

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

OBTENÇÃO DA RESPOSTA DINÂMICA DE UMA MOTOCICLETA TRAFEGANDO EM
DIFERENTES PERFIS DE PISTA

por

Jean Felipe Perazzo

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, 11 de junho de 2018.

OBTENÇÃO DA RESPOSTA DINÂMICA DE UMA MOTOCICLETA TRAFEGANDO EM
DIFERENTES PERFIS DE PISTA

por

Jean Felipe Perazzo

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
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof^a Letícia Fleck Fadel Miguel

Comissão de Avaliação:

Prof^a Letícia Fleck Fadel Miguel

Prof. Edison Hikaro Aseka

Prof. Rodrigo Rossi

Porto Alegre, 11 de junho de 2018.

AGRADECIMENTOS

Agradeço acima de tudo aos meus pais pelo esforço de sempre para que nunca faltasse nada na minha jornada e por terem me ensinado a nunca desistir dos meus objetivos, por mais difíceis que fossem.

Agradeço aos meus irmãos pelo apoio e preocupação ao longo da minha trajetória.

Agradeço à minha namorada pela parceria e incentivo sem medir esforços em todos os momentos.

Agradeço à minha orientadora por toda a sua atenção e disponibilidade, tornando possível a conclusão deste trabalho.

PERAZZO, J.F. **Obtenção da Resposta Dinâmica de uma Motocicleta Trafegando em Diferentes Perfis de Pista**. 2018. 13 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

RESUMO

O trabalho consiste na obtenção da resposta dinâmica de um sistema de 4 GDL através da resolução da equação diferencial de movimento pelo Método de Newmark. O objeto de estudo é uma motocicleta trafegando a velocidade constante, sujeita a excitações aleatórias de diferentes perfis de pistas, que podem ser determinados através da Norma ISO 8608 (1995) no domínio frequência e posteriormente transformados para o domínio do tempo através do Método de Shinozuka e Jan (1972). A metodologia de análise será numérica com o auxílio do *software* MATLAB®.

PALAVRAS-CHAVE: Resposta Dinâmica; Motocicleta; Excitações Aleatórias.

PERAZZO, J.F. **Obtaining the Dynamic Response of a Motorcycle Traveling in Different Track Profiles.** 2018. 13 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ABSTRACT

The work consists in obtaining the dynamic response of a system of 4 DOF through the resolution of the differential equation of motion by the Newmark Method. The object of study is a motorcycle traveling at constant speed, subject to random excitations of different track profiles, which can be determined through the ISO 8608 (1995) in the frequency domain and later transformed into the time domain by the Shinozuka and Jan Method (1972). The analysis methodology will be numerical with the aid of MATLAB® software.

KEYWORDS: Dynamic Response; Motorcycle; Random Excitations.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
4. METODOLOGIA	2
4.1 PSD DE DESLOCAMENTO EM TERMOS DE FREQUÊNCIA ESPACIAL.....	2
4.2 PSD DE DESLOCAMENTO EM TERMOS DE FREQUÊNCIA TEMPORAL.....	2
4.3 GERAÇÃO DO PERFIL.....	3
4.4 CONVERSÃO DO SINAL PARA O DOMÍNIO DO TEMPO.....	4
4.5 DEFINIÇÃO DO MODELO.....	4
4.6 PARÂMETROS.....	5
4.7 RESPOSTA DINÂMICA.....	6
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	7
6. CONCLUSÕES	13
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13
APÊNDICE A	15

1. INTRODUÇÃO

Segundo Lacerda, 2015, a invenção da primeira motocicleta foi em 1885, pelo alemão Gottlieb Daimler. Desde então, estes veículos vêm sendo modificados e melhorados visando alcançar o melhor desempenho, segurança e conforto para os usuários.

Por proporcionar muita agilidade, mobilidade e economia, a utilização da motocicleta nos centros urbanos vem sendo cada vez maior. De acordo com dados da Abraciclo, 2018, somente no Brasil, existem mais de 26 milhões de unidades em circulação com previsão de aquecimento do mercado.

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

2. OBJETIVOS

O trabalho propõe a obtenção da resposta dinâmica de uma motocicleta, sujeita a excitações aleatórias de diferentes rugosidades de pistas, que podem ser determinadas através das equações de densidade espectral de potência, contidas na Norma ISO 8608 (1995).

Para obter os deslocamentos impostos pela pista no domínio do tempo, será utilizado o método de Shinozuka e Jan, 1972, e para obtenção da resposta dinâmica, em termos de deslocamento, velocidade e aceleração, será utilizado o método de Newmark. Objetiva-se desenvolver uma rotina numérico-computacional através do *software* MATLAB® para resolução do problema em questão e verificar a mesma comparando com simulações já realizadas na literatura. Após validação, propõe-se a variação de parâmetros para análise das respostas dinâmicas e comportamento do sistema.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Dodds e Robson, 1973, mostram que superfícies típicas de estradas podem ser obtidas através de processos Gaussianos, bidimensionais, homogêneos e isotrópicos. De acordo com os autores, uma única função de densidade espectral direta fornece uma descrição da pista que é suficiente para a análise da resposta de veículos.

Segundo Kortis et al., 2017, as irregularidades da superfície no pavimento da estrada causam excitação dinâmica do veículo em movimento. Em suas simulações numéricas, os autores fizeram comparações dos resultados obtidos através da geração de perfil de rugosidades definidos na classificação ISO 8608 com geração de perfil através de medição com scanner 3D. Seu artigo mostra que a metodologia da Norma referida pode ser utilizada para fins de avaliação quanto à resposta dinâmica de um sistema de interação veículo-pavimento.

Vallim, 2015, realizou uma análise de conforto vibracional em motocicletas. De acordo com o autor, a análise deste tipo de veículo em modelos de *half car* (modelo muito comum em análise de carros), pode ser utilizada desde que a motocicleta trafegue em movimento retilíneo e uniforme, sem fazer curvas. De acordo com o autor, seu modelo *half car* com quatro graus de liberdade, obteve êxito ao confrontar seus resultados com Cossalter, 2006, tanto no domínio da frequência quanto no domínio do tempo.

Martini, 2017, afirma que as suspensões são de importância primordial tanto para o desempenho do veículo quanto para o conforto na condução do mesmo. Para motocicletas do tipo *naked*, esses dois fatores são essenciais, na medida em que são motos de alta performance e ao mesmo tempo, motocicletas de rua. O autor realizou o estudo comparativo entre uma suspensão hidropneumática recentemente proposta e uma suspensão padrão, através das respostas dinâmicas obtidas através de um modelo multicorpos com parâmetros de uma motocicleta. Concluiu que em relação ao conforto, não há grandes diferenças, mas em relação ao desempenho, a suspensão hidropneumática se mostra mais eficaz.

4. METODOLOGIA

4.1. PSD de deslocamentos em termos de frequência espacial

O método descrito pela Norma ISO 8608 (1995) permite fazer uma estimativa do grau de rugosidade de um pavimento. A densidade espectral de potência e a frequência espacial se relacionam através de uma reta decrescente em um gráfico de escala logarítmica. A Equação 4.1 mostra a relação anteriormente citada.

$$G_d(n) = G_d(n_0) \cdot \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-w} \quad (4.1)$$

onde, $G_d(n)$ é a PSD de deslocamento em termos de frequência espacial em m^3 , $G_d(n_0)$ é a PSD de referência também em m^3 , n é a frequência espacial em ciclos por metro, n_0 é a frequência espacial de referência em ciclos por metro e w é o expoente responsável pela inclinação da PSD ajustada.

De acordo com a ISO 8608 (1995), o valor do expoente w para obtenção de uma PSD de velocidade constante é 2, a frequência espacial de referência n_0 é 0,1 ciclos por metro e a faixa de frequências espaciais que descreve o comportamento dinâmico de um veículo varia de 0,011 a 2,83 ciclos por metro.

4.2. PSD de deslocamentos em termos de frequência temporal

Reza-Kashyzadeh et al., 2014, consideram que a relação entre as PSDs de deslocamento em termos de frequência espacial e temporal se dá de acordo com a Equação 4.2:

$$G_d(f) = \frac{G_d(n)}{v} \quad (4.2)$$

onde, $G_d(f)$ é a PSD de deslocamentos em termos da frequência temporal em m^2s e v é a velocidade da motocicleta em m/s.

A Norma em questão classifica os perfis em ordem alfabética de A até H, sendo do melhor ao pior, respectivamente conforme mostra Tabela 4.1 adaptada da ISO 8608 (1995). De acordo com Ngwangwa, 2010, somente as cinco primeiras classes (A até E) são realmente importantes na prática, enquanto as demais são mais utilizadas de maneira teórica.

Tabela 4.1 – Tabela adaptada com a classificação dos perfis de pista da ISO 8608 (1995).

Perfil de pista	Grau de rugosidade		
	$G_d(n_0) \cdot 10^{-6} m^3$		
	Limite Inferior	Média geométrica	Limite Superior
A	-	16	32
B	32	64	128
C	128	256	512
D	512	1024	2048
E	2048	4096	8192
F	8192	16384	32768
G	32768	65536	131072
H	131072	262144	-

4.3. Geração do perfil

Com objetivo de validar a rotina numérico-computacional de geração de perfil de pista desenvolvida em MATLAB, os perfis de pistas gerados pelo programa elaborado foram comparados com os perfis apresentados por Kropac, 2005, em gráficos de deslocamento vertical *versus* distância percorrida pelo veículo. Três diferentes situações foram simuladas, conforme Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Parâmetros utilizados por Kropac, 2005.

Simulação	$G_d(n_0)$ [m ³ /ciclo]	w	n_0 [ciclos/m]
1	$10,56 \times 10^{-6}$	1,5	0,1
2	16×10^{-6}	2	0,1
3	$25,22 \times 10^{-6}$	3	0,1

No lado esquerdo da Figura 4.1, estão os perfis gerados no presente trabalho e na coluna da direita, gerados por Kropac, 2005, com as simulações 1, 2 e 3, respectivamente.

A simulação foi realizada através de um percurso de 800 metros.

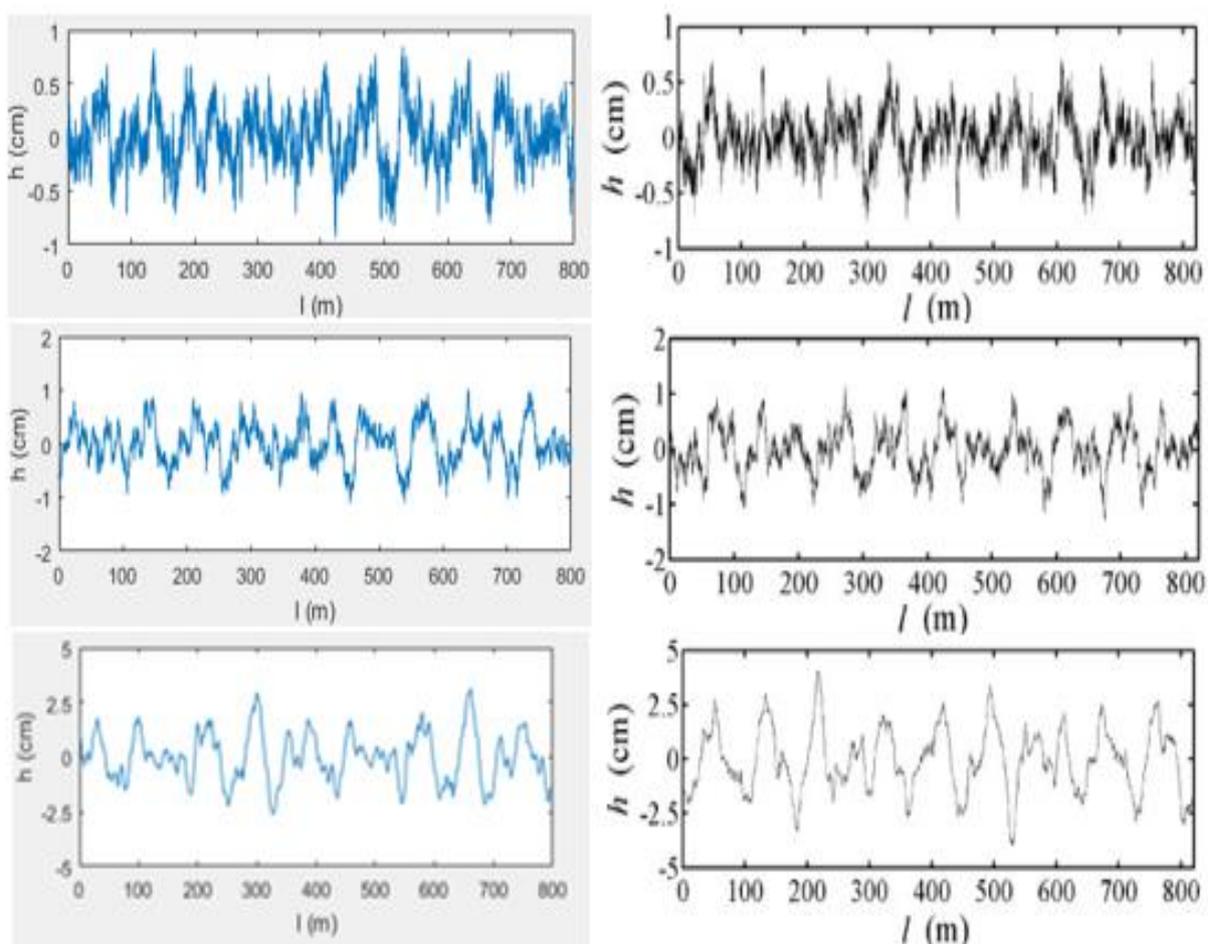


Figura 4.1 – Comparações dos perfis gerados através do MATLAB no presente trabalho com os perfis gerados por Kropac, 2005.

Visto que os sinais de deslocamento apresentam similaridade, mesma faixa de amplitudes e mesmo conteúdo de frequências, com os sinais apresentados por Kropac, 2005, conclui-se que através da rotina numérico-computacional desenvolvida em MATLAB, pode-se obter resultados aceitáveis.

Com esta premissa, obtém-se o sinal de velocidade imposto pela pista à motocicleta calculando a derivada de primeira ordem do deslocamento obtido anteriormente, em relação ao tempo de acordo com a Equação 4.3.

$$\dot{h} = \frac{dh}{dt} \quad (4.3)$$

Onde h é o deslocamento imposto pelo solo, em metros, t o tempo em segundos e \dot{h} é a velocidade de excitação em m/s.

4.4. Conversão do sinal para o domínio do tempo

Fossati, 2014, usou a equação do método de Shinozuka e Jan (1972) para geração dos sinais de deslocamento no domínio do tempo. Dentre suas aplicações, este método é utilizado para a simulação da rugosidade superficial de rodovias, através de uma série de funções de cosseno com alturas ponderadas, frequências uniformemente espaçadas e ângulos de fase aleatórios, conforme a Equação 4.4 adaptada por Fossati, 2014:

$$\vec{Y}(t) = \sum_{k=1}^N \sqrt{2 \cdot G_d(f_k) \cdot \Delta f_k} \cdot \cos(2\pi f_k \cdot t + \varphi_k), \text{ sendo } f_k = n_k \cdot v \quad (4.4)$$

onde $\vec{Y}(t)$ é o deslocamento imposto pela superfície em função do tempo, N é o número de intervalos da banda de frequência, $\Delta f_k = f_{k+1} - f_k$ é o intervalo de variação da frequência em Hz, v é a velocidade em m/s, t é o tempo em segundos e φ_k é o ângulo de fase aleatório que varia de 0 a 2π .

4.5. Definição do modelo

Um dos modelos matemáticos que Almeida, 2006, utilizou na sua análise de vibrações de tráfego de veículos sobre pavimentos irregulares em pontes rodoviárias, possuía quatro graus de liberdade. De acordo com a Figura 4.2, u_v e θ_v , são respectivamente, o movimento vertical e rotação no próprio plano da massa suspensa (m_s). u_1 e u_2 , correspondem aos deslocamentos verticais das massas não-suspensas (m_{ns1} e m_{ns2}). As massas não-suspensas representam os pneus, rodas e eixo. Já a massa suspensa representa toda estrutura, incluindo motor, carenagens e massa do piloto. Os dois conjuntos de mola-amortecedor da suspensão são descritos por K_{vs1} , C_{vs1} , K_{vs2} e C_{vs2} , e os dois conjuntos mola-amortecedor que representam os pneus são compostos por K_{vp1} , C_{vp1} , K_{vp2} e C_{vp2} , sendo em N/m os coeficientes de rigidez K e em N.s/m os coeficientes de amortecimento viscoso C . A distância entre o centro de massa e o eixo traseiro da motocicleta é descrito por P , em metros e a distância entre eixos é representada por d , em metros. O modelo proposto foi baseado na norma NBR 7188 (1984), composto por um sistema massa-mola-amortecedor. A Figura 4.2 representa o modelo escolhido.

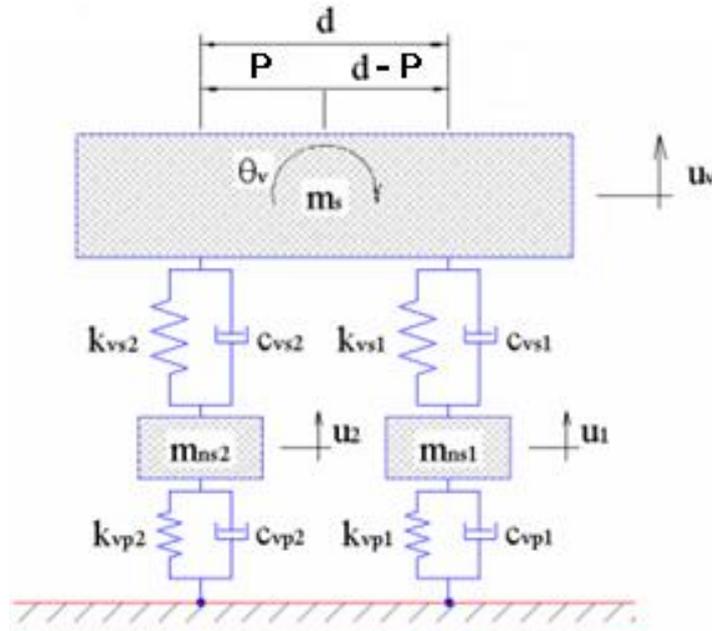


Figura 4.2 - Modelo utilizado por ALMEIDA, 2006.

Vallim, 2015, utilizou um modelo igual ao de Almeida, 2006, cujas equações para análise do modelo de 4 GDL, estão apresentadas na forma matricial conforme a expressão 4.5:

$$\begin{bmatrix} m_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{ns1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{ns2} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \ddot{u}_v \\ \ddot{\theta}_v \\ \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{vs1} + c_{vs2} & (d-p)c_{vs1} - pc_{vs2} & -c_{vs1} & -c_{vs2} \\ (d-p)c_{vs1} - pc_{vs2} & (d-p)^2c_{vs1} - p^2c_{vs2} & -(d-p)c_{vs1} & c_{vs2}p \\ -c_{vs1} & -(d-p)c_{vs1} & c_{vs1} + c_{vp1} & 0 \\ -c_{vs2} & c_{vs2} \cdot p & 0 & (c_{vs2} + c_{vp2}) \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \dot{u}_v \\ \dot{\theta}_v \\ \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{vs1} + K_{vs2} & (d-p)K_{vs1} - pK_{vs2} & -K_{vs1} & -K_{vs2} \\ (d-p)K_{vs1} - pK_{vs2} & (d-p)^2K_{vs1} - p^2K_{vs2} & -(d-p)K_{vs1} & K_{vs2}p \\ -K_{vs1} & -(d-p)K_{vs1} & K_{vs1} + K_{vp1} & 0 \\ -K_{vs2} & K_{vs2} \cdot p & 0 & (K_{vs2} + K_{vp2}) \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u_v \\ \theta_v \\ u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{ns1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{ns2} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ C_{vp1}\dot{h}_1 + K_{vp1}h_1 \\ C_{vp2}\dot{h}_2 + K_{vp2}h_2 \end{Bmatrix} \quad (4.5)$$

4.6. Parâmetros

Os parâmetros utilizados para fins de simulação e obtenção da resposta dinâmica do modelo de 4 GDL analisado foram retirados de Vallim, 2015 e encontram-se na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Parâmetros da motocicleta utilizados por Vallim, 2015.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Coeficiente de amortecimento viscoso P2	C_{vp2}	0
Coeficiente de amortecimento viscoso P1	C_{vp1}	0
Coeficiente de amortecimento viscoso traseiro S2	C_{vs2}	750 N.s/m
Coeficiente de amortecimento viscoso dianteiro S1	C_{vs1}	500 N.s/m
Coeficiente de rigidez pneu traseiro	K_{vp2}	180000 N/m
Coeficiente de rigidez pneu dianteiro	K_{vp1}	180000 N/m
Coeficiente de rigidez S2	K_{vs2}	24000 N/m
Coeficiente de rigidez S1	K_{vs1}	15000 N/m
Massa suspensa moto + piloto com 70 kg	m_s	200 kg
Massa não suspensa dianteira	m_{ns2}	18 kg
Massa não suspensa traseira	m_{ns1}	15 kg
Momento de inércia	I_v	38 kg.m ²
Distância entre eixos	d	1,4 m
Distância do eixo traseiro ao centro de massa	p	0,7 m

4.7. Resposta Dinâmica

Pode-se escrever a equação de movimento da seguinte forma:

$$M\ddot{\vec{x}} + C\dot{\vec{x}} + K\vec{x} = \vec{F} \quad (4.6)$$

onde M é a matriz de massa, C é a matriz de amortecimento, K é a matriz de rigidez do sistema, $\ddot{\vec{x}}$ é o vetor de acelerações do sistema, $\dot{\vec{x}}$ é o vetor de velocidades do sistema, \vec{x} é o vetor de deslocamentos do sistema e \vec{F} é o vetor de excitações da pista ao sistema.

A resposta dinâmica de um sistema pode ser obtida através do Método de Newmark. Segundo Groehs, 2001, este é o mais eficaz dos métodos numéricos implícitos de integração das equações de movimento. As Equações 4.7, 4.8 e 4.9 permitem obter os deslocamentos, velocidades e acelerações pelo Método de Newmark, respectivamente:

$$\vec{x}(t_{i+1}) = (a_0M + a_5C + K)^{-1} \left\{ \begin{array}{l} \vec{F}(t_{i+1}) + M[a_0\vec{x}(t_i) + a_1\dot{\vec{x}}(t_i) + a_2\ddot{\vec{x}}(t_i)] + \\ C[a_5\vec{x}(t_i) + a_6\dot{\vec{x}}(t_i) + a_7\ddot{\vec{x}}(t_i)] \end{array} \right\} \quad (4.7)$$

$$\dot{\vec{x}}(t_{i+1}) = a_5[\vec{x}(t_{i+1}) - \vec{x}(t_i)] - a_6\dot{\vec{x}}(t_i) - a_7\ddot{\vec{x}}(t_i) \quad (4.8)$$

$$\ddot{\vec{x}}(t_{i+1}) = a_0[\vec{x}(t_{i+1}) - \vec{x}(t_i)] - a_1\dot{\vec{x}}(t_i) - a_2\ddot{\vec{x}}(t_i) \quad (4.9)$$

onde $\vec{x}(t_{i+1})$, é o vetor de deslocamento no instante $t + \Delta t$; $\dot{\vec{x}}(t_{i+1})$ é o vetor de velocidade no instante $t + \Delta t$; $\ddot{\vec{x}}(t_{i+1})$ é o vetor de aceleração no tempo $t + \Delta t$; $\vec{x}(t_i)$ é o vetor de deslocamento no tempo t ; $\dot{\vec{x}}(t_i)$ é o vetor de velocidade no tempo t ; $\ddot{\vec{x}}(t_i)$ é o vetor de aceleração no tempo t e $\vec{F}(t_{i+1})$ é o vetor de forças de excitação no instante de tempo $t + \Delta t$. Os valores dos coeficientes a_0 até a_7 são determinados através das equações abaixo. Segundo Newmark, os valores que tornam o método incondicionalmente estável para δ e α são 0,5 e 0,25, respectivamente.

$$\begin{aligned}
 a_0 &= \frac{1}{\alpha \Delta t^2} & a_1 &= \frac{1}{\alpha \Delta t} & a_2 &= \left(\frac{1}{2\alpha} - 1 \right) & a_3 &= (1 - \delta) \Delta t \\
 a_4 &= \delta \Delta t & a_5 &= \frac{\delta}{\alpha \Delta t} & a_6 &= \frac{\delta}{\alpha} - 1 & a_7 &= \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\delta}{\alpha} - 2 \right)
 \end{aligned} \quad (4.10)$$

Para obtenção do vetor de acelerações iniciais, o cálculo é feito através da Equação 4.11:

$$\vec{\ddot{x}}(t_0) = M^{-1} [\vec{F}(t_0) - C\vec{\dot{x}}(t_0) - K\vec{x}(t_0)] \quad (4.11)$$

onde $\vec{F}(t_0)$ é o vetor de força de excitação inicial, $\vec{\dot{x}}(t_0)$ é o vetor de velocidade inicial e $\vec{x}(t_0)$ é o vetor de deslocamento inicial.

Com a intenção de validar a programação elaborada para obtenção da resposta dinâmica, foi feita uma comparação com a solução analítica para excitação harmônica do exercício 6 – pág.133 da Apostila Introdução ao Estudo de Vibrações, de Miguel, 2006.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através de simulações utilizando a rotina desenvolvida no MATLAB, pode-se obter as respostas dinâmicas da motocicleta para diferentes classes de pista e velocidades. Conforme citado na Seção 4.2, apenas os perfis de classe A até a classe E são de interesse prático, portanto, a motocicleta foi simulada nesses cinco perfis em três diferentes velocidades: 40, 60 e 110 km/h. Escolheram-se estas velocidades por serem as mais comuns no Brasil para tráfego de veículos em geral.

As respostas em termos de valores médios quadráticos (deslocamento RMS, velocidade RMS e aceleração RMS) são dadas na Tabela 5.1 para a pista de classe C e nas Tabelas A.1 a A.4 (no Apêndice A) para as pistas de classes A, B, D e E.

Ao analisar os dados apresentados nas tabelas anteriormente citadas, percebe-se que o impacto no piloto devido às excitações, é o menor valor ao trafegar a 40 km/h em um perfil de classe A, com deslocamento RMS de 6,2 milímetros. Já o maior impacto, ocorre ao trafegar a 110 km/h em uma pista com classificação E, cujo valor de deslocamento RMS é 87 milímetros.

Nota-se que as respostas dinâmicas tendem a ter valores maiores com o aumento de velocidade da motocicleta. Além disso, quanto pior for a classificação do perfil de pista proposto pela norma ISO 8608, maiores são os valores das respostas dinâmicas, como já esperado.

Tabela 5.1 – Respostas dinâmicas para um perfil de rugosidade de pista classe C.

Velocidade da moto [Km/h]	Grau de Liberdade	Deslocamento RMS [m]	Velocidade RMS [m/s]	Aceleração RMS [m/s ²]
40	GDL1	0,0142	0,0754	1,57
	GDL2	0,0086	0,1554	5,64
	GDL3	0,0138	0,3125	31,04
	GDL4	0,0138	0,2584	28,34
60	GDL1	0,0215	0,1051	1,7157
	GDL2	0,0099	0,196	7,11
	GDL3	0,0206	0,345	34,19
	GDL4	0,0205	0,289	31,07
110	GDL1	0,0198	0,1588	2,78
	GDL2	0,0094	0,1977	8,88
	GDL3	0,0172	0,5093	52,1
	GDL4	0,0168	0,4	44,61

Através do MATLAB, as frequências naturais foram calculadas e comparadas com as obtidas por Vallim, 2015, conforme Tabela 5.2. Obteve-se resultados exatamente iguais aos do referido autor.

Tabela 5.2 – Comparação com a literatura das frequências naturais calculadas.

Frequências Naturais	f1	f2	f3	f4
Calculadas por Vallim, 2015 [Hz]	2,03	3,42	16,58	18,59
Calculadas no presente trabalho [Hz]	2,03	3,42	16,58	18,59

Para verificar se está correta a diferença de tempo entre o grau de liberdade da roda da frente e da roda de trás, foi plotado um gráfico da resposta dinâmica em termos de deslocamento apenas do grau de liberdade 3 (roda da frente) e grau de liberdade 4 (roda de trás). Como a distância entre eixos é 1,4m e a velocidade utilizada nessa simulação foi 60km/h (16,67m/s), deve haver uma defasagem de tempo de aproximadamente 0,08 segundos entre as rodas ao passar pelo mesmo ponto. Através da plotagem do gráfico, foi possível verificar esta defasagem dos eixos das rodas analisando a diferença de tempo nos pontos indicados pelas setas na Figura 5.1, que é cerca de 0,08 segundos.

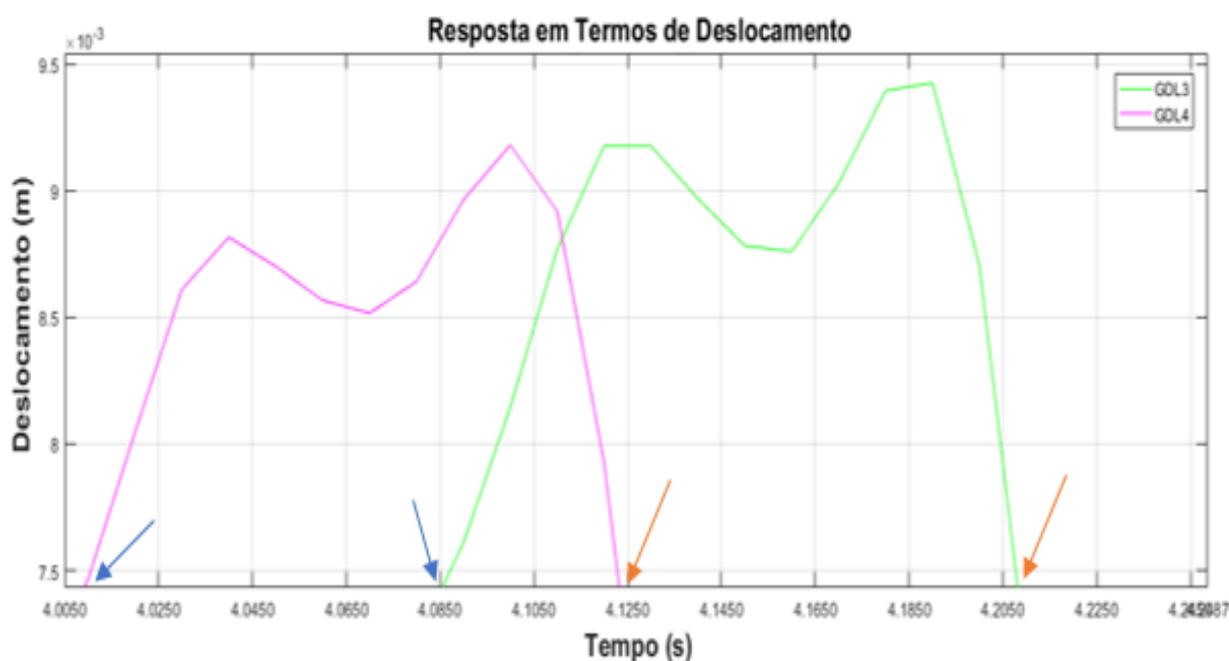


Figura 5.1: Defasagem de tempo entre o eixo dianteiro e traseiro da motocicleta.

Com o intuito de validar a rotina numérico-computacional para obtenção da resposta dinâmica, foi comparada a resposta dinâmica da motocicleta trafegando a 80 km/h em um perfil de pista “liso” (classe A) com a resposta obtida por Vallim, 2015, que utilizou as mesmas premissas. O resultado é aceitável ao comparar as respostas, considerando as ordens de grandeza encontradas e a excitação gerada pelo perfil analisado.

Observando as Figuras 5.2 e 5.3, estão plotadas as respostas em termos de aceleração da massa suspensa (piloto + motocicleta) e as excitações imposta pela pista.

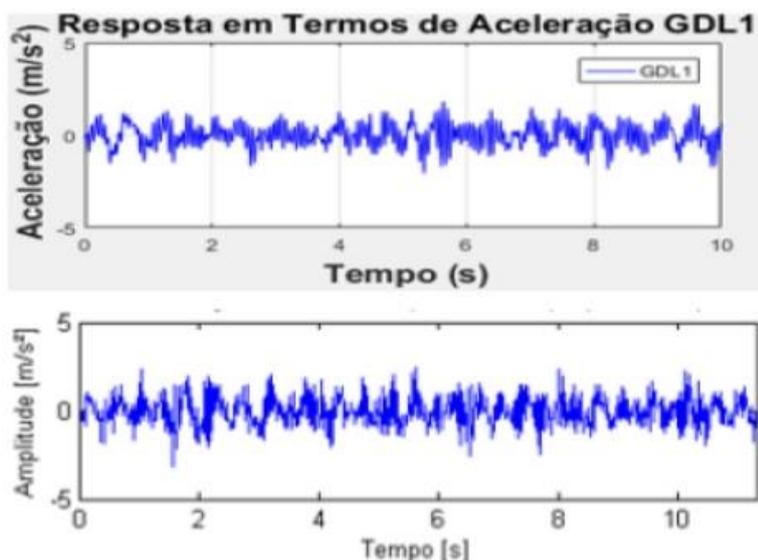


Figura 5.2: Comparação da resposta dinâmica em termos de aceleração com a de Vallim, 2015.

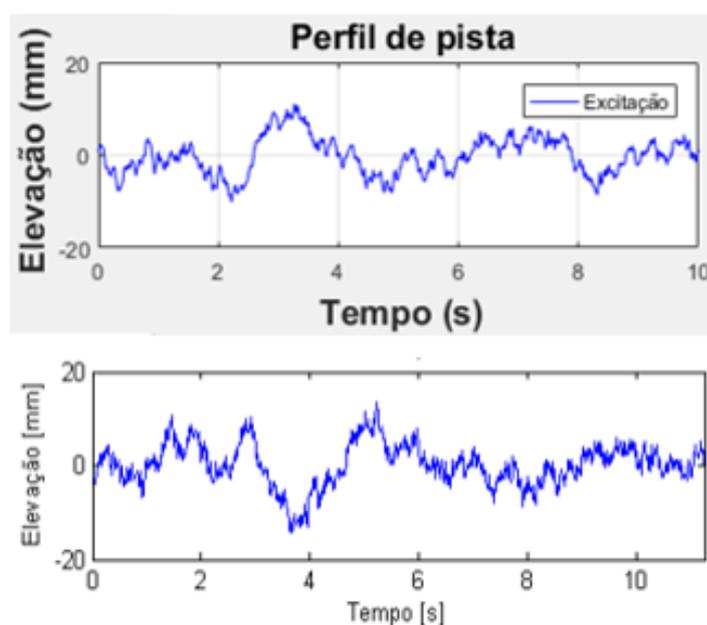


Figura 5.3: Comparação do perfil de excitação gerado com o de Vallim, 2015.

Verificou-se também qual é a influência da massa do piloto somada à da moto, na resposta dinâmica do sistema em termos de aceleração. A simulação foi feita com velocidade constante de 60 km/h em uma superfície de pista classe C. Percebe-se que o deslocamento no grau de liberdade 1, que representa o deslocamento vertical do piloto, diminui com o aumento da massa, enquanto que o deslocamento no grau de liberdade 2, que representa o movimento de rotação do piloto, foi pouco alterado, conforme Figura 5.4. O aumento da massa do piloto e da moto influencia diretamente na aceleração sofrida referente ao movimento vertical, porém em relação ao movimento de rotação, o aumento da massa do piloto e motocicleta não teve influência, tornando os resultados praticamente constantes.

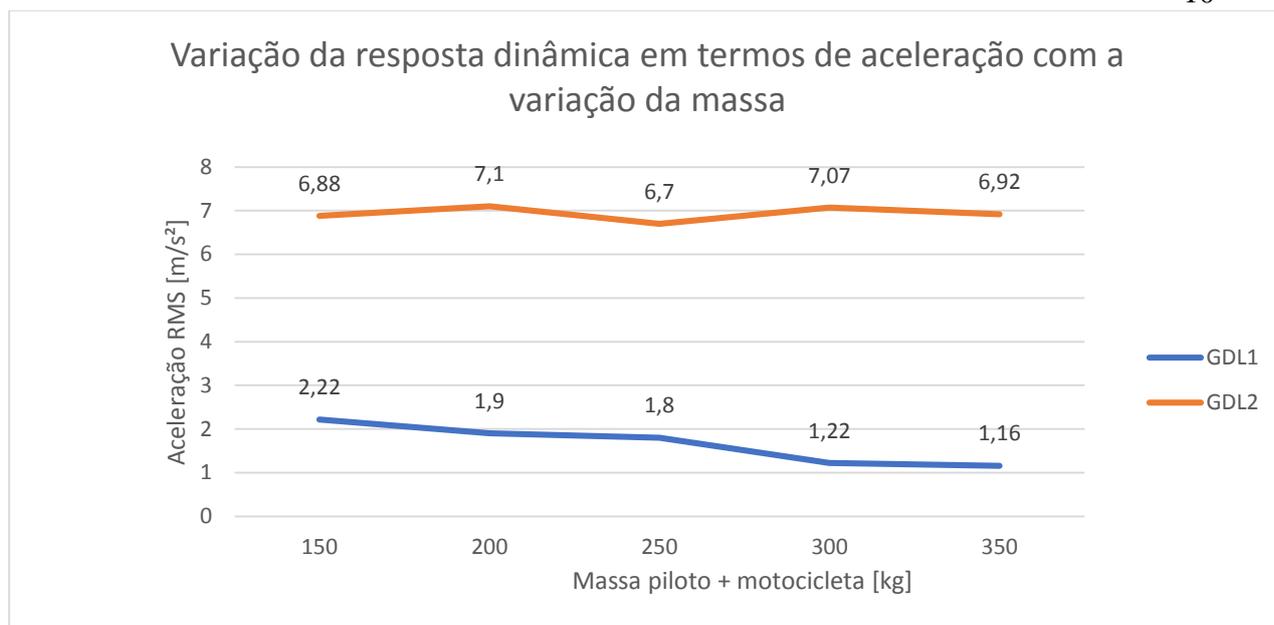


Figura 5.4: Variação da aceleração RMS exercida sobre o motorista em função da massa.

Para comparação de dois casos distintos, a motocicleta foi simulada trafegando com velocidade constante de 60 km/h em uma rodovia em boas condições (classe A) e em uma estrada secundária em condições ruins (classe C), obtendo-se a resposta dinâmica em termos de deslocamento durante um período de 10 segundos. Percebem-se deslocamentos de até 0,04m na interação entre o piloto e a pista em condições ruins, enquanto que na pista classe A, nota-se um valor máximo de aproximadamente 0,01m de deslocamento conforme se observa nas Figuras 5.5 e 5.6.

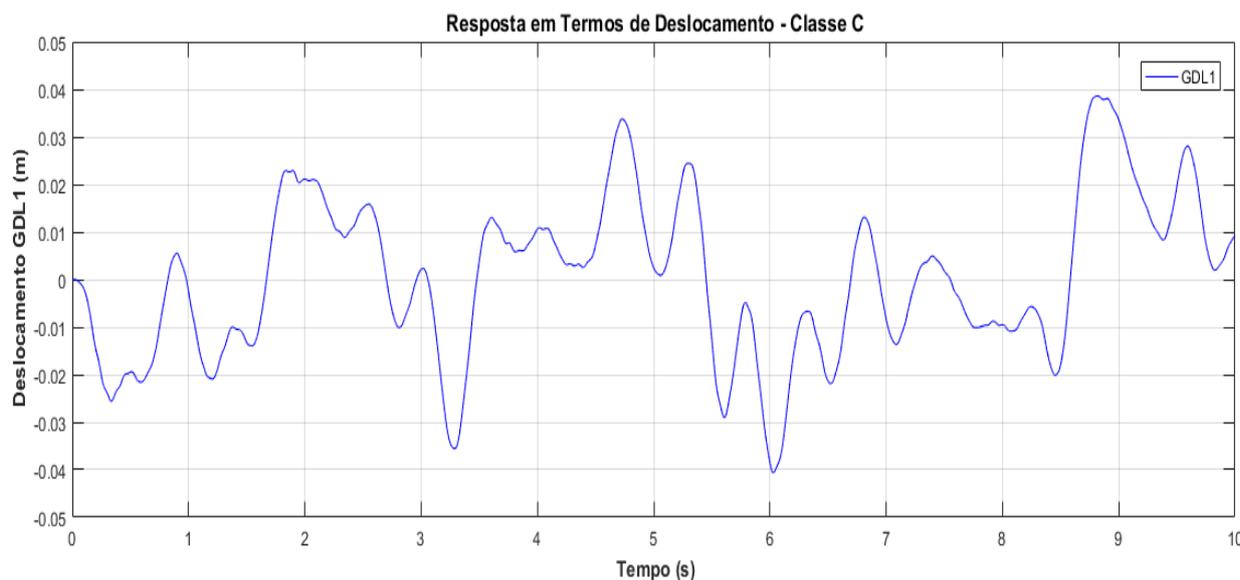


Figura 5.5: Resposta dinâmica da motocicleta trafegando a velocidade constante de 60 km/h em um perfil de pista de classe C.

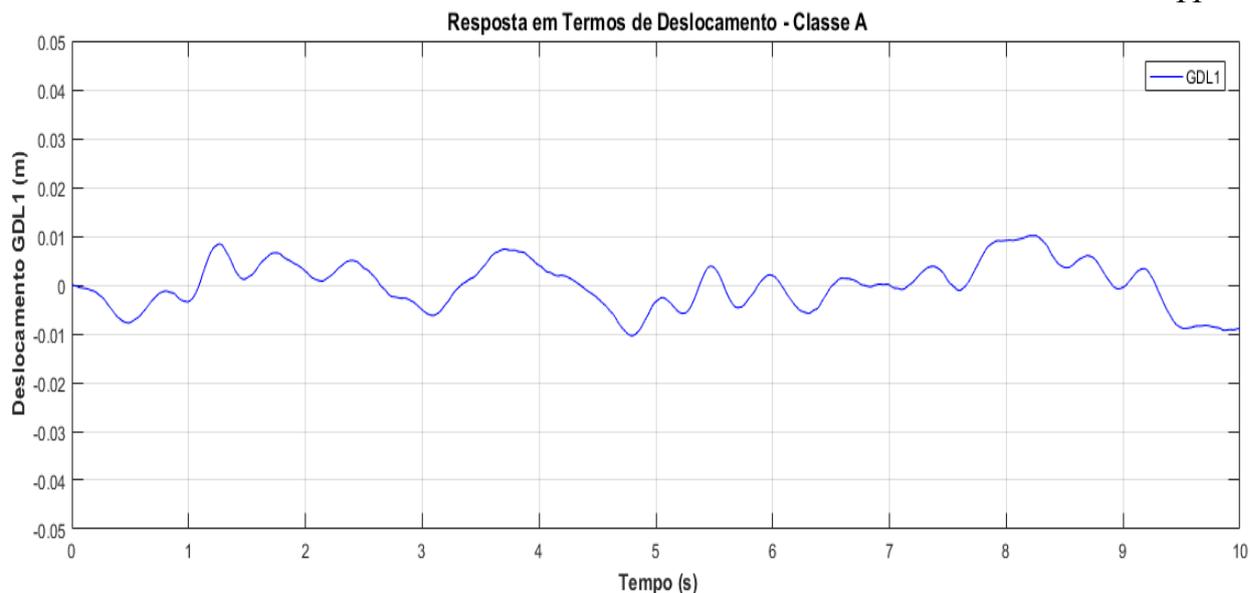


Figura 5.6: Resposta dinâmica da motocicleta trafegando a velocidade constante de 60 km/h em um perfil de pista de classe A.

O primeiro componente da motocicleta que sofre a excitação do solo é o pneu, o qual está associado a um coeficiente de rigidez. Nos gráficos das Figuras 5.7 e 5.8, aumentou-se gradativamente o valor dos coeficientes rigidez K_{vp1} e K_{vp2} , em N/m, dos pneus dianteiro e traseiro simultaneamente a fim de analisar o comportamento do sistema em resposta a variação deste parâmetro, em diferentes velocidades (60 e 80 km/h) em uma pista classe C. O comportamento dos dois gráficos é muito similar, com a resposta em termos de aceleração dos pneus crescendo linearmente com o aumento do coeficiente de rigidez dos mesmos.

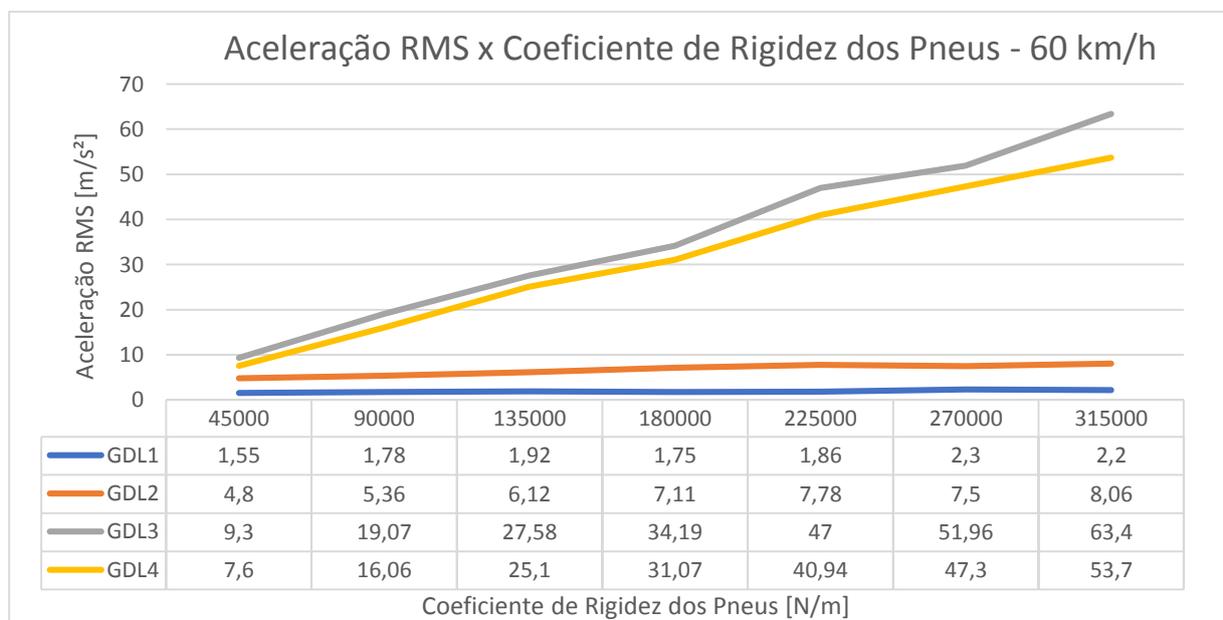


Figura 5.7 – Gráfico do comportamento da resposta dinâmica em termos de aceleração em relação a variação dos coeficientes de rigidez, trafegando a 60 km/h

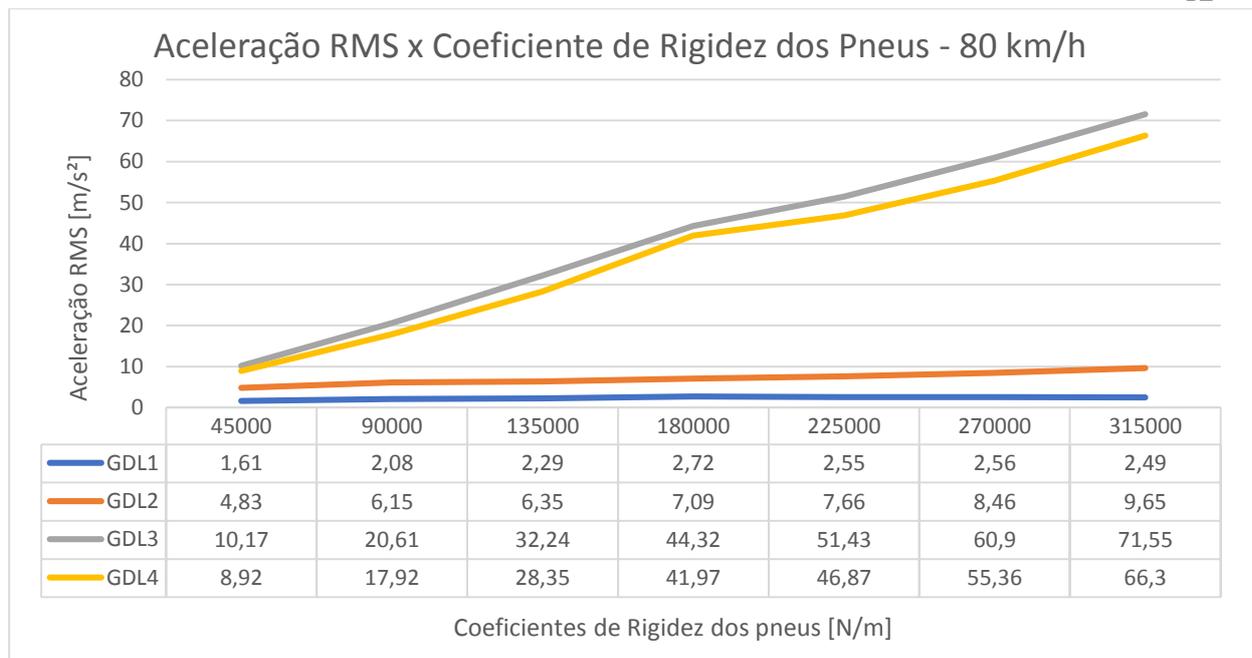


Figura 5.8 – Gráfico do comportamento da resposta dinâmica em termos de aceleração em relação a variação dos coeficientes de rigidez, trafegando a 80 km/h

Inicialmente, para 45000 N/m, as acelerações nos quatro graus de liberdade das Figuras 5.7 e 5.8 possuem valores baixos. Com o aumento dos coeficientes até um valor de 315000 N/m, as acelerações absorvidas em todos graus de liberdade se tornam maiores, com exceção do grau de liberdade um (deslocamento vertical do piloto + carcaça da motocicleta) a 80km/h que apresenta uma leve redução de valor com coeficientes acima de 180000 N/m.

Nota-se que as respostas dinâmicas em termos de aceleração, tendem a ter valores maiores em altas velocidades, independente do grau de liberdade.

6. CONCLUSÕES

A proposta de desenvolvimento da rotina numérico-computacional em MATLAB mostra-se consistente, na medida em que a comparação dos sinais de excitação e resposta dinâmica foram comparadas com a literatura e obtiveram-se resultados similares. Portanto, se obteve sucesso na metodologia adotada para obtenção dos resultados numéricos. Com as análises, observa-se que as acelerações as quais a motocicleta e o piloto sofrem devido ao aumento de velocidade, juntamente com a diminuição da qualidade do perfil de pista, tendem a ser cada vez maiores.

A variação dos parâmetros do sistema após a conclusão da rotina permitiu avaliar alguns comportamentos da motocicleta e piloto trafegando em alguns cenários diferentes. Sentiu-se uma carência de parâmetros (massa, coeficientes de amortecimento viscoso e de rigidez) na literatura, para que fosse possível comparar diferentes motocicletas. Para próximos trabalhos, o ideal é fazer medições dos parâmetros de diferentes motocicletas de maneira experimental, e assim simular diferentes casos na rotina desenvolvida.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, R. **Análise de Vibrações em Pontes Rodoviárias Induzidas pelo Tráfego de Veículos sobre Pavimentos Irregulares**, 2006.

DODDS, C. J.; ROBSON, J. D.; **The Description of Road Surface Roughness**”, *Journal of Sound and Vibration*. v. 31(2), p. 175 – 183, 1973.

FOSSATI G.G. **Determinação das Respostas Dinâmicas de Veículos à Excitação Causada por Diferentes Perfis de Pista Através de Análise Espectral**, 2014.

FLORES, C. **Comparação de metodologias de avaliação da exposição ocupacional a vibrações de corpo inteiro em motoristas de ônibus através de simulação numérica**, 2015.

GROEHS, A.G. **Mecânica Vibratória**, Editora Unisinos, 2ª ed., 2001.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARTIZATION. **ISO 2631: Mechanical vibration – Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration**. 1997.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 8608, Mechanical Vibration – Road Surface Profiles – Reporting of Measured Data**, 1995.

Kropác, O.; Mucka, P. **Be Careful When Using the International Roughness Index as an Indicator of Road Unevenness**. *Journal of Sound and Vibration*, v. 287, 2005.

LACERDA, Paulo. **Quem inventou a motocicleta?**, Disponível em: <<https://revistagalileu.globo.com/Galileu/0,6993,ECT530241-1716-6,00>> Acessado em 15 de março de 2018.

MARTINI, Alberto. BELLANI, Gabriele. **Numerical Investigation on the Dynamics of a High-Performance Motorcycle Equipped with an Innovative Hydro-Pneumatic Suspension System**, 2017.

MIGUEL, L.F.F., **Introdução ao Estudo de Vibrações**, 2006.

NGWANGWA, H.M., Heyns P.S., Labuschagne F.J.J, Kululanga G.K.- **Reconstruction of road defects and road roughness classification using vehicle responses with artificial neural networks simulation**, 2010.

SHINOZUKA, M., JNA, C. M. – **Digital simulation of Random Processes and It Applications**, 1972.

VALLIM, M.B., **Modelagem de Pneumático de Motocicleta para Análise de Conforto Vibracional dos Ocupantes**, 2015.

APÊNDICE A

Tabela A.1 – Respostas dinâmicas para um perfil de rugosidade de pista classe A.

Velocidade da moto [Km/h]	Grau de Liberdade	Deslocamento RMS [m]	Velocidade RMS [m/s]	Aceleração RMS [m/s ²]
40	GDL1	0,0049	0,016	0,34
	GDL2	0,0022	0,041	1,40
	GDL3	0,0048	0,074	7,02
	GDL4	0,0048	0,057	5,88
60	GDL1	0,005	0,025	0,439
	GDL2	0,0021	0,0425	1,7289
	GDL3	0,0048	0,09	8,90
	GDL4	0,0047	0,0733	7,84
110	GDL1	0,0048	0,038	0,68
	GDL2	0,0023	0,0489	2,196
	GDL3	0,0042	0,1283	13,23
	GDL4	0,0041	0,0974	10,87

Tabela A.2 – Respostas dinâmicas para um perfil de rugosidade de pista classe B.

Velocidade da moto [Km/h]	Grau de Liberdade	Deslocamento RMS [m]	Velocidade RMS [m/s]	Aceleração RMS [m/s ²]
40	GDL1	0,0062	0,0323	0,75
	GDL2	0,0042	0,077	2,66
	GDL3	0,0062	0,1536	15,28
	GDL4	0,0061	0,1212	12,85
60	GDL1	0,009	0,0552	0,99
	GDL2	0,0047	0,09	3,48
	GDL3	0,0085	0,1819	18,06
	GDL4	0,0083	0,1525	15,53
110	GDL1	0,0099	0,0717	1,333
	GDL2	0,0043	0,0945	4,332
	GDL3	0,009	0,2616	27,04
	GDL4	0,0087	0,1941	22,19

Tabela A.3 – Respostas dinâmicas para um perfil de rugosidade de pista classe D.

Velocidade da moto [Km/h]	Grau de Liberdade	Deslocamento RMS [m]	Velocidade RMS [m/s]	Aceleração RMS [m/s ²]
40	GDL1	0,04	0,18	2,45
	GDL2	0,019	0,32	10,72
	GDL3	0,037	0,62	61,42
	GDL4	0,037	0,49	51,76
60	GDL1	0,0358	0,24	3,3
	GDL2	0,0182	0,34	14
	GDL3	0,03	0,78	78,87
	GDL4	0,029	0,66	75,82
110	GDL1	0,04	0,3	4,07
	GDL2	0,019	0,38	17,17
	GDL3	0,032	0,98	100,9
	GDL4	0,032	0,78	88,8

Tabela A.4 – Respostas dinâmicas para um perfil de rugosidade de pista classe E.

Velocidade da moto [Km/h]	Grau de Liberdade	Deslocamento RMS [m]	Velocidade RMS [m/s]	Aceleração RMS [m/s ²]
40	GDL1	0,064	0,30	4,10
	GDL2	0,035	0,64	21,22
	GDL3	0,06	1,09	106,3
	GDL4	0,059	0,9	95,23
60	GDL1	0,075	0,41	5,53
	GDL2	0,036	0,68	27,9
	GDL3	0,068	1,45	145,3
	GDL4	0,067	1,19	130,3
110	GDL1	0,087	0,63	8,20
	GDL2	0,038	0,76	35,26
	GDL3	0,07	2,07	212,16
	GDL4	0,069	1,55	173,7