. É feita a análise de todas as possíveis combinações de testes, o que resulta em 16 análises comparativas.

Nas comparações, devido ao fato de terem-se muitas variáveis ao longo do tempo, são escolhidas apenas algumas para comparação e o seu valor *RMS* (*Root Mean Square*), aquelas que mais influenciam na dinâmica da moto, assim como no conforto do piloto. São elas: a aceleração longitudinal $RMS(a_x)$ e lateral $RMS(a_y)$ do corpo da moto, guinada $RMS(\dot{\psi})$, rolagem $RMS(\dot{\phi})$, aceleração vertical na carroceria $RMS(a_c)$, aceleração vertical na suspensão dianteira $RMS(a_{uf})$, aceleração vertical na suspensão traseira $RMS(a_{ur})$, arfagem $RMS(\ddot{\theta})$, aceleração do assento (a_a), aceleração da pélvis (a_1), aceleração da coluna lombar (a_6), aceleração do cérebro (a_8). Ao final, para algumas das combinações avaliadas, será classificada a vibração sentida pelo piloto dentro dos limites especificados como adequados pela ISO 2631 (1997).

4.1 Padrão de irregularidade vertical de pistas estabelecido ISO 8608 (2016)

A ISO 8608 é uma Norma internacional que especifica os requisitos para as pistas padronizadas utilizadas em testes de segurança de veículos e serve para classificação de pistas existentes. Ela inclui as dimensões, as propriedades geométricas e as características de superfície para pistas apenas quanto à irregularidade vertical. A Norma é importante porque ajuda a garantir que os testes de segurança de veículos sejam realizados de maneira consistente e confiável para diferentes irregularidades de pista possíveis de serem trafegadas por um veículo. A Norma classifica as pistas com letras que vão de A a H, para irregularidades crescentes (neste trabalho foi escolhido a classe A, mais lisa entre todas). O gráfico do Figura A.1, no Anexo, mostra estes tipos de pista e as respectivas densidades espectrais de potência do deslocamento (G_d) em função da frequência espacial (n). Para a geração de um perfil de irregularidade procede-se como indicado em Shinozuka e Jan (1972), lembrando-se de levar em conta a velocidade do veículo.

4.2 Trajeto de troca simples de faixa segundo a ISO 3888-2 (2011)

Para avaliar de forma mais adequada e realista o comportamento dinâmico da moto em condições de manobra, neste trabalho vai-se utilizar a recomendação de trajeto percorrido pelo veículo para evitar um obstáculo e que representa uma manobra de troca de faixa simples severa. A Norma ISO 3888-2 (2011) é específica para carros e para testes em campo, entretanto, na falta de Norma específica para motocicletas, optou-se por este utilizar este teste com esta manobra como forma de padronizar as comparações nas situações que serão analisadas. Maiores detalhes para a manobra podem ser obtidos na referida Norma. A manobra será realizada a partir da definição dos ângulos de esterçamento do guidão dianteiro da moto com 2° em formato triangular, de forma que a moto saia da sua faixa e vá até a outra faixa, permanecendo lá. A Figura 2 indica a maneira que este esterçamento é aplicado no guidão (δ_1) e na traseira (δ_2) para que a moto execute esta troca de faixa.

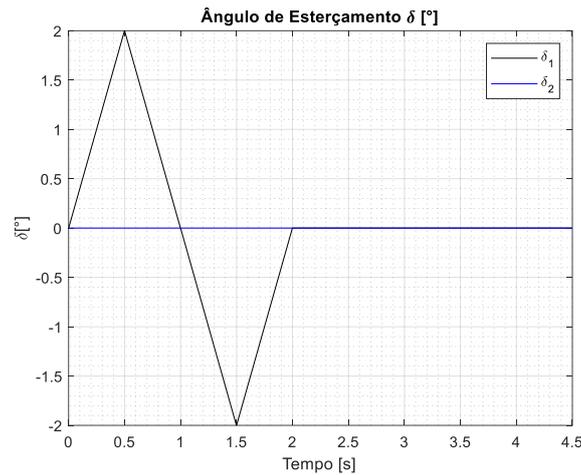


Figura 2 – Esterçamento no guidão da moto para realizar a troca simples de faixa.

4.3 Definição de conforto pela Norma ISO 2631-1 (1997)

A Norma ISO 2631-1 traz algumas definições importantes acerca do conforto para o ser humano quando ele é submetido a vibrações e acelerações no corpo inteiro. Desta forma, se estabelecem padrões aceitáveis para este trabalho que dependem da intensidade e frequência com que o movimento oscila. Embora haja um consenso que o termo conforto seja subjetivo e varie de pessoa para pessoa, pode-se definir alguns valores admissíveis que se sobrepõem, de acordo com o item C.2.2 da referida Norma (Tabela 3).

Tabela 3. Padrões de conforto de acordo com a ISO 2631-1 (1997).

Faixa de amplitudes [m/s ²]	Índice de conforto
abaixo de 0,315	Não desconfortável
entre 0,315 e 0,63	Um pouco desconfortável
entre 0,5 e 1,0	Levemente desconfortável
entre 0,8 e 1,6	Desconfortável
entre 1,25 e 2,5	Muito desconfortável
acima de 2,0	Extremamente desconfortável

5 RESULTADOS

A seguir, os resultados pertinentes são apresentados e discutidos. Os testes paramétricos trocando-se as possibilidades de algoritmo de solução, número de graus de liberdade do modelo biodinâmico, irregularidade da pista, etc. são comparados entre si.

5.1 Análise para motocicleta com pista irregular, biodinâmicos de 12-GDL, algoritmo quadrático, biodinâmico flexível

Neste exemplo, o modelo numérico desenvolvido foi avaliado para as condições iniciais de motocicleta com pista irregular, biodinâmicos de 12-GDL, algoritmo quadrático, biodinâmico flexível e velocidade 80 km/h executando uma manobra de troca de faixa segundo a ISO 3888-2 (2011).

Conforme pode-se notar na Figura 3(a), o deslocamento do cérebro possui uma amplitude média de cerca de 0,6 mm durante todo o trajeto percorrido. Este valor é maior que o deslocamento medido da mesma forma para o assento, visto na Figura 3(b). Isto já era esperado, pois o assento da moto possui uma estrutura que o mantém estável, ao contrário do piloto que está livre em cima do corpo da moto. O trecho da pista em que a manobra ocorre, contido no intervalo de 0 a 2s apresenta

um deslocamento vertical menor. As velocidades no cérebro, contudo, apresentam valores muito baixos, sendo a média da amplitude aproximadamente 0,01 m/s aumentando levemente quando se aproxima do final do trajeto, onde são encontrados os maiores solavancos. Este mesmo parâmetro quando visto no assento oscila muito mais no mesmo intervalo de tempo. Esta mesma oscilação é vista na aceleração do assento. Uma possível explicação para isso é que o assento está mais próximo da fonte de vibração, desta forma dissipando menos energia cinética, diferentemente do que ocorre no GDL do cérebro. As acelerações medidas no assento também são classificadas como “não desconfortável”, por estar abaixo de $0,315 \text{ m/s}^2$ de acordo com a ISO 2631-1. As Figuras 3(c) e 3(d) representam os movimentos de rolagem e a guinada, respectivamente.

Nas Figuras 4(a) e 4(b) conseguimos visualizar o trajeto da moto nas direções lateral e longitudinal, indicando que a moto conseguiu realizar a troca simples de faixa. Nas Figuras 4(c) e 4(d) mostram um resultado interessante e esperado, onde as forças de reação do solo, e as aplicadas pelo pneu no solo são, de fato, iguais, validando estes valores por duas formas diferentes de avaliar. Também se percebe que os valores das forças de reação oscilam, devido às irregularidades, em torno dos valores médios para cada pneu (dianteiro e traseiro), como indicado na Figura 4(c), somando 3058 N (massa total da moto e piloto de 312 kg).

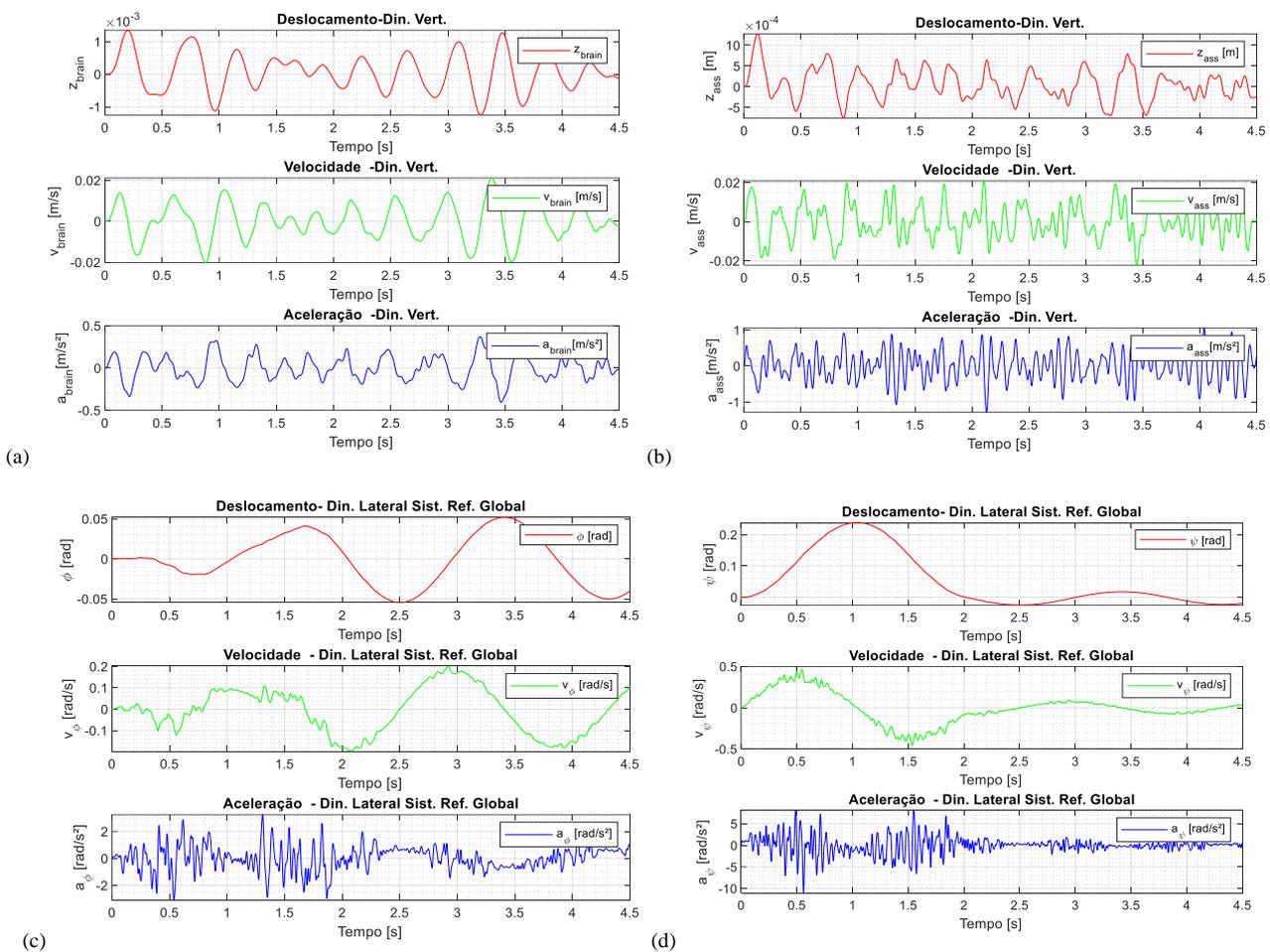


Figura 3 – (a) Deslocamento, velocidade e aceleração do cérebro; (b) Deslocamento, velocidade e aceleração do assento; (c) Deslocamento, velocidade e aceleração de rolagem e (d) Deslocamento, velocidade e aceleração de guinada;

5.2 Avaliação da influência do tipo de pista nas acelerações

A Tabela 4 apresenta os resultados de um teste feito com a motocicleta a 80km/h executando uma manobra de troca de faixa segundo a ISO 3888-2, com o método de Newmark quadrático, 12-GDL, modelo biodinâmico flexível e a única variável alterada foi a pista, que ficou ora irregular, ora lisa. Como esperado, a diferença é bastante significativa entre as acelerações aferidas, pois a pista rugosa causa maiores deslocamentos, provocando oscilação e um conseqüente aumento das acelerações, tendo em vista que o perfil da pista é bastante irregular, incluindo solavancos no trajeto. A pista lisa, na prática, não apresenta resistências para o motorista, sendo as acelerações sentidas pelo piloto aproximadamente zero. As únicas acelerações que permaneceram praticamente inalteradas entre as comparações foram as envolvidas na carroceria da motocicleta, onde a diferença não ultrapassou 1%. Essa semelhança também era esperada em virtude da eficiência da suspensão aplicada.

As acelerações que envolvem o assento na pista lisa são baixíssimas, quase não há impacto para o piloto e a sua classificação de acordo com a ISO 2631-1 é “não desconfortável”. Contudo, a aceleração do assento na pista rugosa é classificada como “um pouco desconfortável”, por estar na faixa de 0,315 a 0,63 m/s^2 .

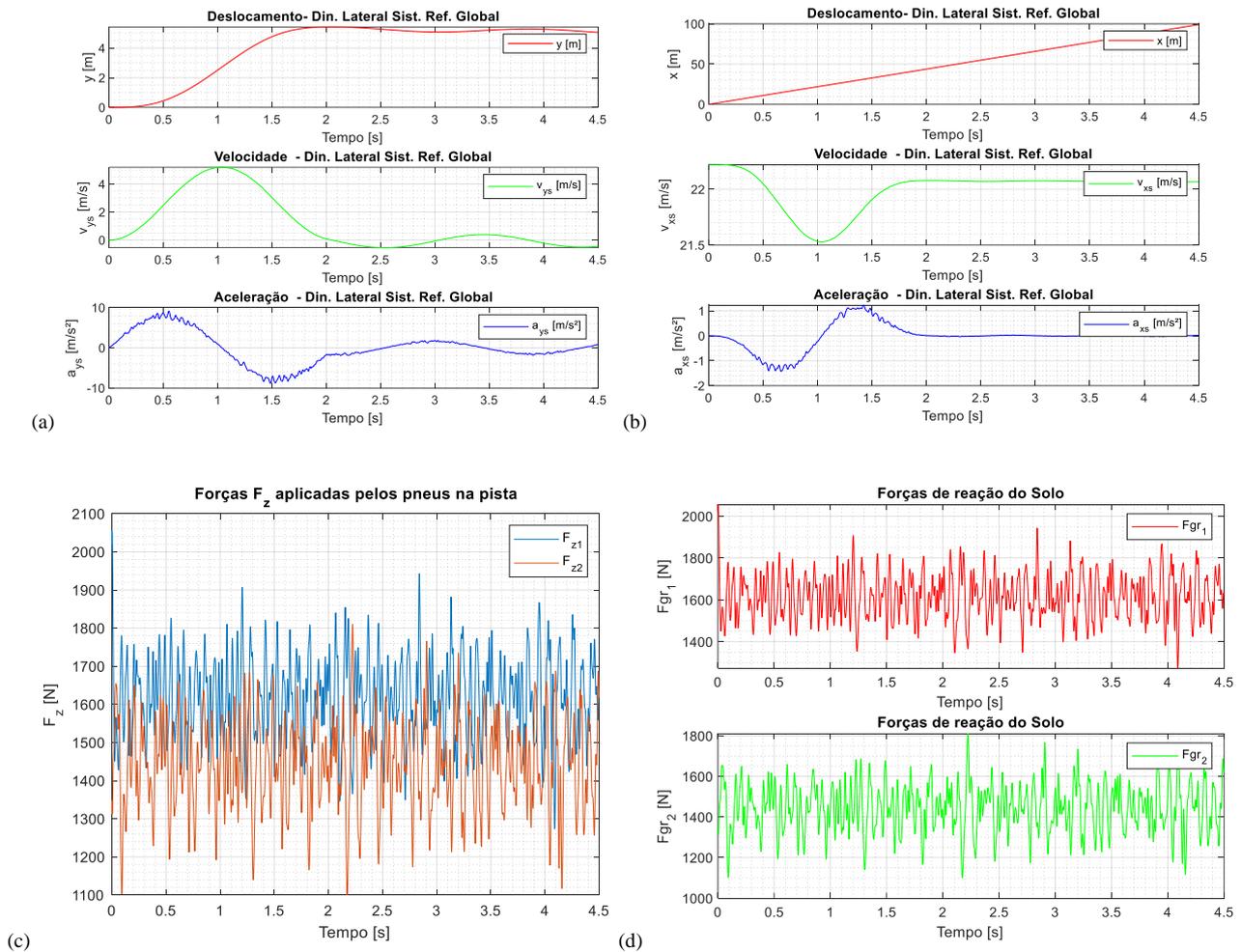


Figura 4 – (a) Deslocamento, velocidade e aceleração lateral; (b) Deslocamento, velocidade e aceleração lateral; (c) Força de reação dos pneus na pista e (d) Força de reação do solo nos pneus dianteiro e traseiro.

Tabela 4. Influência do tipo de pista nas acelerações RMS para 12-GDL específicos.

Variável	Significado	Unidade	Pista Irregular	Pista lisa
a_x	Aceleração longitudinal da carroceria	m/s ²	0,508	0,504
a_y	Aceleração lateral da carroceria	m/s ²	3,885	3,858
$\ddot{\psi}$	Aceleração de guinada	rad/s ²	1,923	0,535
$\ddot{\phi}$	Aceleração de rolagem	rad/s ²	0,879	0,389
$\ddot{\theta}$	Aceleração de arfagem	rad/s ²	2,482	0,001
a_c	Aceleração da carroceria	m/s ²	0,584	0,002
a_{uf}	Aceleração da suspensão dianteira	m/s ²	4,041	0,000
a_{ur}	Aceleração da suspensão traseira	m/s ²	3,464	0,000
a_a	Aceleração do assento	m/s ²	0,407	0,003
a_1	Aceleração da pélvis	m/s ²	0,146	0,004
a_6	Aceleração da coluna lombar	m/s ²	0,140	0,004
a_8	Aceleração do cérebro	m/s ²	0,150	0,004

5.3 A influência do modelo biodinâmico

Este teste segue a linha de raciocínio descrita anteriormente, com a motocicleta fazendo o trajeto estabelecido pela ISO 3888-2 numa velocidade de 80km/h, com o algoritmo quadrático, pista irregular e a variável testada foi o modelo biodinâmico, que mudava entre flexível e rígido. O modelo rígido foi obtido multiplicando-se as rigidezes por um fator elevado (1×10^6). A Tabela 5 apresenta os resultados. Estes valores nos dizem que o modelo biodinâmico proposto tem pouca influência no resultado final, não justificando sua implementação quando o objeto de análise é a moto.

A diferença fica mais acentuada nos graus de liberdade que dependem exclusivamente do piloto, e são as 4 últimas variáveis exibidas na mesma tabela. Isto era esperado, pois o piloto rígido representa um único bloco de massa sobre a moto, desta forma por não ter a capacidade de dissipar vibrações, gera acelerações mais elevadas que o modelo flexível. Neste caso, nota-se que o piloto flexível tem muito mais acuracidade. Os GDLs que dependem da moto tiveram leve diferença percebida, o que também era algo esperado em virtude de o modelo rígido ter a mesma massa do modelo flexível.

A aceleração que envolve o assento no piloto rígido é baixa, o impacto para o motorista é mínimo e a sua classificação de acordo com a ISO 2631-1 é “não desconfortável”. A única que não segue este padrão e é classificada como “um pouco desconfortável” é a do assento para o piloto flexível.

Tabela 5. Influência da flexibilidade do modelo biodinâmico de 12-GDL em algumas acelerações RMS da moto e do biodinâmico.

Variável	Significado	Unidade	Piloto flexível	Piloto rígido	Diferença (%)
a_x	Aceleração longitudinal da carroceria	m/s ²	0,508	0,507	0,197
a_y	Aceleração lateral da carroceria	m/s ²	3,885	3,881	0,103
$\ddot{\psi}$	Aceleração de guinada	rad/s ²	1,923	1,918	0,260
$\ddot{\phi}$	Aceleração de rolagem	rad/s ²	0,879	0,868	1,251
$\ddot{\theta}$	Aceleração de arfagem	rad/s ²	2,482	2,482	0,000
a_c	Aceleração da carroceria	m/s ²	0,584	0,587	-0,514
a_{uf}	Aceleração da suspensão dianteira	m/s ²	4,041	4,045	-0,099
a_{ur}	Aceleração da suspensão traseira	m/s ²	3,464	3,458	0,173
a_a	Aceleração do assento	m/s ²	0,407	0,285	29,975
a_1	Aceleração da pélvis	m/s ²	0,146	0,285	-95,205
a_6	Aceleração da coluna lombar	m/s ²	0,140	0,285	-103,571
a_8	Aceleração do cérebro	m/s ²	0,150	0,285	-90,000

5.4 A importância de utilizar 8 ou 12-GDL

Este teste é bastante similar ao anterior, onde a motocicleta que estava a uma velocidade de 80 km/h, realizou uma manobra de troca de faixa em conformidade com a ISO 3888-2, com o algoritmo quadrático, pista irregular e a variável teste desta vez foi a quantidade de graus de liberdade do piloto, que mudava entre 8 e 12-GDL. A Tabela 6 apresenta os resultados. Os dados indicam também que os 4 graus de liberdade incluídos no modelo de 12-GDL não fazem diferença no trabalho proposto. A diferença é perto de zero. Isto é, todo o custo computacional gerado em função deste acréscimo, não gerou um resultado que justificasse tal esforço.

Os únicos valores que apresentaram maior discrepância foram na pélvis e o cérebro. Estas variáveis possuem singularidades, tendo em vista como foram montados os modelos para que eles fossem devidamente comparáveis. Para eles terem o mesmo peso total, a distribuição de massa entre os graus omitidos no modelo de 8-GDL foi feita de forma a deixar o modelo mais parecido com a realidade. Desta forma, a diferença de cerca de 5 e 9% de diferença entre as acelerações aferidas pela pélvis e o cérebro, respectivamente, não é uma surpresa. Ambos os modelos biodinâmicos testados possuem aceleração do assento em linha, que tanto para 8 e 12-GDL estão na faixa de “um pouco desconfortável”.

Tabela 6. Influência da quantidade de GDL do modelo biodinâmico em algumas acelerações RMS da moto e do biodinâmico.

Variável	Significado	Unidade	8GDL	12GDL	Diferença (%)
a_x	Aceleração longitudinal da carroceria	m/s ²	0,508	0,508	0,000
a_y	Aceleração lateral da carroceria	m/s ²	3,886	3,885	0,026
$\dot{\psi}$	Aceleração de guinada	rad/s ²	1,923	1,923	0,000
$\ddot{\phi}$	Aceleração de rolagem	rad/s ²	0,879	0,879	0,000
$\ddot{\theta}$	Aceleração de arfagem	rad/s ²	2,482	2,482	0,000
a_c	Aceleração da carroceria	m/s ²	0,584	0,584	0,000
a_{uf}	Aceleração da suspensão dianteira	m/s ²	4,041	4,041	0,000
a_{ur}	Aceleração da suspensão traseira	m/s ²	3,463	3,464	-0,029
a_a	Aceleração do assento	m/s ²	0,408	0,407	0,245
a_1	Aceleração da pélvis	m/s ²	0,154	0,146	5,195
a_6	Aceleração da coluna lombar	m/s ²	-	0,140	-
a_8	Aceleração do cérebro	m/s ²	0,165	0,150	9,091

5.5 Comparações para algoritmo de Newmark simples e quadrático

A Tabela 7 resume os testes realizados com a mudança do tipo de algoritmo. Assim como os anteriores, este teste também é feito com a motocicleta a 80km/h executando uma manobra de troca de faixa segundo a ISO 3888-2, 12-GDL, pista irregular e a variável teste desta vez foi o método de integração. O método escolhido foi o de Newmark, que variou entre Newmark tradicional (linear) ou Newmark quadrático.

Este experimento apresentou um resultado similar ao anterior, ou seja, uma diferença praticamente nula. Nenhum dos testes executados apresentou uma diferença absoluta sequer de 1%. Em virtude da acuracidade do método quadrático, espera-se que os resultados gerados por este teste sejam mais fidedignos. Partido desta premissa, percebe-se que o esforço empregado no equacionamento dos fenômenos físicos não justificaria sua utilização. Entretanto, deve-se ter em mente que a utilização do método de Newmark quadrático será vantajoso sim, visto que para mesma exatidão no método de Newmark linear, será possível aumentar o intervalo de tempo Δt reduzindo o tempo e custo computacional necessário para resolver o sistema de equações no tempo.

Tabela 7. Influência do algoritmo de integração em algumas acelerações RMS da moto e do biodinâmico.

Variável	Significado	Unidade	Tradicional	Quadrático	Diferença (%)
a_x	Aceleração longitudinal da carroceria	m/s ²	0,507	0,508	-0,197
a_y	Aceleração lateral da carroceria	m/s ²	3,880	3,885	-0,129
$\ddot{\psi}$	Aceleração de guinada	rad/s ²	1,919	1,923	-0,208
$\ddot{\phi}$	Aceleração de rolagem	rad/s ²	0,871	0,879	-0,918
$\ddot{\theta}$	Aceleração de arfagem	rad/s ²	2,483	2,482	0,040
a_c	Aceleração da carroceria	m/s ²	0,584	0,584	0,000
a_{uf}	Aceleração da suspensão dianteira	m/s ²	4,036	4,041	-0,124
a_{ur}	Aceleração da suspensão traseira	m/s ²	3,461	3,464	-0,087
a_a	Aceleração do assento	m/s ²	0,407	0,407	0,000
a_1	Aceleração da pélvis	m/s ²	0,146	0,146	0,000
a_6	Aceleração da coluna lombar	m/s ²	0,140	0,140	0,000
a_8	Aceleração do cérebro	m/s ²	0,150	0,150	0,000

Assim como os testes acima, este possui as mesmas classificações, pois como visto anteriormente, o método de integração e a quantidade de graus de liberdade não apresentam distinção aparente, esta diferença aparece somente na quarta casa após a vírgula. Ambos os métodos testados possuem baixas acelerações no assento e sua classificação é “um pouco desconfortável”.

5.6 Análise para os casos mais críticos de aceleração no assento

O experimento visto na Tabela 8, consiste em analisar, dentre os 16 testes realizados, aqueles que apresentaram os cenários mais desconfortáveis para o motorista de acordo com a ISO 2631-1. Para isso, as maiores aceleração RMS no assento (a_a) e na pélvis (a_1) são as variáveis mais interessantes de estudo. As 4 maiores acelerações para o assento são os testes, 3, 6, 9 e 16. A tabela com todos os testes encontra-se nos Apêndices (Tabela A.1).

Tabela 8. Maiores acelerações RMS avaliadas no assento e na pélvis.

Teste	Newmark		Qtde. de GDL		Biodinâmico		Tipo de pista		a_a (m/s ²)	a_1 (m/s ²)
	Tradicional	Quadrático	8GDL	12GDL	Flexível	Rígido	Irregular	Lisa		
3	✓	-	-	✓	✓	-	✓	-	0,407	0,146
6	-	✓	-	✓	✓	-	✓	-	0,407	0,146
7	-	✓	✓	-	-	✓	✓	-	0,285	0,285
9	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	0,408	0,154
16	-	✓	✓	-	✓	-	✓	-	0,408	0,154

Todos estes testes apresentaram valores bastante aproximados, em torno de 0,407 m/s², que classificam este modelo como “um pouco desconfortável”. Todos estes testes possuem em comum o fato de haverem um modelo biodinâmico flexível e uma pista irregular – este último sendo o fator comum a todos. Estas similaridades estão em linha com os demais resultados visualizados e também foi esperado, como já comentado neste trabalho. As outras variáveis que mudaram (método de integração e quantidade de graus de liberdade), conforme visto acima, não fazem muita diferença quando comparadas lado-a-lado.

A aceleração na pélvis também é comparável e ela apresenta resultados abaixo daqueles medidos no assento conforme esperado. A explicação para isso é a rigidez dos glúteos, que ficam entre o assento e a pélvis, dissipando parte da energia envolvida.

6 CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo analisar a dirigibilidade e conforto de um modelo de motocicleta por meio de testes feitos com a utilização da simulação numérica pelo *software* MatLab (2012), sendo experimentados dois métodos de integração diferentes, o método de Newmark tradicional e o método de Newmark quadrático. Para isso, foram testados um modelo que incluiu 5-GDL para a dinâmica vertical da motocicleta e 4-GDL para a dinâmica lateral. Também dois modelos biodinâmicos com diferentes quantidades de graus de liberdade, sendo um com 8 e outro com 12-GDL para simular o piloto. Este mesmo piloto possui dois estados de rigidez considerados, um flexível em que todas as articulações do corpo humano possuem liberdade de movimento entre si, e outro totalmente rígido, como se fosse um único bloco de massa pilotando a moto. Todos os cenários de casos propostos, havia uma mesma motocicleta em velocidade constante (80 km/h) e desenvolvendo uma manobra de troca de faixa em uma pista proposta pela Norma ISO 3888-2 (2011), sendo testada também esta mesma manobra em uma pista idealmente lisa, para fins comparativos.

Estes diversos cenários destacados nos trazem conclusões, como por exemplo que a pista irregular eleva substancialmente as vibrações sentidas pelo piloto quando se faz o mesmo trajeto em uma pista lisa. No modelo biodinâmico a diferença sentida na aceleração foi muito elevada, reforçando o fato que a pista proposta pode modificar substancialmente os cenários estudados. Assim, recomenda-se que ao simular modelos de motocicleta numericamente, as irregularidades da pista sejam sempre levadas em conta. Outro ponto ressaltado foi acerca da influência do modelo biodinâmico estabelecido, que não refletiu grandes diferenças nas acelerações medidas na motocicleta, porém apresentou até de -103,4% de diferença no piloto. Isto se deve ao fato de que o piloto rígido tem menos capacidade de dissipar vibrações do que o modelo flexível, que possui liberdade entre os graus de liberdade. Em outras palavras também recomenda-se utilizar um modelo que representa a dinâmica de um piloto, visto que isto afeta os resultados nos GDL do biodinâmico e estará mais próximo à realidade.

Um ponto que não apresentou grande assimetria foi a quantidade de graus de liberdade. Tanto o modelo de 8 como o modelo de 12-GDL trouxeram valores bastante similares, divergindo menos de 0,1% entre eles nas variáveis da motocicleta. Para o piloto, houve maiores desproporções, de 5 e 9% para a pélvis e para o cérebro, respectivamente. Estas diferenças podem ser explicadas pela forma como foi distribuído o peso entre o modelo com menos graus de liberdade para que eles mantivessem a mesma massa entre si, isto é, a forma como foram compensados os 4-GDL a mais. Todavia, ainda assim a diferença apresentada foi mínima, não justificando sua implementação (12-GDL), pois aumentará a complexidade do problema.

Outra proposta discutida foi a diferença no algoritmo aplicado. Para motocicleta e piloto, a diferença absoluta não chegou a 1%, mostrando a semelhança entre ambos os métodos. Esta semelhança é também, muito pequena para ser considerável, a menos que os testes realizados requeiram grande precisão. Neste caso, em função do método quadrático ser matematicamente mais preciso que o método linear, se justifica a utilização, podendo-se simular com um intervalo de tempo Δt maior, sem perda de precisão e com menos esforço computacional.

Todos os testes realizados apresentaram um valor não crítico no que diz respeito ao conforto para o motorista, que neste caso a variável em análise é a aceleração no assento, isto é, na interface entre o piloto e a moto. A média dos valores encontrados para os casos mais críticos foi de 0,407 m/s², ficando descrita como “um pouco desconfortável” de acordo com a Norma ISO 2631-1.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, será interessante aprofundar a investigação da variável da irregularidade da pista (aqui utilizada a classe A) e como isso afeta o piloto, pois uma moto pode apresentar aceleração mais alta, sendo desconfortável para o motorista se essa moto não for ideal para esse tipo de pista. Desta forma, há motos para determinados perfis de pista, sendo algumas ideais para trajetos irregulares e outras voltadas para o conforto ao pilotar. Propor diferentes pistas e modelar suspensões adequadas poderá trazer informações relevantes nestes casos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRACICLO. Associação Brasileira dos Fabricantes de Motocicletas, Ciclomotores, Motonetas, Bicicletas e Similares. “**ABRACICLO eleva projeção e estima produção de 1,32 milhão de motocicletas em 2022**”, publicado em 12 junho de 2022. Disponível em < <https://www.abraciclo.com.br/site/press-releases-2022/2022/abraciclo-eleva-projecao-e-estima-producao-de-132-milhao-de-motocicletas-em-2022/>>. Acessado em 01/09/2022.

Baumal, A.E.; McPhee, J.J.; Calamai, P.H. **Application of genetic algorithms to the design optimization of an active vehicle suspension system**. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Amsterdam, v. 163, n. 1-4, p. 87-94, Sept. 1998.

British Standards Institution. **BS-6841: measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock**. London, 1987.

Cossalter, V., Sadauckas, J. “**Elaboration and quantitative assessment of manoeuvrability for motorcycle lane change**”, Vehicle System Dynamics, V.44, No. 12, December, pp.903-920. 2006.

Demboski, Fernando Rodrigues. **Estudo para Utilização de Componentes de Suspensão de Motocicleta em Veículo Minimalista Urbano**. 2014. 53 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Automotiva, Centro de Engenharias da Mobilidade, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2014.

Drehmer, L. R. C. “**Otimização Robusta Multiobjetivo por Análise de Intervalo Não Probabilística: Uma Aplicação em Conforto e Segurança Veicular sob Dinâmica Lateral e Vertical Acoplada**.” 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica).

Gholampour, A., Karimi-Rad, M. **A New Unconditionally Stable Time Integration Method for Analysis of Nonlinear Structural Dynamics**, Journal of Applied Mechanics, V.80, 021024-1, 2013.

Gräbin, E. F. G. “**Estudo do comportamento dinâmico de um modelo de bicicleta**”. Trabalho final de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, RS, 2022.

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 3888-2, 2011. **Passengers’ cars-Test track for a severe lane-change manoeuvre. Part2: Obstacle avoidance**. International Organization for Standardization, Geneva, 2nd edition.

ISO-8608, 2016. **Mechanical vibration – road surface profiles – reported of measured data**. International Organization for Standardization, Geneva, 1st edition.

Koch, J., 1978, **Experimentelle und Analytische Untersuchungen des Motorrad-Fahrer Systems**. Dissertation, Berlin.

Massaro, M, Cossalter, V., Sadauckas, J., Lot, R. “**Using Simulators for the Assessment of Handling of Motorcycles**”. Proceedings, Bicycle and Motorcycle Dynamics, Symposium on the Dynamics and Control of Single-Track Vehicles, pp.21-23, September, Milwaukee, Wisconsin USA. 2016.

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

Pacejka, H. B. “**Tire characteristics and vehicle handling and stability. Tire and vehicle dynamics**”, Elsevier Ltd, 2012.

Rao, S. S. **Vibrações Mecânicas**. 4th Edição, Prentice Hall. 388 p. 2009.

Rice, R.S., 1978, **Rider skill influences on motorcycle maneuvering**. SAE 780312, Warrendale, PA.

Shinozuka, M., Jan, C.M. “**Digital simulation of random processes and its applications**”. Journal of Sound and Vibration, 25(1), 111-128, 1972.

The MathWorks Inc. (2012). MATLAB version: 8.0 (R2012b), Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc. <https://www.mathworks.com>

Tolfo, A. A. “**Modelamento de um trator agrícola e avaliação do Comportamento dinâmico**”. Trabalho fina de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, RS, 2022.

Tomasi, V. F. “**Otimização multiobjetivo dos parâmetros da suspensão de uma motocicleta**”. Trabalho fina de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, RS, 2019.

Viagem de Moto. “**A história sobre duas rodas**”, publicado em 12 junho de 2022. Disponível em < https://www.viagemdemoto.com.br/historia_da_moto.htm > Acessado em 22/11/2022.

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

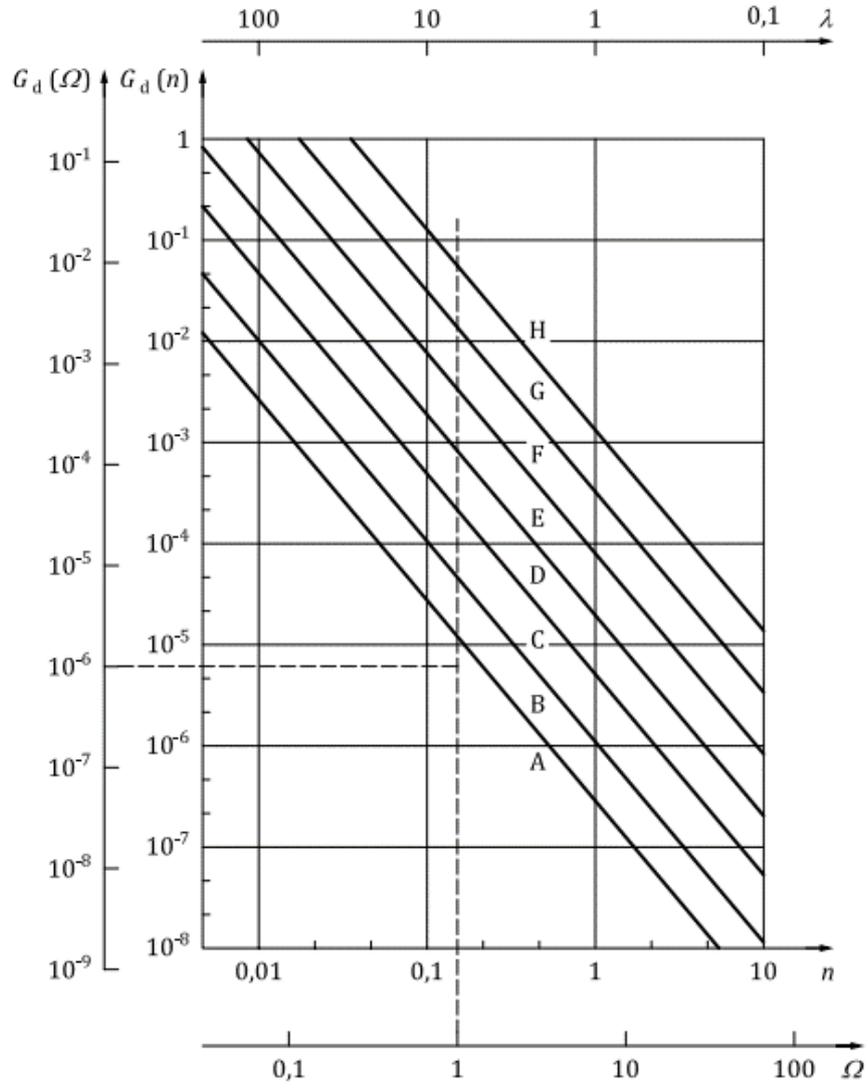


Figura A.1 – Classificação das estradas, classes A a H.
Fonte: ISO 8608 (2016).

APÊNDICES

Teste	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Newmark Trad	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0
Newmark Quad	1	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1
8-GDL	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1
12-GDL	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0
Piloto flexível	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1
Piloto rígido	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0
Pista irregular	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1
Pista lisa	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0
σ_x (m/s ²)	0,504	0,505	0,507	0,507	0,504	0,508	0,507	0,504	0,507	0,507	0,504	0,507	0,504	0,505	0,504	0,508
σ_y (m/s ²)	3,858	3,858	3,880	3,878	3,858	3,885	3,881	3,858	3,881	3,881	3,858	3,878	3,858	3,858	3,858	3,886
ψ (rad/s ²)	0,535	0,535	1,919	1,916	0,535	1,923	1,918	0,535	1,919	1,918	0,535	1,916	0,535	0,535	0,535	1,923
$\dot{\phi}$ (rad/s ²)	0,389	0,389	0,871	0,863	0,389	0,879	0,868	0,389	0,870	0,868	0,389	0,863	0,389	0,389	0,389	0,879
α_c (m/s ²)	0,002	0,002	0,584	0,587	0,002	0,584	0,587	0,002	0,584	0,587	0,002	0,587	0,002	0,002	0,002	0,584
α_{urf} (m/s ²)	0,000	0,000	4,036	4,041	0,000	4,041	4,045	0,000	4,036	4,045	0,000	4,041	0,000	0,000	0,000	4,041
α_{urr} (m/s ²)	0,000	0,000	3,461	3,456	0,000	3,464	3,458	0,000	3,461	3,458	0,000	3,456	0,000	0,000	0,000	3,463
$\ddot{\theta}$ (rad/s ²)	0,001	0,001	2,483	2,483	0,001	2,482	2,482	0,001	2,482	2,482	0,001	2,483	0,001	0,001	0,001	2,482
α_a (m/s ²)	0,003	0,003	0,407	0,285	0,003	0,407	0,285	0,003	0,408	0,285	0,003	0,285	0,003	0,003	0,003	0,408
α_1 (m/s ²)	0,003	0,003	0,146	0,285	0,004	0,146	0,285	0,004	0,154	0,285	0,004	0,285	0,003	0,003	0,004	0,154
α_6 (m/s ²)	-	0,003	0,140	-	-	0,140	-	-	-	0,285	0,004	0,285	0,003	-	0,004	-
α_8 (m/s ²)	0,003	0,003	0,150	0,285	0,004	0,150	0,285	0,004	0,165	0,285	0,004	0,285	0,003	0,003	0,004	0,165

Tabela A.1 – Todos os testes paramétricos realizados e respectivos valores RMS de aceleração.

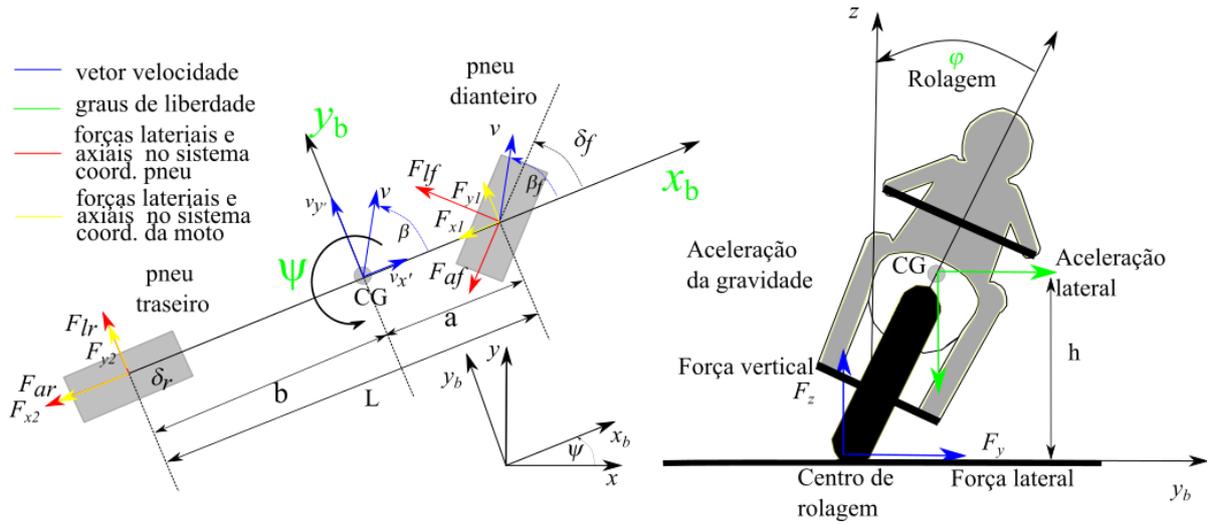


Figura A.2 – Modelo para dinâmica lateral da moto com 4-GDL (x_b , y_b , ψ e φ).

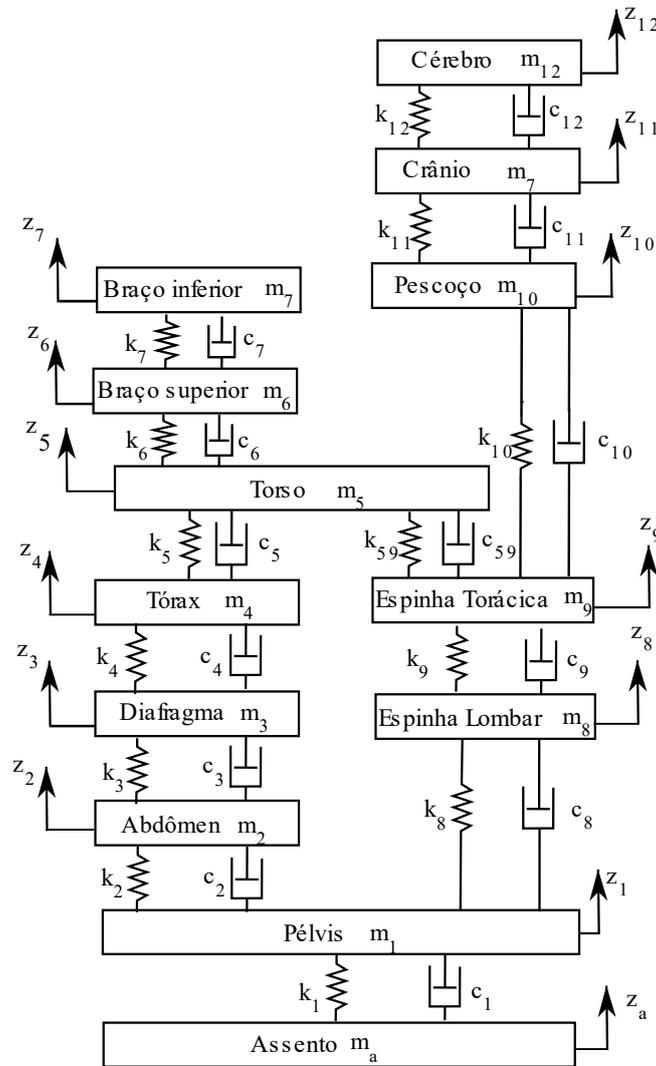


Figura A.3 – Modelo para piloto com 12-GDL (adaptado de Zainal et al., 2018).