

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

DETERMINAÇÃO DAS RESPOSTAS DINÂMICAS DE VEÍCULOS À EXCITAÇÃO CAUSADA
POR DIFERENTES PERFIS DE PISTA ATRAVÉS DE ANÁLISE ESPECTRAL

por

Giovani Gaiardo Fossati

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, 24 de Novembro de 2014.

DETERMINAÇÃO DAS RESPOSTAS DINÂMICAS DE VEÍCULOS À EXCITAÇÃO CAUSADA
POR DIFERENTES PERFIS DE PISTA ATRAVÉS DE ANÁLISE ESPECTRAL

por

Giovani Gaiardo Fossati

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^a. Dr^a. Thamy Cristina Hayashi
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof^a. Dr^a. Letícia Fleck Fadel Miguel

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Edson Hikaro Aseka

Prof. Dr. Juan Pablo Raggio Quintas

Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas

Porto Alegre, 24 de Novembro de 2014.

FOSSATI, G. **Determinação das Respostas Dinâmicas de Veículos à Excitação Causada por Diferentes Perfis de Pista Através de Análise Espectral**. 2014. 20 p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

RESUMO

O trabalho proposto consiste em determinar a resposta dinâmica de dois modelos de $\frac{1}{4}$ de veículo, representando um automóvel e um caminhão, quando estes trafegam a diferentes velocidades sobre diferentes perfis de pista. Para tanto, inicialmente são gerados os sinais de excitação de base, que representam as irregularidades dos diferentes perfis de pista, a serem impostos aos modelos de veículo. A representação dos perfis de pistas é feita através de suas densidades espectrais de potência, de acordo com a metodologia prevista na norma ISO 8608 (1995). São definidas as velocidades dos veículos e os perfis de pista a serem considerados como parâmetros de entrada. Uma rotina numérico-computacional é elaborada em linguagem MATLAB, de modo a simular os comportamentos dinâmicos dos dois modelos de veículo propostos em resposta às excitações causadas pelos diferentes parâmetros de entrada. O método de Shinozuka é utilizado para a obtenção dos perfis de irregularidade das pistas a partir das equações de densidade espectral de potência (PSD) que representam as diferentes classes de pavimentos. O método das diferenças finitas centrais é utilizado para obter o sinal temporal de aceleração imposto à base dos modelos de veículo a partir dos sinais temporais que representam os perfis de irregularidade das pistas, e o método de Newmark é utilizado para resolver a equação diferencial de movimento e obter as respostas dos modelos a estas irregularidades. É feita uma comparação entre os resultados obtidos com dados experimentais encontrados na literatura, bem como uma análise comparativa dos comportamentos dinâmicos dos modelos de veículos em resposta a variação dos parâmetros de entrada considerados.

PALAVRAS-CHAVE: PSD, resposta dinâmica, modelo de $\frac{1}{4}$ de veículo, perfil de pista.

FOSSATI, G. **Determination of Vehicles' Dynamic Response to Excitation Caused by Different Road Profiles through Spectral Analysis**. 2014. 20 p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

ABSTRACT

The proposed monograph consists in determining the dynamic response of two quarter-vehicle models, representing a car and a truck, when they travel at different speeds on different road profiles. For such, the base excitation signals are initially generated, representing the irregularities of different road profiles. The road profiles representation is made through its power spectral densities, according to the ISO 8608 (1995) standard methodology. The vehicle velocities and the road profiles considered as input parameters are defined. A numerical-computational routine is developed in MATLAB language, in order to simulate the dynamic behaviors of both of the proposed vehicle models in response to excitations caused by different input parameters. The method proposed by Shinozuka is used to obtain the road irregularity profiles from the power spectral density equations (PSD) that represent the different pavement classes. The central finite differences method is used to obtain the temporal acceleration signal imposed to the vehicle models' base from the temporal signals representing the road irregularity profiles, and the Newmark method is used to solve the movement differential equation in order to obtain the vehicle models' responses to these irregularities. A comparison between the obtained results and experimental data from the literature is made, as well as a comparative analysis of the vehicle models' dynamic behavior in response to variation of the input parameters considered.

KEYWORDS: PSD, dynamic response, quarter vehicle model, road profile.

ÍNDICE

	Pág	
1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS.....	1
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
4.1	Sistemas Amortecidos com Vários Graus de Liberdade Sujeitos a Excitações de Base.....	2
4.2	Função de Autocorrelação.....	3
4.3	Densidade Espectral de Potência.....	3
4.4	Transformada Rápida de Fourier.....	3
4.5	Método das Diferenças Finitas Centrais.....	4
4.6	Método de Newmark.....	4
5	METODOLOGIA.....	5
5.1	Generalidades.....	5
5.2	Geração do Sinal.....	6
5.2.1	Representação de Diferentes Perfis de Pistas.....	6
5.2.2	Obtenção do Sinal de Deslocamento.....	8
5.2.3	Validação da Metodologia de Geração do Sinal.....	8
5.2.4	Obtenção do Sinal de Aceleração.....	9
5.3	Análise Dinâmica.....	9
5.3.1	Determinação dos Modelos Numéricos de Veículo.....	9
5.3.2	Validação dos Métodos Numéricos de Obtenção da Resposta Dinâmica....	9
5.3.3	Obtenção das Respostas Dinâmicas.....	10
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	10
7	CONCLUSÕES.....	15
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15
	ANEXO.....	16
	APÊNDICE.....	17

1. INTRODUÇÃO

A indústria automobilística enfrenta o desafio de desenvolver projetos que aliem a economia e o desempenho de veículos com o conforto e a segurança de seus ocupantes. O desenvolvimento de métodos numéricos que permitam prever o comportamento destes veículos, trafegando em representações razoavelmente precisas da malha viária, se consolidou como um assunto de grande relevância entre os fabricantes.

A utilização de modelos numéricos que simulam as condições reais das pistas pode aumentar a confiabilidade, antecipar decisões e reduzir prazos no escopo da indústria em questão, o que se traduz em redução de custos de fabricação e aumento da qualidade dos produtos finais. Segundo Hougaz, 2005, em projetos de veículos automotivos, prever adequadamente a durabilidade de um componente estrutural é vital para a redução do orçamento assim como para estipular prazos de garantia e de manutenção.

O perfil das estradas de rodagem não é o único parâmetro a influenciar a resposta dinâmica de um veículo, que por sua vez, determina diretamente os níveis de conforto e segurança de seus ocupantes. Variáveis como a massa do veículo e as características de seu sistema de suspensão consistem em fatores determinantes para o seu comportamento.

A suspensão tem grande função estrutural para absorver os efeitos de forças causados por uma excitação importada das irregularidades das pistas [Ciapparini, 2012]. Desse modo, um modelo numérico de veículo aliado a uma metodologia de avaliação e representação das diferentes pistas que o veículo real irá trafegar, compõem uma poderosa ferramenta para o estudo do comportamento dinâmico e, não obstante, do desenvolvimento de veículos e componentes automotivos.

Segundo Nardello, 2005, a complexidade do perfil das pistas pode provocar oscilações características de cada tipo de pavimento, e o comportamento do veículo quando trafega sobre um pavimento qualquer faz variar a frequência da função excitadora, além de transmitir vibração para a massa suspensa. Ainda, quanto menor a transmissibilidade de vibração das pistas para o veículo, melhor é o conforto dos passageiros, e cabe à suspensão permitir movimento relativo entre carroceria e os eixos de modo a propiciar conforto e segurança aos passageiros.

As estradas de rodagem podem assumir diferentes perfis, que dependem de uma série de parâmetros como materiais e métodos utilizados na sua construção, idade, estado de conservação, entre outros. Diferentes perfis de pista induzem diferentes forças nos veículos que trafegam pelas mesmas, o que se traduz em diferentes respostas dinâmicas.

Com os diferentes comportamentos dinâmicos do modelo numérico explicitados, e dependendo da complexidade do modelo, pode-se inferir sobre diversos parâmetros como ergonomia, acústica e dirigibilidade de um veículo, podendo ser encontradas as condições ótimas de parâmetros como a velocidade máxima permitida para o tráfego em cada tipo de pista que minimize o risco de lesões ou acidentes aos ocupantes, ou serem realizadas comparações entre as respostas dinâmicas de diferentes veículos, variando-se parâmetros como a velocidade e o perfil de pista em que trafegam.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma rotina numérico-computacional que permita a geração de sinais temporais de excitação, obtidos a partir de equações que representem as densidades espectrais de potência de diferentes perfis de pistas, e a posterior análise dinâmica de modelos de veículo distintos utilizando o sinal gerado como dado de entrada. Para tanto, constitui-se como objetivo a escolha de um método consolidado na literatura e suficientemente abrangente para a representação de diversos perfis de pista através da densidade espectral de potência.

De modo a validar a rotina desenvolvida, pretende-se realizar uma reprodução de um caso previsto em norma, utilizando os mesmos parâmetros para a geração do sinal, bem como

realizar a validação da resposta numérica dos modelos de veículo com a resposta analítica a uma excitação conhecida.

Busca-se obter o comportamento dinâmico de dois modelos de veículo, em resposta às excitações obtidas a partir de diferentes perfis de pista, bem como comparar os sinais obtidos experimentalmente em um caso previsto na literatura com as respostas dinâmicas de um dos modelos propostos, obtidas utilizando a rotina desenvolvida. Adicionalmente, pretende-se repetir o estudo para diferentes velocidades de tráfego dos veículos, de modo a possibilitar uma análise crítica comparativa envolvendo a variação dos parâmetros citados.

As rotinas numérico-computacionais desenvolvidas, tanto para a geração dos sinais temporais de excitação dos modelos de veículo, quanto para a análise dinâmica dos mesmos, são em linguagem MATLAB®.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Dodds e Robson, 1973, demonstraram que uma superfície de pista pode ser considerada aleatória, estacionária e ergódica, de modo que podem ser descritas completamente com uma única função de autocorrelação. Desta forma, uma única função densidade espectral de potência fornece uma descrição suficientemente precisa de um perfil de pista, tendo em vista a análise dinâmica de veículos. Utilizando-se desta conveniência, um modelo de classificação de pistas de diferentes rugosidades foi proposto pelos autores.

Nardello, 2005, utilizou dados experimentais para a caracterização de perfis de pista, o que foi possível através da densidade espectral de potência. Um modelo matemático de veículo e sua função resposta em frequência foram submetidos ao tráfego em diferentes perfis de pista amostrados pelo autor. Dessa forma, foi obtida a resposta dinâmica do modelo para cada um dos perfis.

Um método para a simulação digital de processos aleatórios utilizando a densidade espectral de potência foi proposto por Shinozuka e Jan, 1972. Este método é uma ferramenta eficiente, que utiliza basicamente ângulos de fase aleatórios, uma série de funções cosseno e frequências equilibradamente espaçadas para a geração do sinal.

Ciapparini, 2012, realizou experimentalmente a aquisição de sinais temporais de acelerações impostas a um ônibus por três tipos de pavimento diferentes. Os dados adquiridos foram utilizados como dados de entrada na avaliação de fadiga da carroceria do veículo em questão, representado as acelerações impostas pela pista.

A rugosidade de diferentes superfícies de pista pode ser representada através de suas densidades espectrais de potência em termos de deslocamento, como determina a norma ISO 8608 (1995). A norma especifica um padrão uniforme de representação, bem como estabelece uma classificação, que facilita a compilação e a comparação de perfis de pista diferentes.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Sistemas Amortecidos com Vários Graus de Liberdade Sujeitos a Excitações de Base

O sistema de equações diferenciais que representa o movimento dinâmico de um sistema amortecido com vários graus de liberdade, submetido a uma aceleração em sua base, pode ser escrito como [Rao, 1995]:

$$M\ddot{\vec{x}}(t) + C\dot{\vec{x}}(t) + K\vec{x}(t) = -M\ddot{\vec{y}}_g(t) \quad (4.1)$$

onde t é o tempo, $\ddot{\vec{y}}_g(t)$ é o vetor de acelerações impostas pelo solo em função do tempo, $\ddot{\vec{x}}(t)$ é o vetor de acelerações do sistema em função do tempo, $\dot{\vec{x}}(t)$ é o vetor de velocidades do sistema em função do tempo, $\vec{x}(t)$ é o vetor de deslocamentos do sistema em função do tempo, M é a matriz de massa do sistema, C é a matriz de amortecimento do sistema e K é a matriz de rigidez do sistema.

4.2 Função de Autocorrelação

A função de autocorrelação representa quanto o sinal é correlacionado com o próprio sinal, em instantes de tempo diferentes. Para processos aleatórios e estacionários, a função de autocorrelação é invariante no tempo e é definida por Newland, 1987, como sendo:

$$R_x(t) = E[x(t)x(t + \tau)] \quad (4.2)$$

onde $R_x(t)$ é a função de autocorrelação, $x(t)$ é o valor do sinal em um instante de tempo t , $x(t + \tau)$ é o valor do sinal em um instante de tempo posterior a t e $E[\]$ é o valor médio ou função expectativa.

Os valores de autocorrelação podem variar entre -1 e 1, com o valor igual a -1 correspondendo a uma anti-correlação perfeita, o valor zero a uma completa ausência de correlação, e o valor 1 correspondendo a uma correlação perfeita.

4.3 Densidade Espectral de Potência

Segundo Bendat e Piersol, 1971, a densidade espectral de potência (PSD – *Power Spectral Density*) descreve a composição em frequência de um dado aleatório em termos da densidade espectral do seu valor médio quadrático. Ou seja, representa o quadrado das contribuições infinitesimais do sinal aleatório de interesse nas diferentes frequências, expressas em função da frequência.

Para um processo estacionário, a relação entre a PSD bilateral e a função de autocorrelação pode ser feita através da transformada de Fourier, da seguinte forma:

$$S_x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (4.3)$$

onde f é a frequência, $S_x(f)$ é a densidade espectral de potência bilateral e $R_x(\tau)$ é a função de autocorrelação.

Nos problemas estruturais, não há sentido físico para frequências negativas, de modo que nestes casos apenas as frequências positivas da PSD são utilizadas. Dessa forma, a PSD se denomina unilateral e é ilustrada na Figura 4.1 (no Anexo), podendo ser obtida de acordo com a equação:

$$G_x(f) = 2S_x(f) \quad ; \quad 0 \leq f \leq \infty \quad (4.4)$$

onde $G_x(f)$ é a densidade espectral de potência unilateral.

4.4 Transformada Rápida de Fourier

De acordo com Bendat e Piersol, 1971, quando um fenômeno físico é abordado em termos de um processo aleatório, as médias calculadas sobre o conjunto de funções amostra que descrevem o processo descrevem as propriedades estatísticas deste fenômeno para qualquer instante de tempo. Se os valores da média e correlação de um processo aleatório forem invariantes para um dado instante de tempo, o sinal é dito aleatório e estacionário. Quando um sinal temporal é classificado como aleatório, estacionário e ergódico, as propriedades avaliadas ao longo de um intervalo de tempo são iguais e independentes da função amostrada, ou seja, suas propriedades são invariantes para qualquer amostra retirada do sinal.

Em sinais aleatórios, estacionários e ergódicos, pode-se obter o espectro do sinal através da Transformada Rápida de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transform*). A Transformada Rápida de Fourier calcula os valores em pontos discretos de um sinal temporal, e realiza uma

integração numérica entre os limites fixados. Dessa forma, a FFT determina o espectro, no domínio da frequência, de um sinal temporal, sendo o espectro resultante também discreto. O procedimento inverso é denominado como FFT inversa.

4.5 Método das Diferenças Finitas Centrais

O método das diferenças finitas centrais é um método explícito de integração numérica do tipo passo a passo. Ele é baseado na expressão de diferenças finitas no tempo, para velocidades e acelerações. Segundo Bathe, 1996, o método das diferenças finitas centrais é composto pelas seguintes equações:

$$\vec{u}_n = \frac{\vec{u}_{n+1} - \vec{u}_{n-1}}{2\Delta t} \quad (4.5)$$

$$\vec{u}_n = \frac{1}{\Delta t^2} (\vec{u}_{n+1} - 2\vec{u}_n + \vec{u}_{n-1}) \quad (4.6)$$

onde \vec{u}_n é o vetor de deslocamentos no instante de tempo t_n , \vec{u}_n é o vetor de velocidades no instante de tempo t_n , \vec{u}_n é o vetor de acelerações no instante de tempo t_n , \vec{u}_{n+1} é o vetor de deslocamentos no instante de tempo $t_n + \Delta t$, \vec{u}_{n+1} é o vetor de velocidades no instante de tempo $t_n + \Delta t$, \vec{u}_{n+1} é o vetor de acelerações no instante de tempo $t_n + \Delta t$, \vec{u}_{n-1} é o vetor de deslocamentos no instante de tempo $t_n - \Delta t$ e \vec{u}_{n-1} é o vetor de velocidades no instante de tempo $t_n - \Delta t$.

O intervalo de integração Δt deve ser menor ou igual a um valor crítico, Δt_{cr} , para que a estabilidade do método seja assegurada. Quanto menor o valor de Δt , maior é a precisão da solução, entretanto, maior é seu custo computacional. O valor crítico do intervalo de integração é definido por:

$$\Delta t_{cr} = \frac{2}{\omega_{nn}} \quad (4.7)$$

onde ω_{nn} é a maior frequência natural do sistema.

4.6 Método de Newmark

O método proposto por Newmark, 1959, é um método implícito de integração numérica do tipo passo a passo, ou seja, considera a condição de equilíbrio no próprio instante $(t + \Delta t)$. Segundo Ciapparini, 2012, *softwares* comerciais de elementos finitos utilizam o Método de Newmark para soluções de problemas dinâmicos. As expressões que representam a variação do deslocamento, velocidade e aceleração no instante $t + \Delta t$ são:

$$\vec{x}(t_{i+1}) = (a_0 M + a_5 C + K)^{-1} \{ F(t_{i+1}) + M [a_0 \vec{x}(t_i) + a_1 \dot{\vec{x}}(t_i) + a_2 \ddot{\vec{x}}(t_i)] + C [a_5 \vec{x}(t_i) + a_6 \dot{\vec{x}}(t_i) + a_7 \ddot{\vec{x}}(t_i)] \} \quad (4.8)$$

$$\dot{\vec{x}}(t_{i+1}) = a_5 [\vec{x}(t_{i+1}) - \vec{x}(t_i)] - a_6 \dot{\vec{x}}(t_i) - a_7 \ddot{\vec{x}}(t_i) \quad (4.9)$$

$$\ddot{\vec{x}}(t_{i+1}) = a_0 [\vec{x}(t_{i+1}) - \vec{x}(t_i)] - a_1 \dot{\vec{x}}(t_i) \quad (4.10)$$

onde $\vec{x}(t_i)$ é o vetor de deslocamentos no instante de tempo t_i , $\dot{\vec{x}}(t_i)$ é o vetor de velocidades no instante de tempo t_i , $\ddot{\vec{x}}(t_i)$ é o vetor de acelerações no instante de tempo t_i , $\vec{x}(t_{i+1})$ é o vetor de deslocamentos no instante de tempo $t_i + \Delta t$, $\dot{\vec{x}}(t_{i+1})$ é o vetor de velocidades no instante de tempo $t_i + \Delta t$, $\ddot{\vec{x}}(t_{i+1})$ é o vetor de acelerações no instante de tempo $t_i + \Delta t$ e $\vec{F}(t_{i+1})$ é o vetor de forças de excitação do sistema no instante de tempo $t_i + \Delta t$.

As constantes a_k consistem em parâmetros associados ao método de Newmark, dados pelo conjunto de equações 4.11:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{\alpha \Delta t^2} ; a_1 = \frac{1}{\alpha \Delta t} ; a_2 = \frac{1}{2\alpha} - 1 ; a_3 = (1 - \delta) \Delta t \\ a_4 &= \delta \Delta t ; a_5 = \frac{\delta}{\alpha \Delta t} ; a_6 = \frac{\delta}{\alpha} - 1 ; a_7 = \left(\frac{\delta}{\alpha} - 2 \right) \end{aligned} \quad (4.11)$$

O método torna-se incondicionalmente estável na solução de problemas lineares ao se utilizar $\delta=0,5$ e $\alpha=0,25$. As condições iniciais dos vetores de deslocamentos e velocidades devem ser conhecidas para o primeiro passo de tempo. O vetor de acelerações iniciais, $\vec{\ddot{x}}(t_0)$, é dado pela equação 4.12:

$$\vec{\ddot{x}}(t_0) = M^{-1}[\vec{F}(t_0) - C\vec{\dot{x}}(t_0) - K\vec{x}(t_0)] \quad (4.12)$$

onde t_0 é o instante de tempo inicial, $\vec{\ddot{x}}(t_0)$ é o vetor de acelerações iniciais, $\vec{\dot{x}}(t_0)$ é o vetor de velocidades iniciais, $\vec{x}(t_0)$ é o vetor de deslocamentos iniciais e $\vec{F}(t_0)$ é o vetor de forças de excitação iniciais.

5. METODOLOGIA

5.1 Generalidades

Os procedimentos utilizados para a obtenção dos resultados se dividem em duas etapas, ilustradas na figura 5.1 (no apêndice), sendo desenvolvida uma rotina numérico-computacional para cada uma delas. A primeira etapa consiste na geração do sinal de acelerações impostas aos veículos que trafegam em diversas velocidades, consideradas constantes, por diferentes perfis de pista, representando desde uma rodovia de asfalto em ótimas condições até uma estrada secundária, não pavimentada, em péssimas condições. A segunda etapa consiste na análise dinâmica de dois modelos de veículo, representando um automóvel de passeio e um caminhão, de modo a obter suas respostas dinâmicas às excitações impostas pelos diferentes tipos de pistas.

A etapa de geração do sinal é composta pelos seguintes passos: entrada de dados, pré-solução, solução e saída dos resultados. Na entrada de dados são inseridos os dados do problema, sendo eles o vetor de frequências espaciais, o vetor de tempo, a frequência espacial de referência, a velocidade do veículo, o expoente da equação da densidade espectral de potência ajustada e os valores das densidades espectrais de potência de referência. No pré-processamento, são calculadas as densidades espectrais de potência no domínio da frequência espacial e no domínio da frequência temporal, bem como o vetor de ângulos aleatórios. Na solução, é realizada a geração do sinal temporal de deslocamento através do método de Shinozuka [Shinozuka e Jan, 1972], e a obtenção do sinal temporal de aceleração a partir do sinal temporal de deslocamento pelo método das diferenças finitas centrais, descrito na Seção 4.5. Na saída dos resultados, são plotados os gráficos temporais de deslocamentos e acelerações, e salvos os dados dos sinais gerados para serem utilizados na etapa seguinte.

A etapa de análise dinâmica é composta pelos mesmos passos da etapa de geração do sinal, entretanto, eles ocorrem de maneira distinta. Na entrada de dados, importam-se os sinais de aceleração obtidos na primeira etapa, e são inseridos o vetor de frequências espaciais, a velocidade do veículo, o vetor de tempo, as matrizes de massa, rigidez e amortecimento do veículo, as constantes do método de Newmark, e os vetores de deslocamentos, velocidades e acelerações iniciais. No pré-processamento, calcula-se o vetor de frequências temporais e os vetores de forças de excitação induzidas pelos diferentes perfis de pista. Na solução, utiliza-se o método de Newmark, descrito na Seção 4.6, para a obtenção das respostas dinâmicas dos veículos em termos de deslocamento, velocidade e aceleração, para cada um dos perfis de

pista, bem como são calculados seus valores máximos absolutos e médios quadráticos. Por fim, na saída dos resultados, são plotados os gráficos temporais dos parâmetros citados, bem como geradas tabelas que contém os valores máximos absolutos e médios quadráticos, para cada perfil de pista.

As rotinas computacionais desenvolvidas para as etapas de geração do sinal e de análise dinâmica foram desenvolvidas na linguagem MATLAB®. A metodologia desenvolvida é exposta mais detalhadamente a seguir.

5.2 Geração do Sinal

5.2.1 Representação de Diferentes Perfis de Pistas

Diversos autores como Braun *et al.*, 1966, Dodds e Robson, 1973, Honda *et al.*, 1982 e Gobbi e Mastinu, 2001, desenvolveram modelos que permitissem a representação de diferentes perfis de pista utilizando densidades espectrais de potência. Entretanto, a padronização deste método se deu através da norma ISO 8608 (1995), que permite uma representação uniforme de pistas de diferentes rugosidades.

De acordo com o método de classificação da norma supracitada, a relação entre a PSD de deslocamento vertical e a frequência espacial de diferentes categorias de pistas pode ser aproximada por uma reta decrescente, em um gráfico de escalas logarítmicas. A Figura 5.2 (no Anexo) ilustra o sistema de classificação descrito, que divide as classes de pistas em ordem alfabética crescente, de acordo com o aumento da rugosidade. Desse modo, a relação entre a PSD de deslocamento e a frequência espacial é definida como:

$$G_d(n) = G_d(n_0) \cdot \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-w} \quad (5.1)$$

onde n_0 é a frequência espacial de referência em ciclos/m, n é a frequência espacial em ciclos/m, w é o expoente que determina a inclinação da PSD ajustada, $G_d(n_0)$ é a PSD de referência em m^3 e $G_d(n)$ é a PSD de deslocamento em termos da frequência espacial em m^3 .

A frequência espacial de referência, n_0 , é definida pela ISO 8608 (1995) como 0,1 ciclos/m. Ao se utilizar um expoente w igual a 2, obtém-se uma PSD de velocidade constante, o que representa, para fins de simulação, que o veículo trafega com uma velocidade constante. A faixa de frequências espaciais prevista na norma ISO 8608 (1995) para descrever o comportamento dinâmico de veículos varia entre 0,011 e 2,83 ciclos/m. A PSD de velocidade, em m, é dada por:

$$G_v(n) = G_d(n) \cdot (2\pi n)^2 \quad (5.2)$$

A frequência temporal se relaciona com a frequência espacial da seguinte forma:

$$f = n \cdot v \quad (5.3)$$

onde f é a frequência temporal, em Hz e v é a velocidade do veículo, em m/s.

De acordo com Reza-Kashyzadeh *et al.*, 2014, as PSDs de deslocamento, em termos de frequência espacial e temporal, se relacionam da seguinte forma:

$$G_d(f) = \frac{G_d(n)}{v} \quad (5.4)$$

onde $G_d(f)$ é a PSD de deslocamento em termos da frequência temporal, em m^2/s .

Uma estimativa do grau de rugosidade da pista pode ser obtida a partir do valor da PSD de referência, $G_d(n_0)$. Cada classe de pista é constituída por um intervalo de valores deste parâmetro, entretanto, utiliza-se o valor médio deste intervalo para efeitos de simulação. A

Tabela 5.1 fornece os intervalos e os valores médios da PSD de referência, bem como os valores da PSD de velocidade, para diferentes classes de pistas.

Tabela 5.1 – Intervalos e valores médios da densidade espectral de potência (PSD) de referência em termos de deslocamento, e valores médios da densidade espectral de potência (PSD) de referência em termos de velocidade, para diferentes classes de pistas.

Classe da Pista	Grau de rugosidade			
	$G_d(n_0)^{(1)}$ [10^{-6} m^3]			$G_v(n)$ [10^{-6} m]
	Limite inferior	Média geométrica	Limite superior	Média Geométrica
A	-	16	32	6,3
B	32	64	128	25,3
C	128	256	512	101,1
D	2048	1024	2048	404,3
E	2048	4096	8192	1617,0
F	8192	16384	32768	6468,1
G	32768	65536	131072	25872,6
H	131072	262144	-	103490,3

⁽¹⁾ $n_0=0,1$ ciclos/m

Fonte: ISO 8608, 1995.

De acordo com Ding *et al.*, 2009, dentre as 8 classes previstas na norma ISO 8608 (1995), as classes A a D descrevem condições de rodovias pavimentadas, e as classes de E a H de rodovias não pavimentadas. Segundo Ngwangwa *et al.*, 2010, as PSDs a partir da classe F são previstas na classificação ISO somente para fins teóricos, visto que encontram-se fora dos limites práticos de rugosidade de pistas. Dodds e Robson, 1973, especificam uma classificação composta por 3 grupos: rodovias, estradas principais e estradas secundárias, e cada grupo é classificado qualitativamente de acordo com o intervalo da PSD de referência. Considerando o exposto pelos autores supracitados, omitem-se as pistas de classes F, G e H da metodologia de geração de sinal do presente trabalho, e classificam-se as rodovias da forma apresentada na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Classificação ISO, descrição e grau de densidade espectral de potência (PSD) de referência em termos de deslocamento, para os 5 perfis de pista considerados no presente trabalho.

Classificação ISO	Condições da pista	Grau de rugosidade - $G_d(n_0)^{(1)}$ [10^{-6} m^3]
A	Rodovia ou estrada principal em boas condições	16
B	Estrada principal ou secundária em condições regulares	64
C	Estrada principal ou secundária em condições ruins	256
D	Estrada secundária em péssimas condições	1024
E	Estrada não pavimentada	4096

Definidas as 5 classes de pistas a serem consideradas, determinaram-se 5 velocidades constantes do veículo para a geração dos sinais: 30, 50, 70, 90 e 110 km/h. Dessa forma foram obtidas 25 PSDs de deslocamento em termos de frequência, ao se combinarem as diferentes velocidades do veículo com as diferentes classes de pistas.

5.2.2 Obtenção do Sinal de Deslocamento

A partir das PSDs de deslocamento em termos de frequência temporal obtidas, utilizou-se o método proposto por Shinozuka e Jan, 1972, para a geração dos sinais de deslocamento. Este método utiliza a densidade espectral de potência para a simulação digital de processos aleatórios. Sua equação, adaptada para as nomenclaturas definidas no presente trabalho, é dada por:

$$\vec{y}(t) = \sum_{k=1}^N \sqrt{2G_d(f_k)\Delta f_k} \cos(2\pi f_k t + \psi_k) \quad (5.5)$$

onde $\vec{y}(t)$ é o sinal de deslocamento temporal imposto pela pista em m, N é o número de intervalos da banda de frequências, ψ_k é o ângulo de fase em rad, $\Delta f_k = f_{k+1} - f_k$ é o intervalo de variação da frequência em Hz.

O ângulo de fase consiste em uma variável aleatória entre 0 e 2π , com função distribuição de probabilidade uniforme.

5.2.3 Validação da Metodologia de Geração de Sinal

Com o objetivo de validar a rotina desenvolvida para a geração do sinal de deslocamento imposto pela pista, reproduz-se um dos casos do relatório utilizado como exemplo na norma ISO 8608 (1995). Os valores médios quadráticos apresentados para o deslocamento e a velocidade impostos pela pista são de 0,0359 m e 0,0301 m/s, respectivamente. Os parâmetros de entrada apresentados são: velocidade do veículo, $v = 90$ km/h; distância percorrida, $\Delta x = 3571$ m; frequência espacial mínima, $n_{min} = 0,011$ ciclos/m; intervalo de variação da frequência espacial, $\Delta n = 0,0055$ ciclos/m; frequência espacial máxima, $n_{max} = 2,83$ ciclos/m; frequência espacial de referência, $n_0 = 0,1$ ciclos/m; PSD de referência, $G_d(n_0) = 830 \times 10^{-6} \text{m}^3$ e expoente da PSD ajustada, $w = 2,22$.

Utilizando os mesmos valores dos parâmetros explicitados acima como dados de entrada na rotina desenvolvida, os resultados obtidos para os valores médios quadráticos para o deslocamento e a velocidade impostos pela pista foram de 0,0368 m e 0,0304 m/s, respectivamente. Visto que os resultados se mostraram muito próximos dos valores apresentados no relatório, ratifica-se que o programa de geração do sinal produz sinais temporais de deslocamento consistentes.

5.2.4 Obtenção do Sinal de Aceleração

A partir dos diferentes perfis de irregularidades das pistas gerados, podem-se obter os sinais de aceleração impostos pela pista ao veículo utilizando o método das diferenças finitas centrais, descrito anteriormente. Assim, foram obtidos os 25 sinais temporais de aceleração impostos aos veículos pelos 5 diferentes perfis de pistas e para as 5 velocidades propostas, que são utilizados na etapa de análise dinâmica dos modelos de veículo. Estes sinais de aceleração compõem a saída de resultados da rotina de geração do sinal, e serão utilizados na rotina de análise dinâmica como dados de entrada.

O tempo considerado para a geração dos sinais de aceleração é de 50 segundos, considerado suficiente para a determinação das respostas dinâmicas dos veículos levando em consideração o caráter aleatório de irregularidade das pistas.

5.3 Análise Dinâmica

5.3.1 Determinação dos Modelos Numéricos de Veículo

De modo a obter respostas dinâmicas que permitam uma análise comparativa entre diferentes tipos de veículos, determinaram-se dois modelos de $\frac{1}{4}$ de veículo a serem utilizados

na etapa de análise dinâmica: um representando um automóvel de passeio, e outro representando um caminhão de pequeno porte.

Utilizou-se, para o automóvel de passeio, o modelo proposto por Reza-Kashyzadeh *et al.*, 2014. Este modelo utiliza os parâmetros físicos representativos de um automóvel da marca Peugeot, modelo 206. Para a representação do caminhão, utilizou-se o modelo proposto por Sun, 2001, com os parâmetros físicos representativos de um caminhão da marca IVECO, modelo indeterminado. A Figura 5.3 (no Apêndice) ilustra o modelo de $\frac{1}{4}$ de veículo, e a Tabela 5.3 especifica os valores dos parâmetros físicos dos modelos utilizados. As matrizes de massa, rigidez e amortecimento são obtidas através das relações expostas na figura 5.4 (no apêndice).

Tabela 5.3 – Valores dos parâmetros físicos dos modelos de veículo utilizados na análise dinâmica.

Parâmetro físico	Nomenclatura (unidade)	Valores numéricos do automóvel	Valores numéricos do caminhão
Massa de 1/4 da carroceria	m_2 (kg)	340	578
Massa do conjunto pneu, roda e eixo	m_1 (kg)	25	32
Constante elástica da suspensão	k_2 (N/m)	24000	118490
Constante elástica do conjunto pneu, roda e eixo	k_1 (N/m)	192000	165372
Coefficiente de amortecimento da suspensão	c_2 (Ns/m)	850	300
Coefficiente de amortecimento do conjunto pneu, roda e eixo	c_1 (Ns/m)	12000	302

5.3.2 Validação dos Métodos Numéricos de Obtenção da Resposta Dinâmica

A rotina numérico-computacional desenvolvida utiliza o método implícito para a obtenção da solução numérica proposto por Newmark, 1959. Com o objetivo de validar o método numérico de obtenção da resposta dinâmica, submetem-se os modelos de veículos propostos a uma aceleração de excitação senoidal obtida a partir de um perfil de pista senoidal de amplitude e frequência conhecidas. Visto que a solução analítica de um modelo de 2 graus de liberdade em resposta a uma aceleração senoidal em sua base é conhecida, pode-se comparar os resultados obtidos analiticamente com os obtidos na rotina de análise dinâmica desenvolvida. Os dados de entrada considerados para a validação são: amplitude da superfície, $Y = 0,05$ m; comprimento de onda, $l = 10$ m e velocidade do veículo, $v = 70$ km/h.

Verificada a convergência da resposta numérica para a resposta analítica para ambos os modelos de veículo propostos, considera-se que a rotina desenvolvida para a análise dinâmica produz resultados consistentes. A Figura 5.5 (no apêndice) ilustra os resultados de deslocamento relativo em função do tempo, obtidos analítica e numericamente, para o modelo de automóvel proposto.

5.3.3 Obtenção das Respostas Dinâmicas

Após a validação da rotina desenvolvida na segunda etapa, utilizaram-se os sinais temporais de aceleração obtidos na primeira etapa como dados de entrada para a análise dinâmica. Aliando estes sinais com os dois modelos de $\frac{1}{4}$ de veículo propostos, obteve-se um conjunto de 50 respostas dinâmicas. Cada resposta é composta por sinais temporais do comportamento dinâmico dos dois graus de liberdade dos modelos de veículo considerados,

em termos de deslocamento, velocidade e aceleração. Por fim, foi possível extrair os valores máximos absolutos e médios quadráticos do comportamento da carroceria do veículo, para os três parâmetros citados, de cada uma das respostas dinâmicas obtidas. Organizaram-se os resultados em tabelas para melhor visualização, de modo a facilitar a análise comparativa entre os mesmos.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir das rotinas desenvolvidas, bem como é feita uma comparação dos resultados com dados experimentais encontrados na literatura. Por fim, é feita uma análise comparativa entre todos os resultados obtidos na etapa de análise dinâmica, comparando o comportamento da carroceria dos modelos de veículos com a variação dos parâmetros velocidade e rugosidade da pista.

A fim de evitar repetições, os resultados ilustrados nas figuras consideram todos os perfis de pista propostos, porém somente o valor de 30 km/h para a velocidade do veículo. A obtenção dos sinais de aceleração imposta pelas pistas para as outras velocidades se dá de maneira idêntica, apenas modificando o valor da velocidade do veículo na entrada de dados.

O primeiro procedimento executado pela rotina, após a entrada de dados, é o cálculo das densidades espectrais de potência de deslocamento, em função da frequência espacial, que representam as 5 classes de pista propostas. As PSDs de deslocamento em função da frequência temporal são obtidas em seguida, utilizando a equação 5.4 descrita anteriormente, e ambas são apresentadas na Figura 6.1 (no apêndice).

A partir das PSDs de deslocamento em função da frequência temporal, são obtidos os sinais temporais de irregularidade das pistas. Estes sinais representam o deslocamento imposto por cada perfil de pista à base do modelo de veículo. Através da aplicação do método das diferenças finitas centrais nestes sinais, obtém-se o sinal temporal das acelerações impostas ao veículo pelas diferentes classes de pavimentos. A Figura 6.2 (no apêndice) ilustra ambos os conjuntos de sinais temporais gerados.

Com os sinais temporais de aceleração gerados foi possível extrair seus valores máximos absolutos e médios quadráticos (RMS), para todas as velocidades de veículo e classes de pistas propostas, que são representados pelas Tabelas 6.1 e 6.2, respectivamente. Os dados são agrupados de modo a permitir uma melhor visualização do efeito causado pela variação dos parâmetros considerados.

Tabela 6.1 - Acelerações máximas absolutas em m/s^2 impostas por diferentes classes de pistas a veículos trafegando em diferentes velocidades.

	30 km/h	50 km/h	70 km/h	90 km/h	110 km/h
Classe A	6,62	9,90	11,30	14,50	16,40
Classe B	13,25	19,80	22,60	29,00	32,80
Classe C	26,50	39,70	45,30	58,00	65,60
Classe D	52,99	79,30	90,50	115,90	131,10
Classe E	106,00	158,60	181,10	231,80	262,30

Tabela 6.2 - Acelerações médias quadráticas (RMS) em m/s^2 impostas por diferentes classes de pistas a veículos trafegando em diferentes velocidades.

	30 km/h	50 km/h	70 km/h	90 km/h	110 km/h
Classe A	1,97	3,04	3,63	4,17	4,73
Classe B	3,94	6,08	7,26	8,35	9,47
Classe C	7,89	12,17	14,52	16,71	18,94
Classe D	15,78	24,34	29,04	33,42	37,88
Classe E	31,56	48,69	58,08	66,84	75,76

Utilizando os sinais temporais de aceleração como excitações na base dos dois modelos de veículo propostos, podem-se obter as respostas dinâmicas em termos de deslocamento, velocidade e aceleração verticais relativos para os dois graus de liberdade (GDL) dos modelos de veículos propostos. As respostas dinâmicas, em termos de deslocamentos verticais relativos, dos modelos de automóvel e caminhão são apresentadas nas Figuras 6.3 e 6.4 (no apêndice), respectivamente. Estas figuras ilustram os sinais temporais de deslocamento relativo tanto do conjunto roda e pneu (GDL 1) quanto da carroceria (GDL 2) dos modelos de veículo propostos e, a fim de evitar repetições, apenas para o perfil de pista de classe C e para a velocidade de 30 km/h.

De posse das respostas dinâmicas, extraíram-se seus valores máximos absolutos e médios quadráticos. Os valores máximos absolutos das respostas dinâmicas da carroceria (GDL 2) dos modelos de veículos em termos de deslocamento, d_{max} , velocidade, v_{max} , e aceleração, a_{max} , são expostos na Tabela 6.3, para o modelo de automóvel, e 6.4, para o modelo de caminhão. São dispostos os resultados obtidos para todas as velocidades dos veículos e perfis de pista propostos.

Tabela 6.3 - Valores máximos absolutos dos deslocamentos, velocidades e acelerações verticais relativos da resposta dinâmica da carroceria do modelo de automóvel, trafegando a diferentes velocidades em todos os perfis de pista propostos.

		30 km/h			50 km/h			70 km/h			90 km/h			110 km/h		
		d_{max} (mm)	v_{max} (m/s)	a_{max} (m/s ²)												
Classe	A	6,5	0,1	6,9	9,9	0,1	10,3	13,7	0,2	11,4	15,4	0,2	14,6	12,2	0,2	16,4
	B	13,0	0,2	13,8	19,7	0,2	20,6	27,5	0,3	22,7	30,9	0,4	29,2	24,3	0,4	32,8
	C	25,9	0,4	27,7	39,4	0,5	41,3	55,0	0,7	45,5	61,8	0,7	58,3	48,6	0,7	65,6
	D	51,9	0,8	55,4	78,9	1,0	82,6	110,0	1,3	90,9	123,5	1,4	116,7	97,2	1,4	131,2
	E	103,7	1,6	110,7	157,7	2,0	165,1	219,9	2,7	181,8	247,0	2,9	233,3	194,5	2,9	262,4

Tabela 6.4 - Valores máximos absolutos dos deslocamentos, velocidades e acelerações verticais relativos da resposta dinâmica da carroceria do modelo de caminhão, trafegando a diferentes velocidades em todos os perfis de pista propostos.

		30 km/h			50 km/h			70 km/h			90 km/h			110 km/h		
		d_{max} (mm)	v_{max} (m/s)	a_{max} (m/s ²)												
Classe	A	15,9	0,2	6,9	19,2	0,2	10,2	29,2	0,3	12,9	34,4	0,4	15,7	25,2	0,3	17,6
	B	31,9	0,4	13,9	38,3	0,5	20,4	58,4	0,7	25,8	68,9	0,9	31,4	50,3	0,7	35,3
	C	63,7	0,8	27,8	76,7	1,0	40,8	116,8	1,4	51,6	137,8	1,7	62,8	100,6	1,3	70,5
	D	127,4	1,7	55,6	153,4	1,9	81,7	233,6	2,7	103,3	275,6	3,4	125,5	201,2	2,7	141,0
	E	254,9	3,3	111,2	306,7	3,9	163,4	467,1	5,4	206,5	551,1	6,9	251,0	402,5	5,4	282,0

Os valores médios quadráticos das respostas dinâmicas da carroceria (GDL 2) dos modelos de veículo em termos de deslocamento, d_{RMS} , velocidade, v_{RMS} , e aceleração, a_{RMS} , são expostos na Tabela 6.5, para o modelo de automóvel, e 6.6, para o modelo de caminhão. São dispostos os resultados obtidos para todas as velocidades de veículo e perfis de pista propostos.

Tabela 6.5: Valores médios quadráticos (RMS) dos deslocamentos, velocidades e acelerações verticais relativos da resposta dinâmica da carroceria do modelo de automóvel, trafegando a diferentes velocidades em todos os perfis de pista propostos.

		30 km/h			50 km/h			70 km/h			90 km/h			110 km/h		
		d_{RMS} (mm)	v_{RMS} (m/s)	a_{RMS} (m/s ²)												
Classe	A	2,3	0,0	2,0	2,9	0,0	3,1	3,5	0,0	3,7	4,1	0,1	4,2	4,4	0,1	4,8
	B	4,6	0,1	4,0	5,9	0,1	6,2	6,9	0,1	7,3	8,3	0,1	8,5	8,8	0,1	9,6
	C	9,2	0,1	8,0	11,8	0,2	12,3	13,8	0,2	14,7	16,5	0,2	16,9	17,5	0,2	19,1
	D	18,5	0,2	16,0	23,5	0,3	24,6	27,7	0,4	29,4	33,1	0,4	33,8	35,1	0,5	38,3
	E	36,9	0,5	32,0	47,0	0,6	49,2	55,3	0,7	58,7	66,2	0,9	67,6	70,1	0,9	76,6

Tabela 6.6 - Valores médios quadráticos (RMS) dos deslocamentos, velocidades e acelerações verticais relativos da resposta dinâmica da carroceria do modelo de caminhão, trafegando a diferentes velocidades em todos os perfis de pista propostos.

		30 km/h			50 km/h			70 km/h			90 km/h			110 km/h		
		d_{RMS} (mm)	v_{RMS} (m/s)	a_{RMS} (m/s ²)												
Classe	A	6,6	0,1	2,2	7,4	0,1	3,2	12,3	0,1	4,0	10,0	0,1	4,4	11,0	0,1	5,0
	B	13,1	0,2	4,3	14,9	0,2	6,4	24,7	0,3	7,9	19,9	0,2	8,8	21,9	0,3	9,9
	C	26,2	0,3	8,6	29,8	0,3	12,8	49,4	0,6	15,8	39,8	0,5	17,6	43,9	0,5	19,9
	D	52,5	0,6	17,3	59,5	0,7	25,7	98,8	1,1	31,6	79,7	0,9	35,2	87,7	1,0	39,7
	E	104,9	1,2	34,5	119,0	1,4	51,4	197,5	2,2	63,3	159,4	1,9	70,4	175,5	2,0	79,4

Os valores médios quadráticos da aceleração imposta pela pista, obtidos experimentalmente por Ciapparini, 2012, consideram um veículo trafegando a 80 km/h em um trecho de asfalto em estado mediano de conservação, bem como o mesmo veículo trafegando a 30 km/h em um trecho de estrada de chão batido. Os perfis descritos por este autor correspondem às classes B e E propostas no presente trabalho. O referido autor coletou os dados através de quatro acelerômetros instalados nos cubos das rodas de um ônibus.

Uma comparação entre os dados experimentais medidos por Ciapparini, 2012, com as respostas dinâmicas em termos de aceleração do conjunto roda e pneu (GDL 1) do modelo de caminhão obtidas numericamente neste trabalho, permite realizar uma avaliação aproximada da capacidade da rotina desenvolvida de retratar o comportamento real dos veículos. Os resultados obtidos por Ciapparini, 2012, são dispostos na Tabela 6.7. Foram omitidos os valores coletados nas rodas traseiras, pois o eixo traseiro do veículo utilizado pelo autor possui duplo rodado, já o modelo de caminhão considerado neste estudo considera a parte dianteira do veículo, com rodado simples.

Tabela 6.7 - Acelerações médias quadráticas obtidas por Ciapparini, 2012.

Entrada do Sinal	Asfalto - 80 km/h a_{RMS} (m/s ²)	Estrada de chão - 30 km/h a_{RMS} (m/s ²)
Roda dianteira lado esquerdo	9,73	49,85
Roda dianteira lado direito	7,60	48,25

Os sinais temporais de aceleração obtidos por Ciapparini, 2012, para o trecho de asfalto e o trecho de estrada de chão, considerando os dados coletados na roda dianteira esquerda, são ilustrados nas Figuras 6.5 e 6.6 (no apêndice), respectivamente.

Reproduzindo o caso relatado por Ciapparini, 2012, com a rotina desenvolvida no presente trabalho e utilizando o modelo de caminhão proposto, foram obtidos os sinais temporais de aceleração no GDL 1 do modelo, representando o conjunto roda e pneu. Os sinais temporais de aceleração obtidos, considerando as mesmas velocidades e os perfis de pista de classes B e E, condizentes com as características dos pavimentos descritos pelo referido autor, são ilustrados nas Figuras 6.7 e 6.8 (no Apêndice), respectivamente.

Os valores médios quadráticos dos sinais obtidos pela rotina numérica são de $9,89 \text{ m/s}^2$ para o trecho de asfalto, e $43,64 \text{ m/s}^2$ para o trecho de estrada de chão. Os valores das frequências preferenciais são de $11,99 \text{ Hz}$ para a pista de classe B, e $12,43 \text{ Hz}$ para a pista de classe E, valores muito próximos das frequências encontradas pelo referido autor. A semelhança entre os resultados encontrados é uma forte evidência de que a rotina desenvolvida produz resultados consistentes.

Utilizando os valores médios quadráticos dos resultados obtidos, é possível realizar comparações entre os comportamentos dinâmicos dos veículos, bem como entre as acelerações impostas pelos diferentes tipos de pavimento, em resposta à variação dos parâmetros rugosidade da pista e velocidade do veículo.

Acelerações impostas pelos diferentes perfis de pistas aumentam linearmente em conjunto à rugosidade da pista, porém aumentam de maneira não-linear com o aumento da velocidade dos veículos, com variações mais bruscas de sua magnitude ocorrendo em baixas velocidades.

Os parâmetros deslocamento, velocidade e aceleração da resposta dinâmica do automóvel resultaram menores que os do caminhão nas mesmas faixas de velocidade, para qualquer perfil de pista. A razão entre os valores RMS das respostas dinâmicas do caminhão e do automóvel, para cada um dos 3 parâmetros, são constantes para os diferentes perfis de pista, considerando que os veículos estejam trafegando à mesma velocidade. Entretanto, esta razão se comporta de maneira não linear com o aumento linear da velocidade dos veículos. Este comportamento está explicitado na Tabela 6.8.

Tabela 6.8 - Razão entre os valores médios quadráticos (RMS) das respostas dinâmicas do caminhão e do automóvel em resposta a uma excitação causada pelos mesmos perfis de pista.

Velocidade dos veículos	Deslocamento*	Velocidade*	Aceleração*
30 km/h	2,842	2,519	1,077
50 km/h	2,530	2,242	1,043
70 km/h	3,569	3,012	1,077
90 km/h	2,409	2,182	1,041
110 km/h	2,502	2,179	1,037

*Razão adimensional entre os valores médios quadráticos das respostas do caminhão e do automóvel em termos das variáveis em destaque (deslocamento, velocidade e aceleração).

Cabe salientar que os valores máximos da razão apresentada acima ocorrem na faixa dos 70 km/h. Isto significa que a maior diferença entre parâmetros como dirigibilidade e conforto dos dois veículos propostos pode ser percebida mais facilmente pelos ocupantes nesta faixa de velocidades.

Uma análise quanto à sensibilidade dos parâmetros das respostas dinâmicas em relação ao aumento da velocidade do veículo pode ser feita utilizando um fator multiplicador adimensional, que corresponde à razão entre os valores das respostas dinâmicas da carroceria dos veículos entre um par de velocidades consecutivas. Quanto mais próximo da unidade for o fator de multiplicação, menor é a variação do parâmetro em questão para aquela faixa de

variação da velocidade. Percebe-se que o parâmetro mais sensível ao aumento da velocidade do veículo é a aceleração, sendo o deslocamento o menos sensível. Adicionalmente, reitera-se a afirmação de que variações mais bruscas da magnitude das acelerações impostas pela pista ocorrem nas faixas mais baixas de variação de velocidade dos veículos, para qualquer perfil de pista. Os fatores de multiplicação adimensionais são explicitados na Tabela 6.9, para os dois modelos de veículo considerados.

Tabela 6.9 - Fatores de multiplicação adimensionais que relacionam os parâmetros deslocamento, velocidade e aceleração das respostas dinâmicas da carroceria dos veículos com seu aumento de velocidade.

	Faixa de variação da velocidade do veículo	Aceleração imposta pela pista*	Deslocamento*	Velocidade*	Aceleração*
Automóvel	30 - 50 km/h	1,543	1,274	1,298	1,537
	50 - 70 km/h	1,193	1,176	1,189	1,193
	70 - 90 km/h	1,151	1,196	1,163	1,151
	90 - 110 km/h	1,133	1,060	1,088	1,133
Caminhão	30 - 50 km/h	1,543	1,134	1,155	1,489
	50 - 70 km/h	1,193	1,659	1,597	1,232
	70 - 90 km/h	1,151	0,807	0,843	1,112
	90 - 110 km/h	1,133	2,652	1,087	1,128

*Fator de multiplicação entre os valores médios quadráticos das respostas dinâmicas dos modelos de veículo, em termos dos parâmetros em destaque (aceleração imposta pela pista, deslocamento, velocidade e aceleração).

7. CONCLUSÕES

Através da apresentação dos resultados obtidos demonstra-se que o presente trabalho obteve êxito em seus objetivos, tanto de desenvolver uma rotina numérico-computacional capaz de simular sinais temporais de excitação causada por diferentes perfis de pistas em veículos trafegando a diferentes velocidades, quanto de obter o comportamento dinâmico de modelos de veículo em resposta às excitações obtidas.

A comparação dos resultados com dados obtidos experimentalmente encontrados na literatura demonstra a consistência da geração de resultados da rotina desenvolvida, e confere validade à análise comparativa produzida a partir dos mesmos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bathe, K. J.; **“Finite Element Procedures”**, Prentice Hall, New Jersey, 1996.

Bendat, J. S.; Piersol, A. G.; **“Random Data: Analysis and Measurement Procedures”**, John Wiley & Sons, New York, 1971.

Braun, H.; **“Untersuchungen über Fahrbahnunebenheiten”**, Deutsche Kraftfahrtforschung und Strassenverkehrstechnik, VDI-Berichte 186, VDI-Verlag, Dusseldorf, 1996.

Ciapparini, J.V.; **“Avaliação de Fadiga de uma Carroceria de Ônibus Submetida a Diferentes Perfis de Pista”**, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

Ding, L.; Hao, H.; Zhu, X.; **“Evaluation of Dynamic Vehicle Axle Loads on Bridges With Different Surface Conditions”**, Journal of Sound and Vibration, 323: 826 – 848, 2009.

Dodds, C. J.; Robson, J. D.; **“The description of Road Surface Roughness”**, Journal of Sound and Vibration, 31(2), 175 – 183, 1973.

Gobbi, M.; Mastinu, G.; **“Analytical Description and Optimization of the Dynamic Behaviour of Passively Suspended Road Vehicles”**, Journal of Sound and Vibration, 245(3), 457 – 481, 2001.

Honda, H.; Kajikawa, Y.; Kobori, T.; **“Spectra of Road Surface Roughness on Bridges”**, Journal of the Structural Division, ASCE 108 (ST9): 1956 –66, 1982.

Hougaz, Augusto B.; **“Análise Probabilística de Durabilidade Aplicada a Veículos de Transporte de Carga Rodoviária”**, Tese de Doutorado, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2005.

International Organization for Standardization ISO 8608, **“Mechanical Vibration – Road Surface Profiles – Reporting of Measured Data”**, Switzerland, 1995.

Nardello, A., **“Caracterização de Perfis de Pista pela Densidade Espectral de Potência”**, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

Newland, D. E.; **“An Introduction to Random Vibration and Spectral Analysis”**, 2^aed, Longman, New York, 1987.

Newmark, N. M.; **“A Method of Computation for Structural Dynamics”**, ASCE Journal of Engineering Mechanics Division, Vol. 85, No. EM3, 1959.

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.”**, Journal of Terramechanics 47, p. 97-111, 2010.

Rao, S. S.; **“Mechanical Vibrations”**, Prentice Hall, 5^aed, 1995.

Reza-Kashyzadeh, K.; Ostad-Ahmad-Ghorabi, M. J.; Arghavan, A.; **“Investigating the Effect of Road Roughness on Automotive Component”**, Engineering Failure Analysis, 41: 96-107, 2014.

Shinozuka, M.; Jan, C.M.; **“Digital Simulation of Random Process and its Applications”**, Journal of Sound and Vibration, 25:111-8, 1972.

Sun, L.; **“Computer Simulation and Field Measurement of Dynamic Pavement Loading”**, Mathematics and Computers in simulation, 56, 297 – 313, 2001.

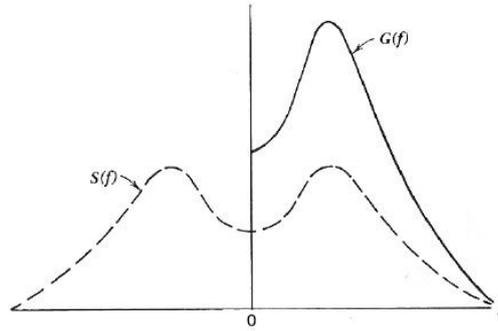


Figura 4.1: Densidade espectral de Potência (PSD) bilateral, $S(f)$, e unilateral, $G(f)$.
 Fonte: Bendat e Piersol, 1971.

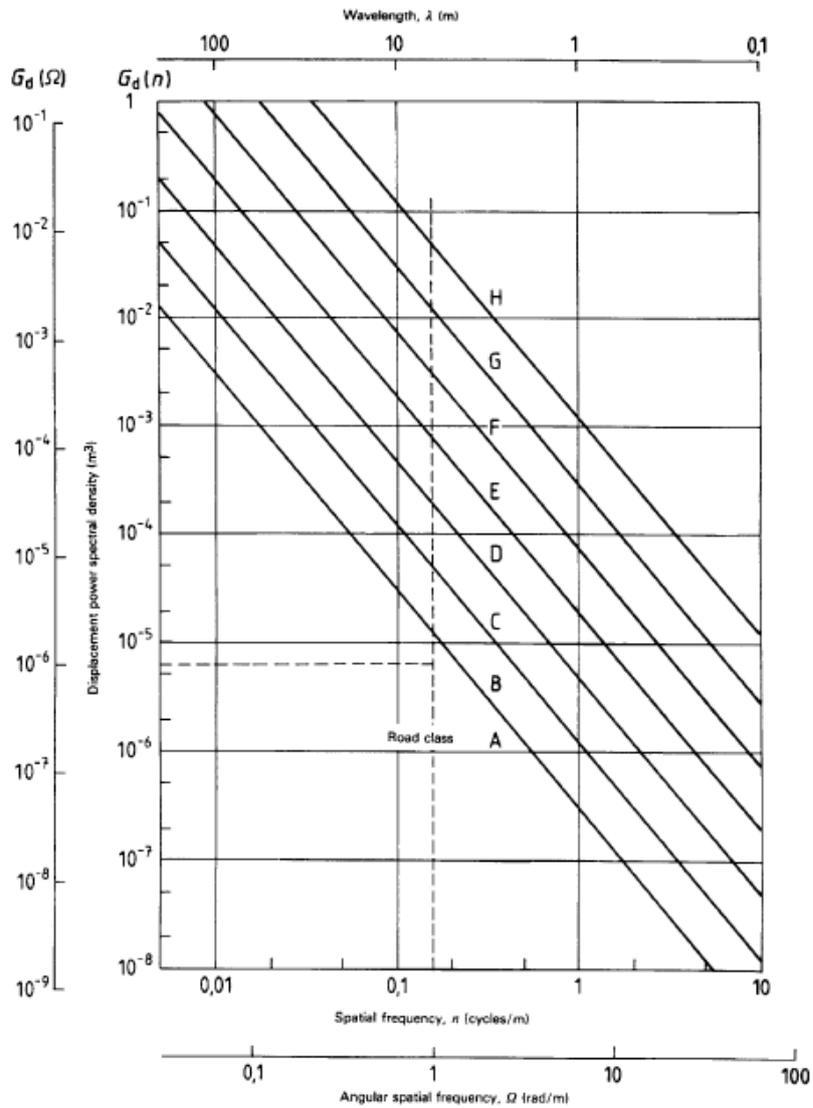


Figura 5.2 – Sistema de classificação de pistas de diferentes rugosidades em função da densidade espectral de potência em termos de deslocamento.
 Fonte: ISO 8608, 1995.

APÊNDICE

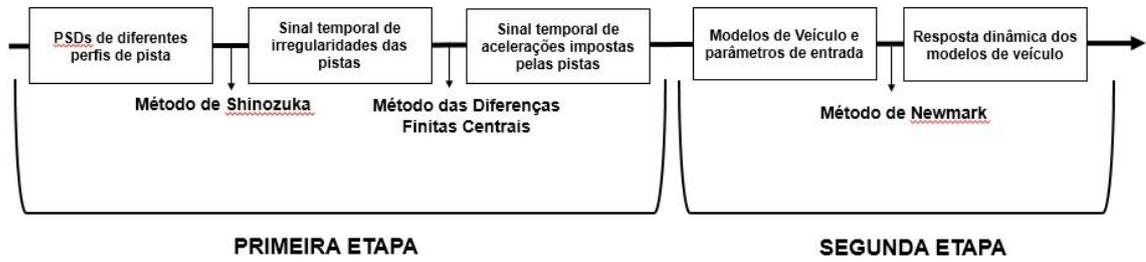


Figura 5.2 – Procedimentos utilizados para a obtenção dos resultados, divididos em duas etapas.

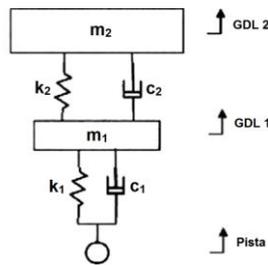


Figura 5.3 – Modelo de ¼ de veículo.

Fonte: Adaptado de Reza-Kashyzadeh *et al.*, 2014.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix}$$

Figura 5.4 – Matrizes de massa, rigidez e amortecimento dos modelos de veículo utilizados.

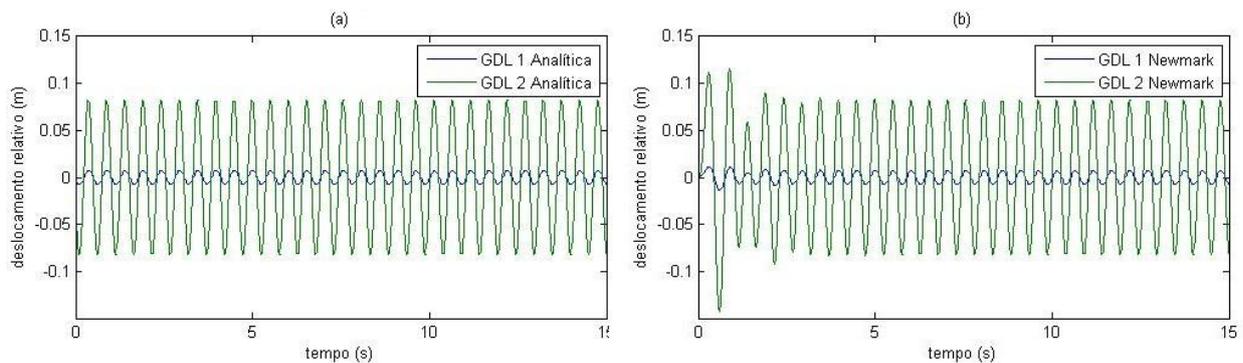


Figura 5.5 – Respostas dinâmicas em termos de deslocamentos do modelo de automóvel proposto em resposta a uma excitação senoidal conhecida. (a) Resposta dinâmica obtida analiticamente; (b) Resposta dinâmica obtida numericamente através do método de Newmark.

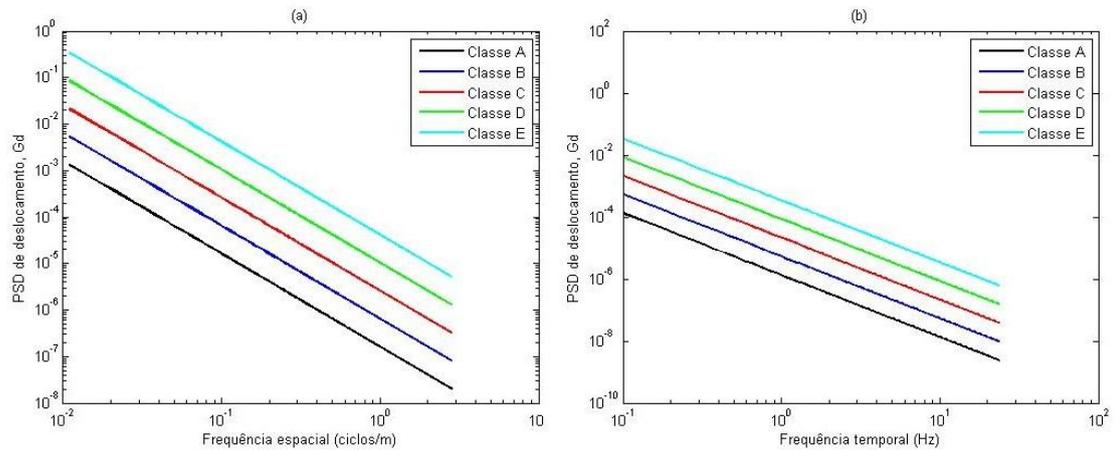


Figura 6.1 - Gráfico de densidades espectrais de potência (PSDs) em termos de deslocamento. (a) PSDs em função das frequências espaciais; (b) PSDs em função das frequências temporais.

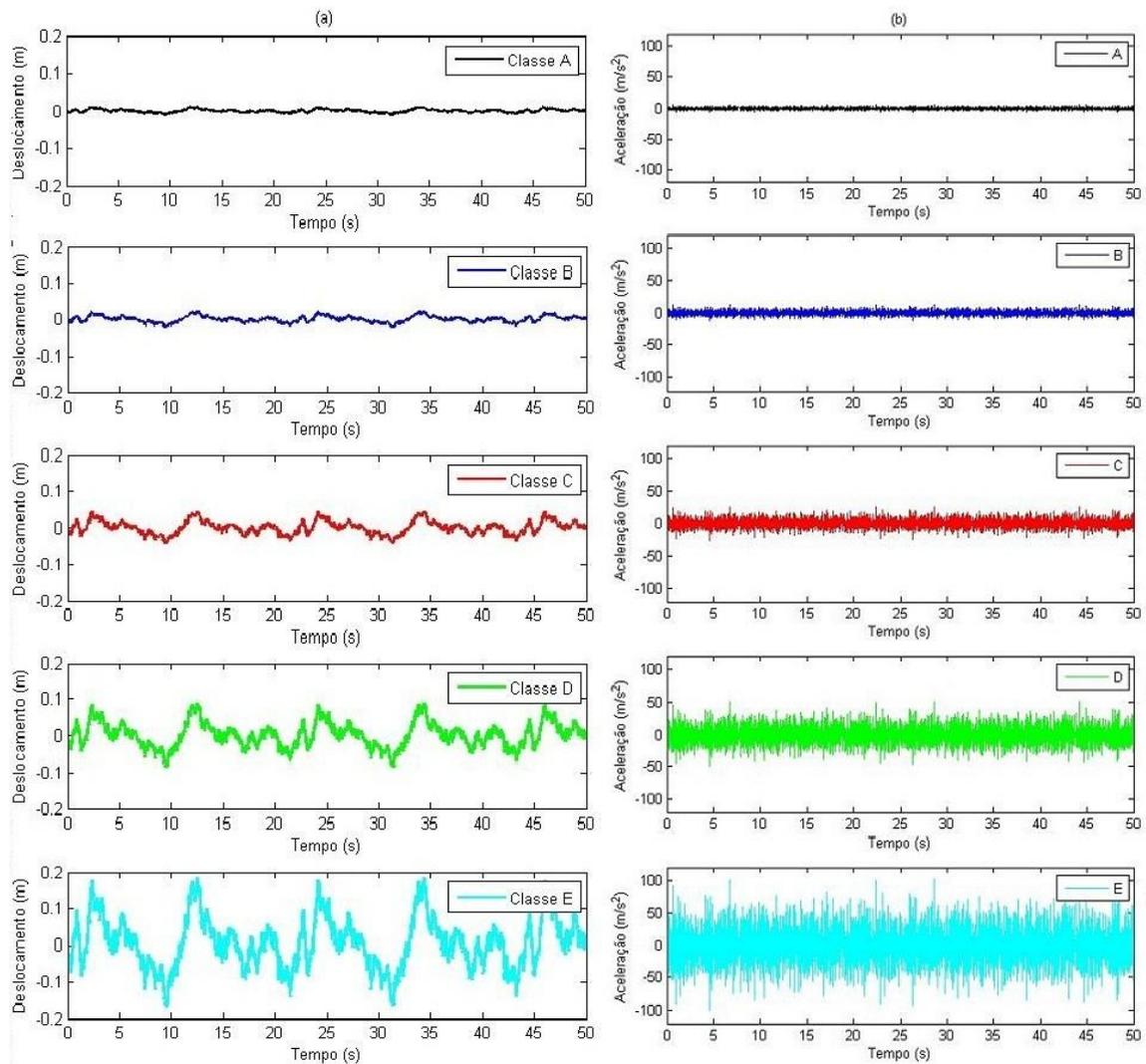


Figura 6.2 - Sinais temporais impostos pelas diferentes classes de pavimentos à base dos veículos. (a) Sinais em termos de deslocamento vertical; (b) Sinais em termos de aceleração vertical.

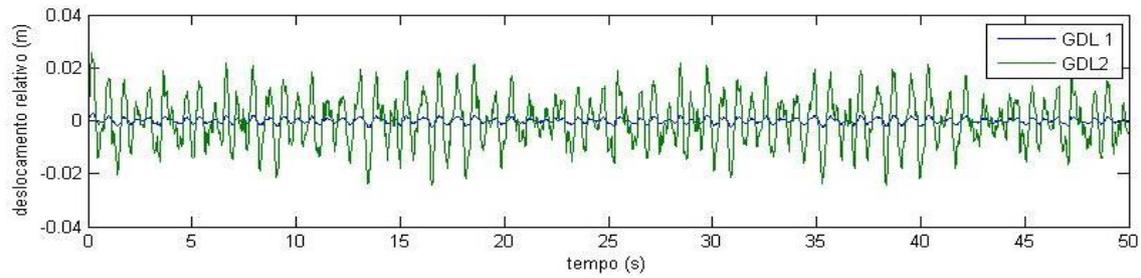


Figura 6.3 - Resposta dinâmica do modelo de automóvel, trafegando a 30 km/h pelo perfil de pista de classe C, em termos de deslocamento vertical relativo.

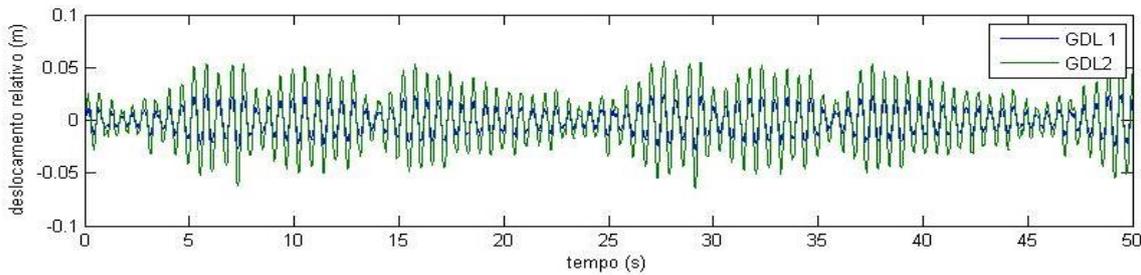


Figura 6.4 - Resposta dinâmica do modelo de caminhão, trafegando a 30 km/h pelo perfil de pista de classe C, em termos de deslocamento vertical relativo.

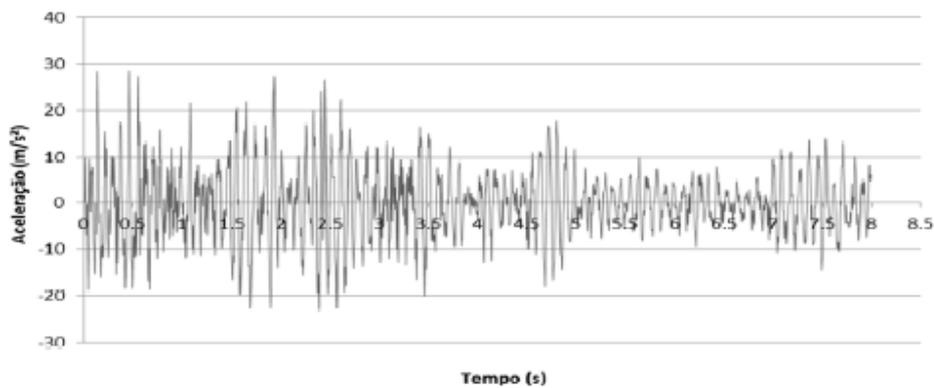


Figura 6.5 - Sinal temporal de aceleração obtido experimentalmente por Ciapparini, 2012, de um veículo trafegando com a velocidade de 80 km/h em um trecho de asfalto.

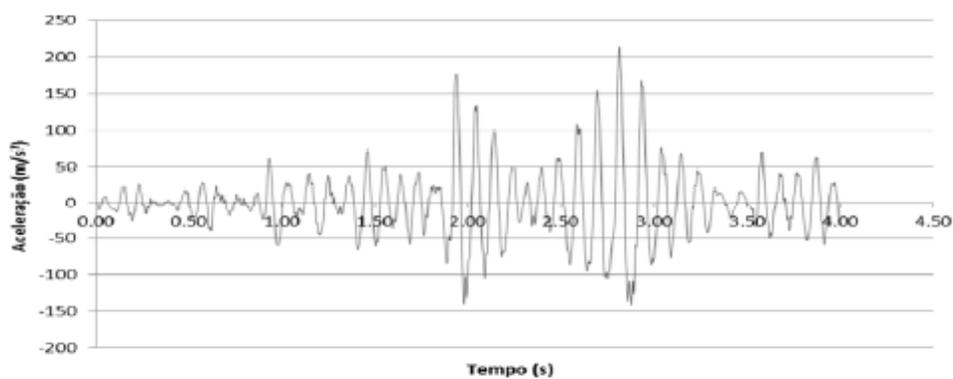


Figura 6.6 - Sinal temporal de aceleração obtido experimentalmente por Ciapparini, 2012, de um veículo trafegando com a velocidade de 30 km/h em um trecho de estrada de chão.

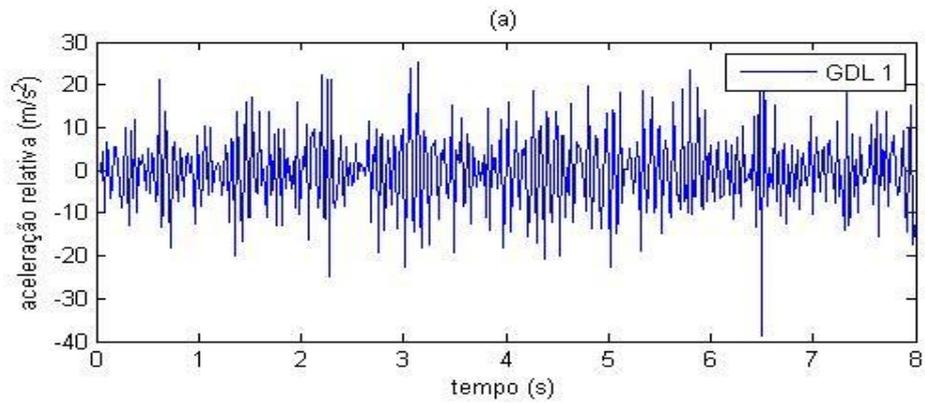


Figura 6.7 - Sinal temporal de aceleração, obtido através da rotina desenvolvida no presente estudo, de um veículo trafegando com a velocidade de 80 km/h em um trecho de asfalto (perfil de classe B).

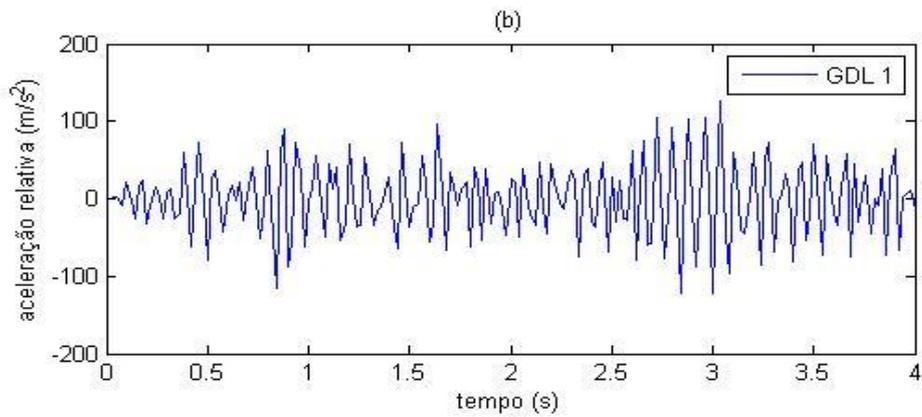


Figura 6.8 - Sinal temporal de aceleração, obtido através da rotina desenvolvida no presente estudo, de um veículo trafegando com a velocidade de 30 km/h em um trecho de estrada de chão (perfil de classe E).