

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

Um Estudo Sobre Caracterização de Pavimentos Rodoviários para Simulação de Veículos e
uma Análise Crítica dos Modelos *Quarter Model*

por

Vicente Carvalho Heck

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, Junho 2016



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

Um Estudo Sobre Caracterização de Pavimentos Rodoviários para Simulação de Veículos e
uma Análise Crítica dos Modelos *Quarter Model*

por

Vicente Carvalho Heck

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. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Rogério José Marczak

Comissão de Avaliação:

Prof. Jackson M. Vassoler

Prof. Rodrigo Rossi

Prof. Walter Jesus Casas

Porto Alegre, 06, Junho e 2016.

Heck, V. C. **Um Estudo Sobre Caracterização de Pavimentos Rodoviários para Simulação de Veículos e uma Análise Crítica dos Modelos Quarter Model**. 2016. 24 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma compilação de diversos terrenos de vários autores dispostos na literatura desde 1973, com o intuito de fomentar dados para simulações numéricas de veículos. Esses terrenos foram parametrizados no formato de funções densidade de potência espectral e catalogados de forma comparativa com a norma ISO 8608, englobando perfis de rodovias de alta qualidade até estradas de baixa qualidade. A catalogação destes terrenos é feito no formato de uma tabela de fácil utilização, e pode ser empregado para selecionar excitações para simulações de tráfego em geral. É realizada uma comparação de um modelo dinâmico de veículo do tipo *quarter model* com um modelo mais completo para dois tipos de pavimentos. É demonstrado que o modelo simplificado não é capaz de capturar picos de carregamento oriundos de transferência de cargas de rodas e eixos.

PALAVRAS-CHAVE: caracterização de pavimentos, PSD, *quarter model*, simulação de tráfego.

Heck, V. C. **A Study on Road Surface Characterization for Vehicle Simulation Including a Critical Analysis of Quarter Models**. 2016. 24 sheets. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ABSTRACT

This work presents a compilation of several riding pavements found in the literature since 1973, aiming their use in numerical simulation of vehicles. These pavements were parametrized as power spectrum density functions and comparatively catalogued against the ISO 8608 standard, and include from high quality highways up to unpaved roads. The catalogue is formatted as a table and can be used to select excitation sources for ride simulations. A dynamic quarter car model is then compared to a full model when riding on two different pavements. It is shown that the quarter car model cannot capture loading peaks resulting from pitch and roll load transfer.

KEYWORDS: road surface simulation, PSD, quarter model, riding simulation.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3.1 Caracterização do Terreno	2
3.2 Quarter Model	2
3.3 Função Densidade de Potência Espectral	2
4. METODOLOGIA	3
4.1 Geração da PSD	3
4.2 Catálogo de PSDs para simulação de veículos	5
4.3 Modelos <i>quarter model</i> e completo	7
4.4 Implementação do <i>quarter model</i>	8
4.5 McProfile	9
5. RESULTADOS	11
6 CONCLUSÕES	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14

1. INTRODUÇÃO

A caracterização geométrica de pavimentos é uma área que vem sendo estudada há décadas para fins de simulação de tráfego de veículos. De acordo com Dawkins, 2011, é chamada trafegabilidade o quanto o pavimento (terreno) influencia na habilidade do veículo atravessá-lo. As rodovias foram construídas com um propósito simples: transportar passageiros ou carga de um ponto a outro. A influência que o pavimento exerce sobre o veículo, passageiros, ou sua carga é perceptível através do comportamento dinâmico do veículo. Muitas vezes não é necessário nenhum tipo de instrumento para afirmar que o terreno está em boas ou más condições. Bruscella, 1997, afirma que o dano causado a produtos no transporte também foi motivo de intensificar o estudo sobre pavimentos. Danos causados à carga durante o trajeto são atribuídos à vibrações e choques causado pelo terreno. A aceleração vertical de um veículo é primariamente uma função da suspensão e da velocidade do veículo, mas é causada pela superfície que este atravessa.

Em várias áreas da engenharia é necessário que exista uma padronização para que o assunto em estudo seja classificado e passível de comparação. Uma das possíveis formas de classificar os terrenos é através das curvas de função densidade de potência espectral (*power spectrum density*) sendo referidas daqui em diante como PSDs. Os primeiros estudos de pavimentos com PSDs apontam para os trabalhos de Dodds e Robson, 1973. Em seu trabalho é mencionado que estas funções representam muito bem os terrenos reais, e ainda que defeitos no asfalto como grandes buracos não devem ser excluídos dessas análises. Descontinuidades são sempre um problema, entretanto podem ser descritos com o método utilizado por Dodds e Robson, 1973. A facilidade do uso deste método está no quão eficiente a PSD é para representar matematicamente pavimentos de qualquer tipo com qualquer extensão, podendo mesclar tipos de pavimentos diferentes. A partir destas curvas torna-se possível simulações de uso de veículos sem a necessidade de gerenciar arquivos gigantescos de dados contendo os pontos de definição do pavimento. Isso torna viável a análise de fadiga e durabilidade de veículos em diversas condições geográficas. Uma vantagem é a possibilidade da substituição de medições *in loco* de grandes trechos, uma vez que a PSD pode ser utilizada para representar a extensão desejada com as mesmas características. De acordo com Munari *et. al.*, 2012 o trecho mínimo que deve ser medido é de 4km, abaixo disto os valores de referência para construção da PSD ainda não estabilizaram.

É importante ressaltar que as PSD's são uma ferramenta para esse tipo de análise, mas o objetivo nesses casos em geral é a verificação de como um veículo se comporta nos pavimentos. Para este tipo de verificação o *quarter model* é uma boa aproximação do comportamento do veículo quando este trafega através de um terreno. Como apontado por Sun, 2001, o modelo de um quarto de veículo é simples mas representa de forma satisfatória a rugosidade da estrada, a aceleração vertical para conforto, e carregamento nos pneus do veículo para controle e segurança (Sun, 2001). No entanto, não oferece nenhuma comprovação efetiva.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é pesquisar, analisar e catalogar diversos pavimentos rodoviários típicos relatados na literatura tais como lajotas, asfalto, chão batido etc., no formato de PSDs. Pretende-se fornecer uma tabela das PSDs para os principais tipos de terrenos obtidos experimentalmente, eliminando o volume de dados resultante das medições feitas nos testes. Pretende-se ainda dispor dos pavimentos em forma tabular e sua comparação com padronização da ISO 8608. Finalmente, uma análise da representabilidade de modelos *quarter model* será realizada através da comparação de resultados de deslocamento, velocidade e aceleração com simulações feitas com o modelo completo do veículo, para pavimentos selecionados. Dessa análise serão feitas

sugestões sobre as vantagens e desvantagens do uso de *quarter models* na simulação dinâmica de veículos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Caracterização do Terreno

É sabido que a qualidade das estradas brasileiras são de modo geral piores do que as equivalentes de países desenvolvidos. Com isso, muitos carros projetados no exterior devem ter suas suspensões adequadas para que possam trafegar em solo brasileiro sem que se tenha maiores danos aos componentes de modo geral. A aquisição de perfis dos pavimentos tem como intuito adequar essas análises à realidade geográfica nacional, e também permitir sua comparação com as várias rodovias catalogadas na literatura. É possível perceber que há leves divergências quanto às suas caracterizações frente à norma ISO estabelecida (ISO 8608, 1995). Mesmo assim, existem certas padronizações de terrenos de teste, como por exemplo, o pavimento belga que vem sendo deixado de lado, sendo preferido o uso de asfalto liso. Historicamente, o pavimento belga garantia melhores aderências aos cavalos que tracionavam as carruagens com o ônus da sua vibração. O exemplo mostra que o pavimento sempre deve satisfazer condições razoáveis para o veículo cruzá-lo. A vibração dos componentes internos e externos da cabine dos veículos está intrinsicamente ligado ao conforto acústico e físico dos passageiros. A diferença principal entre as carruagens e os veículos modernos está na velocidade na qual trafegam, suspensão e pneus. A velocidade tem papel fundamental na produção e intensificação de ruídos. Este trabalho, entretanto, não pretende cobrir áreas como atenuação, ou intensificação de ruídos de componentes como pneu, amortecedor, feixe de molas etc. De qualquer forma, é importante mencionar que o pneu interage com a estrada na qual trafega [Maia, 2002].

3.2 Quarter Model

Na modelagem do *quarter model* é utilizado apenas o setor referente a um quarto do veículo, sendo de costume o uso de um lado da parte frontal do veículo. Isso é feito para simplificar o modelo necessário para estimação de dados como aceleração, força de reação etc. Esta simplificação, por sua vez, implica em diversas descon siderações, que em muitos casos, são extremamente relevantes no projeto de um veículo, como por exemplo, a rotação relativa entre o lado esquerdo e direito do veículo (rolagem). O impacto e a força causados pelo deslocamento de peso de um lado do veículo para o outro pode ser significativo, tanto para fins de resistência e fadiga quanto para a dirigibilidade. Entretanto, é amplamente utilizado pela sua simplicidade. Este modelo pode, no entanto, ser adequado para analisar aspectos gerais de aceleração, teste de pavimentos, carga nos pneus para controle e segurança, e projeto de suspensões ativas [Sun, 2001; Agharkakli et. al., 2012].

3.3 Função Densidade de Potência Espectral

O intuito da padronização das medições e dos dados obtidos através destas medições é tentar aliviar as dificuldades de intercâmbio de informações entre órgãos internacionais que regulam o transporte de carga e passageiros, bem como os fabricantes de veículos. O Índice de Rugosidade Internacional (IRI) tem sido o indicador mais comumente utilizado, obtido de medições longitudinais de pavimentos [Sayers, 1998]. Este índice é calculado utilizando o modelo matemático de um quarto de veículo. Sayers, 1998 aponta que para o IRI ser utilizado como um valor padrão de rugosidade ele não poderia mudar com o tempo, deveria permanecer válido para qualquer superfície e cobrir todos os níveis de aspereza das estradas. Entretanto, a medição da aspereza

do pavimento, ou do seu perfil longitudinal não é tarefa simples, pois há vários problemas práticos que devem ser explicitados. Entre vários o que nos interessa momentaneamente está a velocidade máxima com a qual a medição pode ser feita. Os trabalhos que mostram como tais medições são feitas quase sempre contam com um dispositivo com o seguinte formato: Um pneu acoplado sendo rebocado por um veículo, amortecedor e molas [Sayers, 1998]. Desta maneira, a inércia do conjunto atua de forma negativa nas medições e deve ser matematicamente subtraída dos dados. Quando o conjunto atravessa uma elevação, ou depressão o pneu leva uma quantidade de tempo para mudar a sua trajetória e gravar o sinal correto do pavimento. Caso o conjunto pneu-rodasuspensão permaneça no ar a força normal do pavimento atuando sobre o sistema resulta em zero. Isto significa que a medição depende exclusivamente da força gravitacional para trazer o conjunto ao chão novamente [Sivanesan, 2005]. De uma forma resumida, existem vários fatores que devem ser levados em conta para a medição, tornando esta tarefa bastante complexa.

Ocorre que justamente um dos propósitos das PSD's é reduzir a quantidade de terreno a ser medida. Estas funções são capazes de traduzir de forma satisfatória a rugosidade de um pavimento rodoviário, através das medições obtidas por um perfilômetro. O presente trabalho utilizou o programa McProfile desenvolvido por Pioli e Marczak, 2014, para gerar os gráficos dos terrenos a partir dos coeficientes característicos de uma PSD, bem como gerar um terreno fractal no domínio espacial, partindo da própria PSD. Desta forma, o sinal do pavimento rodoviário no tempo pode ser recuperado para fornecer os dados de entrada para uma possível simulação numérica [Pioli e Marczak, 2014]. Isso é possível através da função de Weierstrass-Mandelbrot que recupera o sinal espacial de amplitude sob a condição de o sinal espectral possuir uma intensidade decrescente com o aumento da frequência [Dawkins, 2011].

Uma importante conclusão no trabalho de Pioli e Marczak, 2014, é que se os pavimentos rodoviários fossem armazenados em função do tempo seriam arquivos de tamanho bastante grandes na ordem de GBytes, ou até mesmo na ordem de TBytes. Mesmo que este problema fosse contornado, trata-se de uma forma nada elegante de caracterizar matematicamente o pavimento. O fator mais importante, entretanto, é que através da parametrização dos pavimentos via PSD é possível fazer uma comparação direta entre terrenos de diferentes níveis de rugosidade. O que permite de forma clara e simples classificar diversos terrenos de forma sistemática. Utilizando como base a ISO 8608 é possível definir a qualidade deste terreno em oito níveis normalizados.

O trabalho de Munari *et. al.*, 2012 conclui que uma PSD converge após 4 km de dados coletados. As funções densidade de potência espectral representam a resposta de frequência de um sinal periódico randômico, e mostram a intensidade do sinal ao longo de toda a faixa de frequência. De acordo com Dawkins, 2011, a PSD mostra a intensidade das variações em função da frequência, ou seja, mostra em quais frequências as variações são fortes e em quais frequências as variações são fracas. A sua unidade é energia (variância) por frequência (comprimento). Pode ser obtida a energia de uma faixa específica de frequência integrando-se a curva da PSD naquela extensão.

4. METODOLOGIA

4.1 Geração da PSD

Curvas de PSDs de pavimentos de diferentes tipos foram reunidos a fim de se catalogar uma boa amostra dos vários pavimentos disponíveis na literatura. Após um levantamento bibliográfico inicial, se reuniu todos os coeficientes disponíveis de PSDs em uma tabela. Através do programa McProfile foram recuperados os perfis dos pavimentos e os respectivos coeficientes catalogadas, tanto na forma de imagem quanto de equação. O programa pode ser dividido em três módulos. O primeiro consiste na

obtenção da PSD ideal a partir dos coeficientes de rugosidade e das constantes de ajuste C e w . O segundo utiliza um método fractal (Weierstrass–Mandelbrot) para recuperar o sinal do pavimento rodoviário no domínio espacial. Essa metodologia permite que um analista: (a) empregue um pavimento/terreno conhecido; (b) gere a PSD de um pavimento medido espacialmente; (c) misture dois ou mais pavimentos para criar novos tipos de interesse para uma simulação específica. O terceiro interliga os dois métodos reproduzindo novamente a PSD com base nos dados no domínio espacial. A curva PSD é ajustada para a reta denominada como ideal através de regressão linear.

$$S(\omega) = C\omega^w \quad (4.1)$$

onde C é a constante de rugosidade, w é a constante de inclinação e ω é a frequência espacial. Entretanto, para que possa ser empregado a função de Weierstrass–Mandelbrot do sinal espectral a função deve possuir intensidade decrescente com o aumento da frequência. Felizmente, esta condição é satisfeita na análise de rodovias possibilitando a recuperação do sinal espacial de amplitudes de forma muito mais rápida e simples que os métodos usuais de reconstrução do sinal espacial [Sayers, 1998]. De acordo com a ISO 8608 os terrenos podem ser categorizados em uma escala de A até G (Figura 4.2)

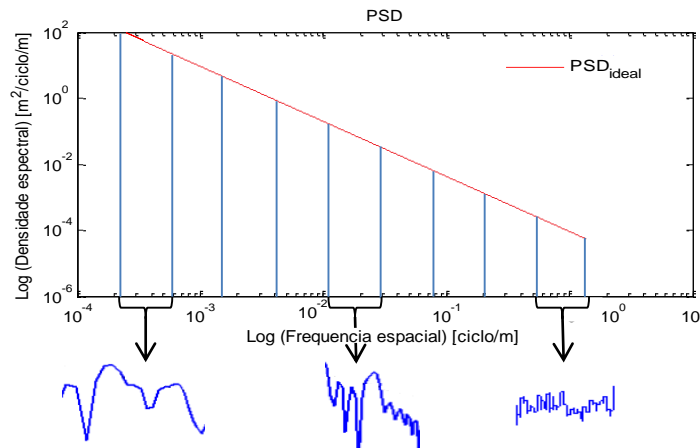


Figura 4.1 – Ilustração da geometria de um pavimento rodoviário para diferentes intervalos de frequência [Pioli, 2014].

Para gerar o sinal espacial a PSD é dividida em intervalos discretos de amplitude, sendo os primeiros intervalos responsáveis pelos maiores valores de amplitude encontrado. Por exemplo, o acive de uma rodovia. Os intervalos no final da PSD representam os desníveis mínimos do pavimento (Figura 4.1).

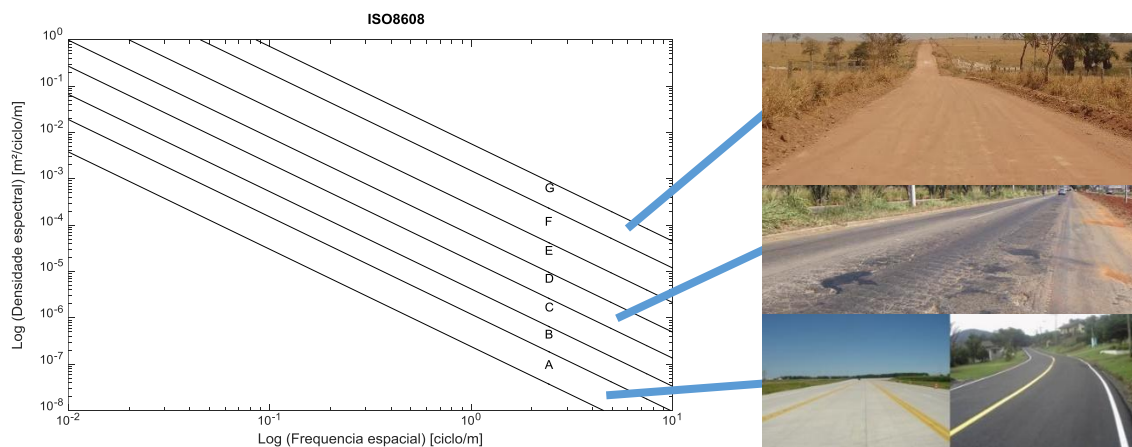


Figura 4.2 – Tipos de pavimentos de acordo com a ISO 8608.

4.2 Catálogo de PSDs para simulação de veículos

Para propósito de desenvolvimento e testes, a caracterização de terrenos torna possível gerar perfis randômicos que correspondem aos pavimentos em vários graus de rugosidade. Com isso, é possível simular veículos trafegando em terrenos com pouca quantidade de dados empíricos. Para tanto, foi reunido um grande número de terrenos encontrados na literatura de diversos autores nacionais e internacionais. A tabela 4.1 lista todos os pavimentos testados pelo presente trabalho, catalogando suas descrições, as constantes da eq. (4.1), descrição e referência usada. Não se tem conhecimento de uma compilação similar na literatura técnica.

Tipo de Pavimento	Condição	C	w	ISO Equiv.	Autore(s)
Rodovia classe ISO	A-B	3,20E-07	-2	A	D'Apuzzo, et al., 2010
Rodovia classe ISO	B-C	1,28E-06	-2	B	D'Apuzzo, et al., 2010
Rodovia classe ISO	C-D	5,12E-06	-2	C	D'Apuzzo, et al., 2010
Rodovia classe ISO	D-E	2,05E-05	-2	D	D'Apuzzo, et al., 2010
Rodovia classe ISO	E-F	8,19E-05	-2	E	D'Apuzzo, et al., 2010
Rodovia classe ISO	F-G	3,28E-04	-2	F	D'Apuzzo, et al., 2010
Rodovia classe ISO	G-H	1,31E-03	-2	G	D'Apuzzo, et al., 2010
Autoestrada	1	1,00E-07	-2,5	ND	Bruscella, 1997
Estradas Principais	2	5,00E-07	-2,5	ND	Bruscella, 1997
Estradas Secundárias	3	5,00E-06	-2,5	ND	Bruscella, 1997
Asfalto Suave	1	6,67E-06	-1,96	C	Dawkins, 2011
Asfalto Acidentado	2	7,09E-06	-2,29	D	Dawkins, 2011
Cascalho Compactado	3	1,56E-05	-2,1	E	Dawkins, 2011
Cascalho Solto	4	3,72E-04	-1,48	E	Dawkins, 2011
Fora de Estrada	5	7,19E-04	-1,5	F	Dawkins, 2011
Transição	6	4,15E-04	-1,93	ND	Dawkins, 2011
Autoestrada	Muito Bom	9,63E-06	-1,945	C	Dodds, Robson, 1973
Autoestrada	Bom	3,85E-05	-1,945	D	Dodds, Robson, 1973
Estrada Principal	Muito Bom	1,01E-05	-2,05	C	Dodds, Robson, 1973
Estrada Principal	Bom	4,04E-05	-2,05	D	Dodds, Robson, 1973
Estrada Principal	Mediano	1,16E-04	-2,05	E	Dodds, Robson, 1973
Estrada Principal	Ruim	6,46E-04	-2,05	F	Dodds, Robson, 1973

Estrada Secundária	Mediano	1,79E-04	-2,28	E	Dodds, Robson, 1973
Estrada Secundária	Ruim	7,17E-04	-2,28	F	Dodds, Robson, 1973
Estrada Secundária	Muito Ruim	2,87E-03	-2,28	G	Dodds, Robson, 1973
Asfalto / Pavimentado	Muito Bom	8,17E-06	-2,2	C	Mitschke, 1972
Asfalto / Pavimentado	Bom	3,77E-05	-2,18	D	Mitschke, 1972
Asfalto / Pavimentado	Mediano	1,40E-04	-2,18	E	Mitschke, 1972
Fora de Estrada / Não Pavimentado	Bom	2,00E-04	-2,25	E	Mitschke, 1972
Fora de Estrada / Não Pavimentado	Mediano	9,74E-04	-2,25	F	Mitschke, 1972
Fora de Estrada / Não Pavimentado	Ruim	3,78E-03	-2,14	G	Mitschke, 1972
Fora de Estrada / Não Pavimentado	Muito Ruim	1,02E-01	-2,14	ND	Mitschke, 1972
Fora de Estrada	1	1,33E-03	-1,23	ND	Munari, et al., 2012
Mistura Rodovia / Fora de Estrada	2	2,87E-03	-1,12	ND	Munari, et al., 2012
Rodovia	3	9,50E-04	-0,986	ND	Munari, et al., 2012
Rodovia	Boa	5,05E-05	-2,05	D	Reckziegel, Schmidt, 2002
Rodovia	Média	2,02E-04	-2,05	E	Reckziegel, Schmidt, 2002
Rodovia	Baixa	6,46E-04	-2,05	F	Reckziegel, Schmidt, 2002
OPC – Pavimento de Cimento e Concreto Portland	Antigo	3,53E-04	-2,1	F	Sun, 2001
OPC – Pavimento de Cimento e Concreto Portland Antigo – 2	Antigo	2,56E-04	-2,24	F	Sun, 2001
NPC – Pavimento de Cimento e Concreto Portland Novo – 3	Novo	7,80E-05	-2,13	E	Sun, 2001
NPC – Pavimento de Cimento e Concreto Portland Novo – 4	Novo	9,40E-05	-2,17	E	Sun, 2001
NPC – Pavimento de Cimento e Concreto Portland Novo – 5	Novo	1,20E-05	-2,14	C	Sun, 2001
ACF – Asfalto com Superfície de Concreto e Pavimento Flexível – 6	---	2,20E-05	-1,96	D	Sun, 2001
ACF – Asfalto com Superfície de Concreto e Pavimento Flexível – 7	---	1,05E-04	-2,08	E	Sun, 2001
ACF – Asfalto com Superfície de Concreto e Pavimento Flexível – 8	---	1,00E-04	-1,85	E	Sun, 2001
ACO – Asfalto com Superfície de Concreto e Camadas de Cimento Portland – 9	---	3,40E-05	-2,11	D	Sun, 2001
ACO – Asfalto com Superfície de Concreto e Camadas de Cimento Portland – 10	---	1,13E-04	-2,19	E	Sun, 2001
ACB – Asfalto com Superfície de Concreto sobre Ponte – 11		1,20E-04	-2,21	E	Sun, 2001

Tabela 4.1 – Catálogo de PSDs para geração de pavimentos rodoviários.

Na Tabela 4.1 os valores ND significam “Não Definido”. Foi escolhido não definir em qual escala da ISO os terrenos se encontram por atravessarem várias escalas. Casualmente três dos terrenos são brasileiros, e o motivo deles não se enquadrarem em nenhum grau da ISO é que os pavimentos não possuem grandes acíves (por isso se enquadram em um grau relativamente baixo), mas possuem grandes defeitos em curtas distâncias. Com isso não é possível enquadrá-los em nenhuma das curvas da ISO 8608.

4.3 Modelos *quarter model* e completo

O aspecto mais importante quando se trata da geração de terrenos para a simulação de veículos está em como o veículo responde quando simulado em tais terrenos. Em outras palavras, estas simulações devem corresponder com o comportamento real do veículo. Para este fim, é de interesse que sejam desenvolvidos modelos que representem de forma precisa e possam nos entregar valores de vibrações que o veículo sofrerá quando trafegar por tais terrenos. Existem diversos modelos na literatura que podem ser utilizados para simular os movimentos no veículo causado pela rugosidade do terreno. É utilizado o *quarter model* e o *full model* para fazer uma comparação entre os dois e verificar as diferenças entre as respostas dos dois. Algo que precisa ser salientado é que existem diferenças entre os modelos de *quarter model*, como por exemplo, a utilização de uma suspensão composta por uma mola e amortecedor, e a massa suspensa (roda, pneu e outros componentes) acoplada ao chão por outro amortecedor e outra mola.

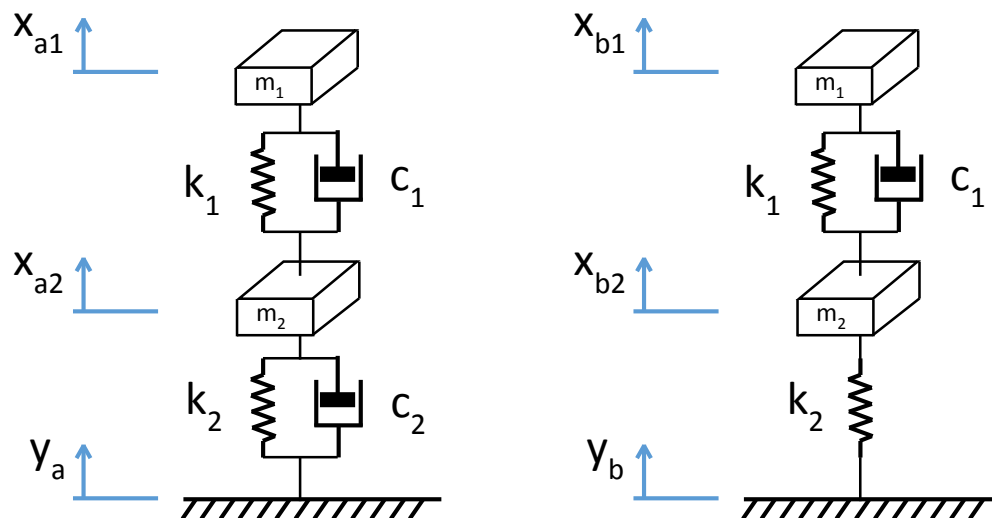


Figura 4.3 – Dois tipos de *quarter model* um considerando o amortecimento do pneu e outro não.

Na figura 4.3, k_1 e k_2 são os coeficientes de rigidez das molas, c_1 e c_2 correspondem aos coeficientes de amortecimento dos amortecedores, m_1 a representação da massa do veículo e m_2 a representação da massa suspensa. Os coeficientes, x_{a2} , y_a , x_{b1} , x_{b2} e y_b representam os deslocamentos das massas e do terreno. A figura 4.3 mostra dois tipos de *quarter model* onde diferem na existência de um amortecedor ligando m_2 ao solo em um dos modelos e o outro apenas com uma mola ligando m_2 ao solo. Esta representação consiste em um modelo de dois graus de liberdade, permitindo que as massas se desloquem apenas verticalmente.

O modelo com sete graus de liberdade representa melhor o veículo de um modo geral, ou pelo menos é o que se espera. O *full model* é representado pela massa do veículo sendo suportada por quatro amortecedores e molas conectados à suspensão

(Figura 4.4). Que por sua vez estão conectados ao solo e também possuem uma constante de amortecimento e de rigidez.

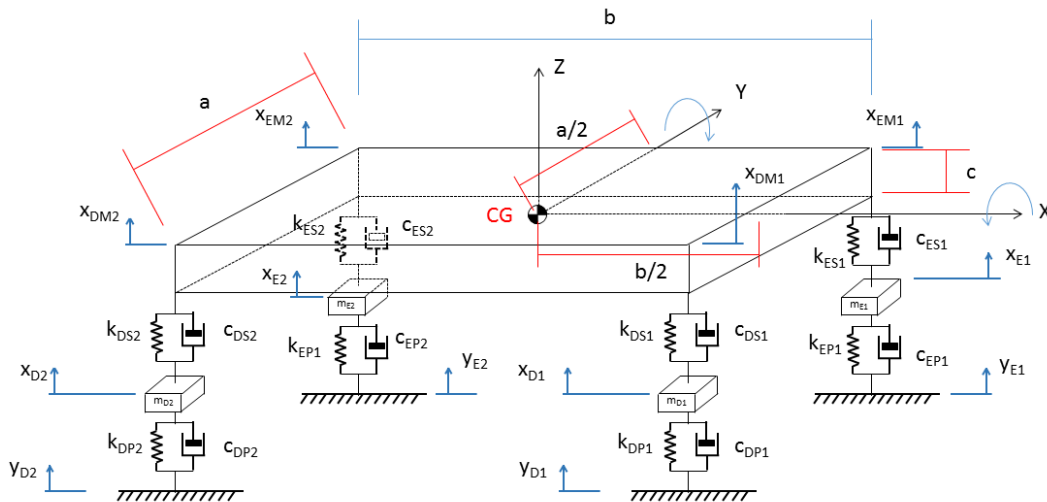


Figura 4.4 – *Full model* com molas e amortecedores na suspensão e considerando o amortecimento do pneu.

Onde os coeficientes com k representam a constante de rigidez das molas e seus sub índices “D” direita, “E” esquerda, “1” a parte frontal do veículo e “2” a parte traseira, “S” superior e “P” o elemento que está em contato com o pavimento. O mesmo ocorre para os amortecedores sendo definidos por c a constante de amortecimento. X, Y e Z correspondem às coordenadas principais, b o comprimento do veículo e a a sua largura. Para a aquisição de dados do *Full Model* o programa McRide [Lorenzi et al., 2015] foi utilizado. Com ele é possível definir vários tipos de modelos diferentes e alterar suas propriedades e coeficientes assim como alguns graus de liberdade. Assim como rodar a análise, ou seja, definir um terreno no qual o veículo passará. A partir da análise, extrair valores de aceleração, velocidade e deslocamento de algumas partes do veículo.

4.4 Implementação do *quarter model*

Um modelo de *quarter model* foi desenvolvido em uma ferramenta de simulação dinâmica que realiza integração no tempo das equações diferenciais do movimento [Simulink, 2015].

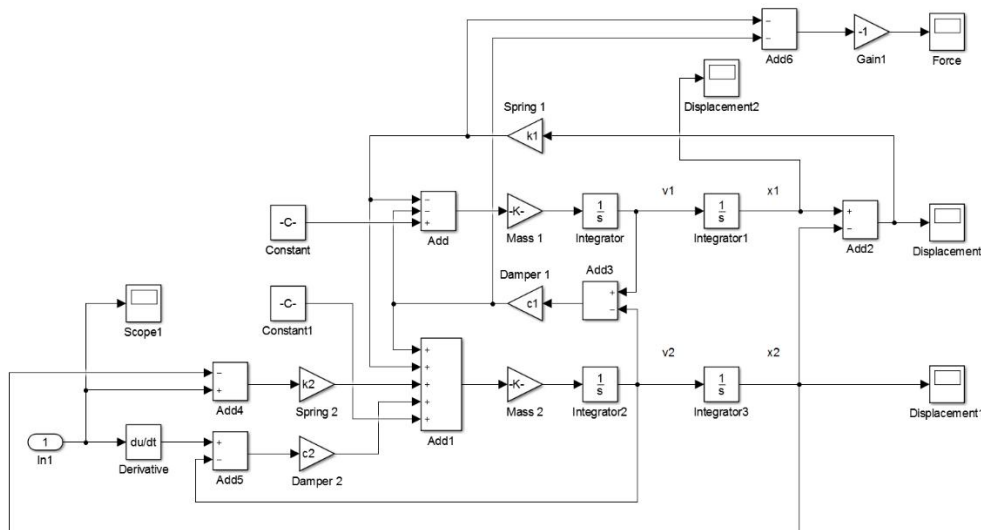


Figura 4.5 – *Quarter Model* desenvolvido no Simulink.

A Figura 4.5 foi extraída do programa empregado e mostra como o *quarter model* é representado através de blocos. O programa desenvolvido pelo aluno deste trabalho mostra a interação dos blocos e como as equações diferenciais que representam os deslocamentos, velocidades e acelerações de um conjunto massa, mola e amortecedor podem ser reproduzidas. A entrada de dados é feita a partir do bloco denominado *In1*. Os blocos com a escrita *scope* abaixo são a forma como o programa nos permite visualizar os resultados.

4.5 McProfile

O programa McProfile [Pioli e Marczak, 2014] foi empregado para gerar os terrenos a partir de dados espaciais, ou coeficientes de PSDs citados na literatura. Através de algoritmos, o terreno é gerado com base em entradas especificadas pelo usuário. Basicamente, com o coeficiente de rugosidade e declividade da PSD o terreno pode ser reproduzido de acordo com o grau de agressividade desejado pelo usuário.

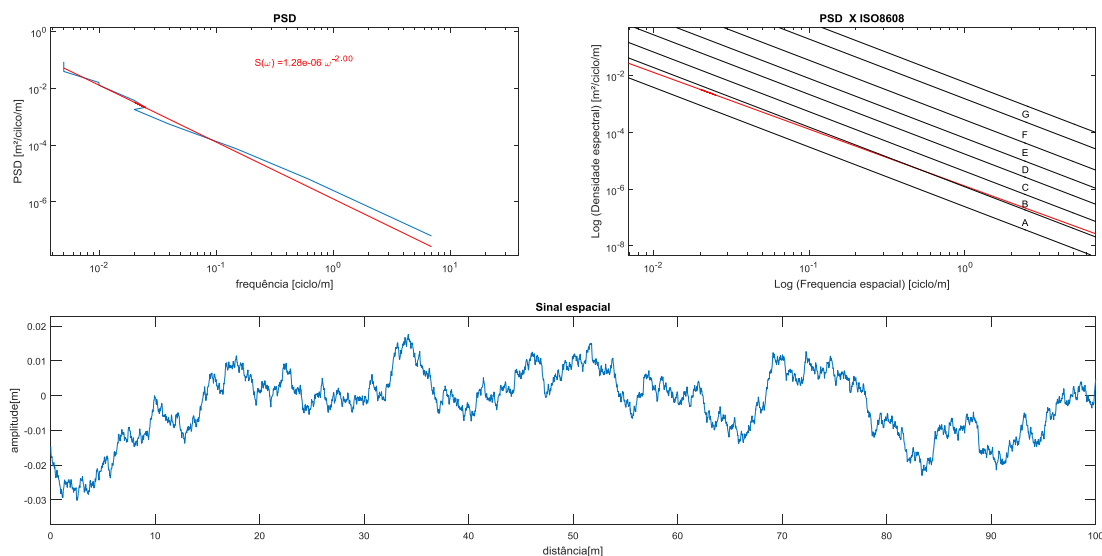


Figura 4.6 – Interface do programa McProfile mostrando a geração de um pavimento com base em coeficientes de rugosidade e declividade da PSD de D’Apuzzo, 2010.

A figura 4.6 ilustra a interface do programa McProfile. Na janela **A** a curva em vermelho representa explicitamente a curva PSD de acordo com o coeficiente de rugosidade e seu grau de declividade. Entretanto sem ponto de referência não é possível verificar se esta curva representa ou não uma estrada de boa, ou má qualidade. Por isso no quadro à sua direita, janela **B** a curva é plotada em uma escala predefinida, a ISO 8608. Assim é possível verificar a qualidade da estrada de maneira rápida e eficaz. Por último, a janela **C** apresenta a rodovia gerada e com ela é possível verificar quais as alturas máximas e mínimas atingidas pela estrada e se ter uma ideia do quão grandes são as imperfeições da rodovia. Note que apesar de termos a ISO na outra janela, apenas com ela, o leitor que nunca utilizou uma PSD pode não ter ideia de como será o perfil da estrada. Os coeficientes utilizados para geração do exemplo de PSD ilustrado foram $C = 1.28E - 06$, $w = -2$. Na Figura 4.7 é apresentada uma curva com os coeficientes $C = 1.33E - 03$, $w = -1.23$ retirado do trabalho de Munari *et al*, 2012.

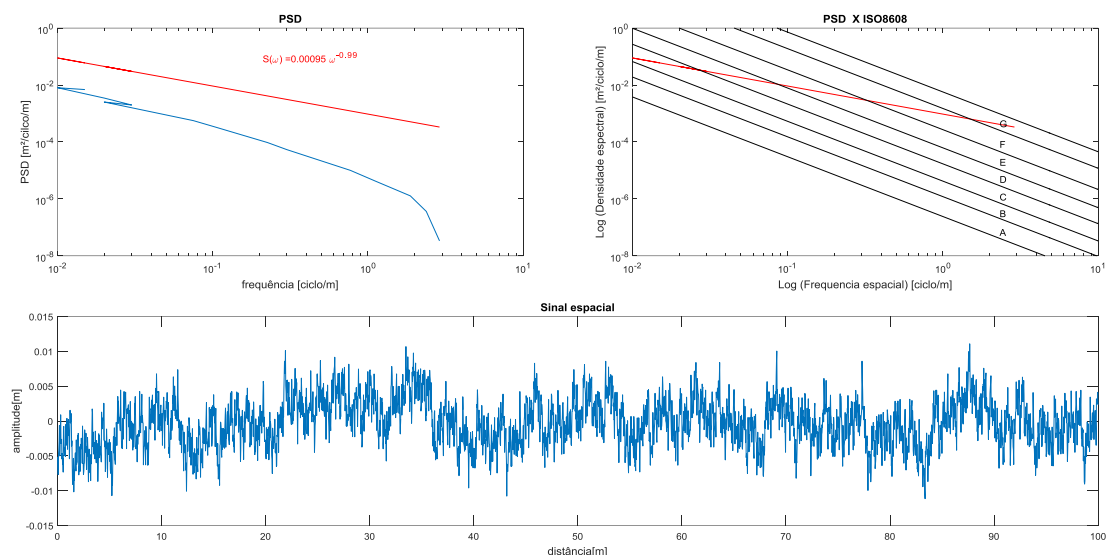


Figura 4.7 – Geração de um pavimento com base em coeficientes de rugosidade e declividade da PSD de Munari *et. al.*, 2012.

A partir das imagens obtidas do programa com os dados do “Pavimento A” do trabalho de Munari *et al*, 2012, pode-se fazer um estudo de como o sinal espacial é gerado conforme os seus coeficientes variam. Primeiramente, é possível perceber que a variação de C para valores maiores a PSD cruza as faixas da ISO de forma vertical (Figura 4.7). Isso quer dizer que a PSD passa de grau A para qualquer grau acima, neste caso grau D. A variação do coeficiente w influencia na declividade da curva. Um aumento de w faz com que a curva se aproxime da horizontal.

Como explicado anteriormente, a porção inicial da PSD influi nas amplitudes de baixa frequência. Como a curva está iniciando em uma faixa maior, neste caso D, a rodovia gerada apresenta picos de máximos e mínimos de acordo com a escala da ISO. Comparado com a curva anterior, isso significa que a elevação máxima e mínima é maior, como podemos perceber os valores ficam no entorno de 0.4m, enquanto na outra a amplitude é de 0.025m. De mesma forma, quando a parte de alta frequência se encontra em uma região, denominada pela ISO, de baixa qualidade o pavimento gerado apresenta um ruído mais acentuado, isso significa que a rodovia apresenta amplitudes significativas em curto intervalo de espaço.

Para finalizar, quando a PSD inicia e termina em uma linha da ISO elevada, significa que tanto as amplitudes de baixas frequências quanto às de alta são elevadas. Um exemplo está ilustrado na figura 4.8. Em termos de rodovias temos uma rodovia com aclives e declives de grande amplitude e com diversos acidentes na pista, buracos, cascalhos, pedras etc.

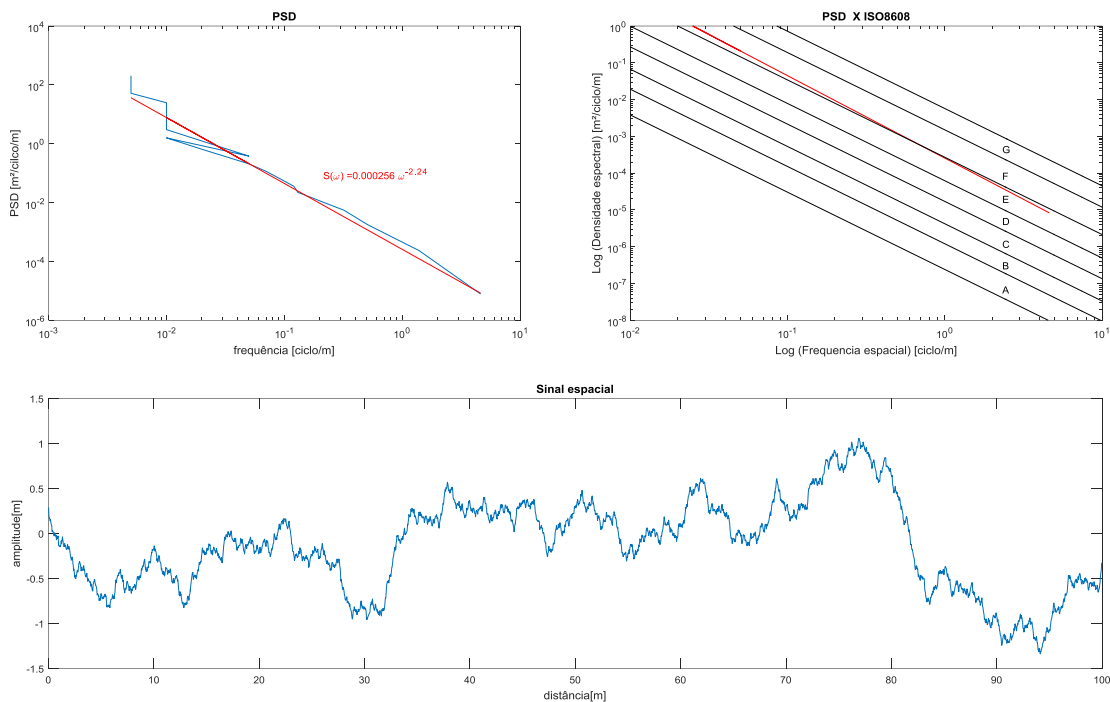


Figura 4.8 – Geração de um pavimento com base em coeficientes de rugosidade e declividade da PSD de Sun, 2001.

Pode-se perceber que existem acúmulos em um curto espaço de tempo, indicando a severidade desta subida. Assim como a alta frequência mostra que o terreno é bastante acidentado.

5. RESULTADOS

Os dois modelos do veículo foram submetidos à simulação de duas pistas virtuais. A primeira delas, ilustrada na Figura 5.1, consiste em uma reta de 144m com três lombadas, entretanto para o *full model* a primeira e a última lombada existe apenas em um dos lados. Este caso foi selecionado para evidenciar as limitações do modelo *quarter model* em relação ao *full model*. A segunda pista corresponde à um pavimento escolhido da tabela 4.1 de D'Apuzzo, categorizado pela ISO 8608 como grau C (Figura 5.2).

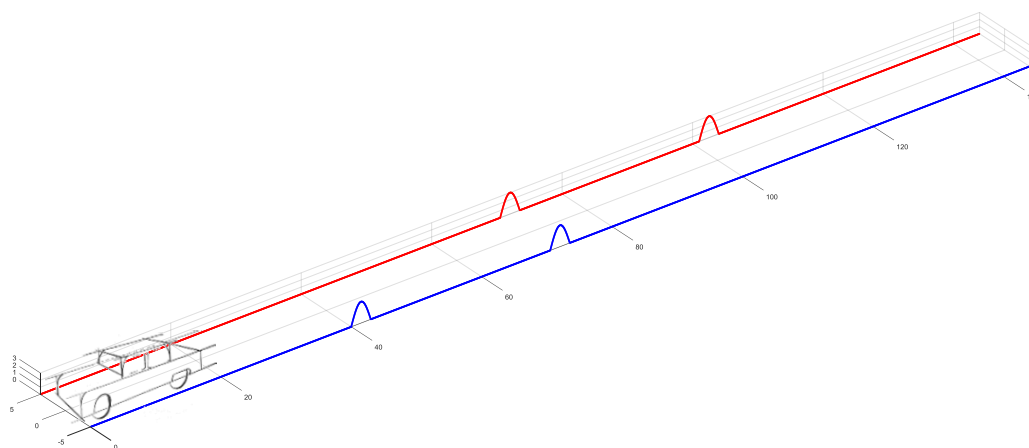


Figura 5.1 – Pista de 144m com três lombadas senoidais, sendo a primeira e a última em apenas um lado da pista.

O objetivo desta análise é de verificar se existem diferenças perceptíveis entre os dois modelos. Para isso, uma pista assimétrica é escolhida a fim de intensificar tais

diferenças. Esta consiste em uma pista de 144m com a primeira lombada de característica senoidal iniciando em 40m a segunda em 70m e a última em 100m. A altura máxima da lombada é de 15cm e seu comprimento de 3m. Sendo a primeira lombada apenas no lado direito a segunda em ambos os lados e a última apenas no lado esquerdo. Para o *quarter model* apenas o lado direito é simulado contendo três lombadas, pois trata-se unicamente de um conjunto massa mola.

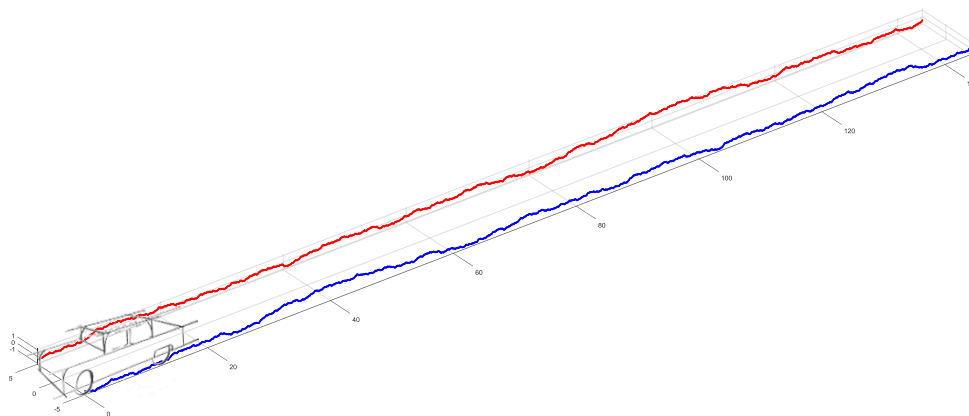


Figura 5.2 – Terreno categorizado como C na escala da ISO 8608.

O teste final consiste em verificar a diferença média entre as forças resultantes nos eixos dos dois modelos e verificar se existe a necessidade de um *full model* para fins de fadiga, forças máximas et. Ou se o *quarter model* pode ser utilizado com segurança.



Figura 5.3 – Força resultante de compressão das molas no *full model* para pista com rampa senoidal. Rodas frontais, direito (F1) e esquerdo (F2) e traseiras, direita (F3) e esquerda (F4).

Observando as figuras (5.3) e (5.4) podemos perceber que existe a transferência de carga do lado direito para o lado esquerdo na primeira lombada. O mesmo acontece na última lombada que só existe do lado esquerdo da pista. Este tipo de resultado o *quarter model* não é capaz de reproduzir, pelos seus motivos de modelagem que considera que a pista é simétrica. Além do mais, a transferência de carga do eixo dianteiro para o traseiro também produz um efeito de intensificação de carga nos eixos.

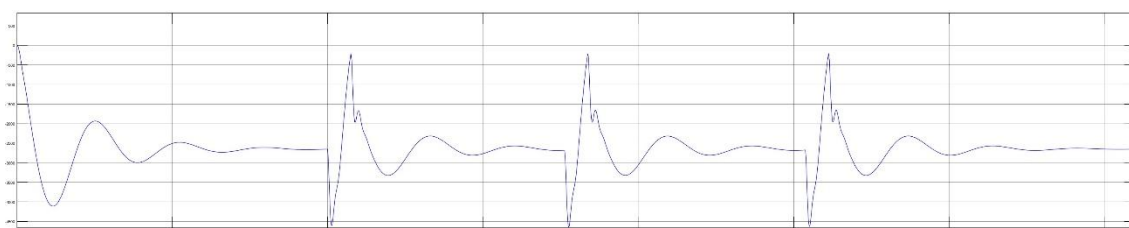


Figura 5.4 – Força resultante de compressão da mola no *quarter model* para pista com rampa senoidal.

Percebe-se que as forças são praticamente da mesma ordem de grandeza, isso demonstra que os dois modelos estão condizentes e reproduzindo as mesmas características do sistema massa mola. Entretanto, na primeira e na terceira lombada as forças têm variações de quase 1000N. Ou seja, a transferência de carga lateral e longitudinal do veículo influenciam de forma significativa.

Comparando ambos os modelos frente à um terreno mais realístico, incluindo depressões, aclives, defeitos etc. Os dois modelos encontram-se praticamente com a mesma faixa de valores de força como esperado. Para facilitar a visualização primeiramente será impresso apenas um conjunto massa mola do modelo. Desta forma pode-se comparar com o *quarter model*.



Figura 5.5 – Força resultante de compressão da mola no *full model* para pista de D'Apuzzo de grau C pela escala ISO 8608.

Ambas as forças parecem bem condizentes, entretanto podemos perceber a variação entre os dois gráficos. O *quarter model* apresenta forças na região entre -2000N e -3000N, já o *full model* as forças variam desde -4000N até -1500N.

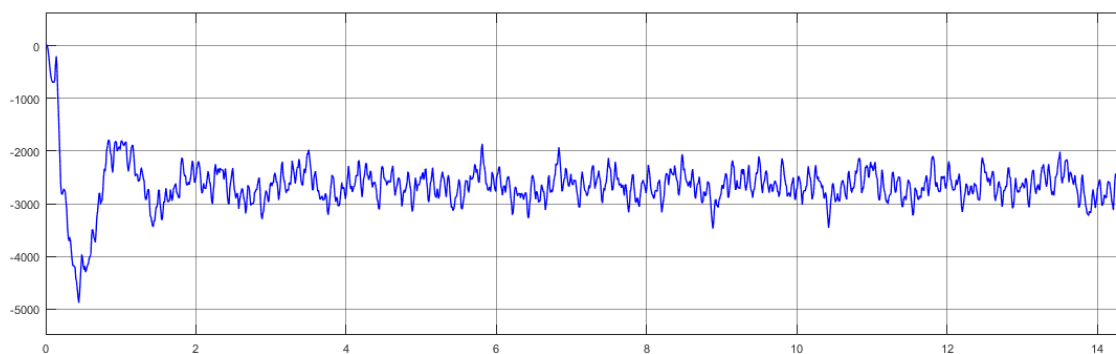


Figura 5.6 – Força resultante de compressão da mola no *quarter model* para pista de D'Apuzzo de grau C pela escala ISO 8608.

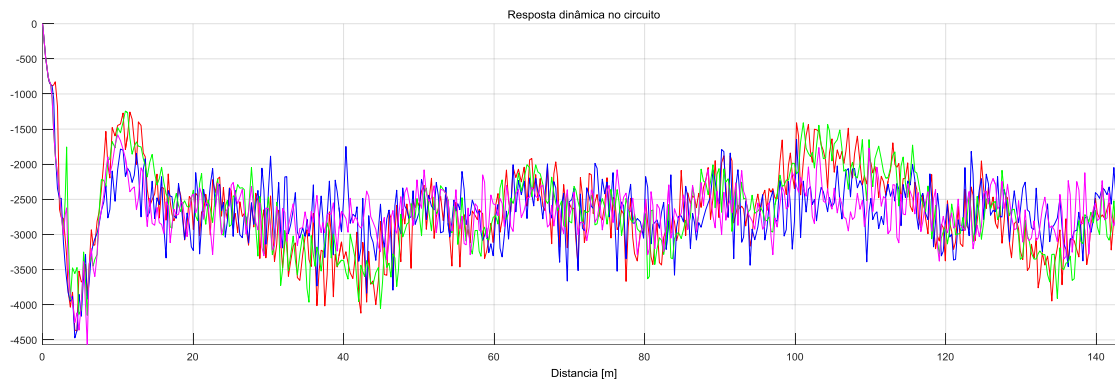


Figura 5.7 – Força resultante da compressão da mola no *full model* para pista de D'Apuzzo de grau C pela escala ISO 8608.

As forças encontradas pelo *full model* demonstram que o veículo como um todo sofre muito mais forças do que apenas o que o *quarter model*. As faixas na figura mostram os valores máximos e mínimos em uma região na cor vermelha e o valor médio em marrom. Certamente, tamanhas diferenças têm influência sobre análise de resistência e fadiga.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma compilação de funções PSD para diversos tipos de terreno reportados na literatura, de estradas não pavimentadas até pavimentos asfálticos de alta qualidade. As funções PSD deste tipo são de extrema importância para caracterização de pavimentos rodoviários empregados no projeto e análise de veículos rodoviários. A agressividade desses pavimentos é determinante nos níveis de força e deslocamentos experimentados pelas estruturas veiculares. A simulação através de pontos medidos experimentalmente é pouco prática e computacionalmente dispendiosa, o que evidencia a importância de representar os pavimentos de forma paramétrica. Não se tem conhecimento de uma catalogação como a apresentada na tabela 4.1 na literatura, e essa é uma das principais contribuições do presente trabalho.

Na segunda parte do trabalho foi apresentada uma comparação entre um modelo dinâmico muito comum de veículo – o *quarter model*, e um modelo completo (*full model*). Embora a literatura emprega extensivamente o primeiro, o segundo é muito mais completo no que diz respeito à quantidade de informações que ele carrega, fato raramente reconhecido em artigos técnicos. Os resultados numéricos demonstraram que as transferências de carga laterais e longitudinais, que evidentemente estão presentes no modelo completo, são completamente ignoradas pelo modelo *quarter model*, este fato já era esperado, entretanto contraria diversos autores da literatura que sugerem o contrário. Essa análise também mostrou que, apesar da ciclagem de cargas não ser significativamente alterada, os valores de pico diferem bastante como consequência da ausência de momentos de inércia de *pitching* e *rolling* do modelo simplificado. Dessa forma, o presente trabalho mostra que o *quarter model* deve ser utilizado com extrema cautela para fins de levantamento de históricos de carregamento com vistas à análise de fadiga e durabilidade. Portanto o que alguns autores mencionam ser uma boa aproximação para fins de especificação de cargas máximas, fadiga e dirigibilidade não parece ser uma boa ideia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agharkakli, A., Sabet, G. S., Barouz, A., “**Simulation and Analysis of Passive and Active Suspension System Using Quarter Car Model for Different Road Profile**”, International Journal of Engineering Trends and Technology, Vol. 3, 636-644, 2012.

Bruscella, B. **"The Analysis and Simulation of the Spectral and Statistical Properties of Road Roughness for Package Performance Testing"**, Victoria University of Technology, 1997.

Dawkins, J. J. **"Terrain Characterization and Roughness Estimation for Simulation and Control of Unmanned Ground Vehicles"**, Auburn University, 2011.

Dodds, C. J., Robson, J. D. **"The Description of Road Surface Roughness"**, Journal of Sound and Vibration 31, 1973.

D'Apuzzo, M., Nicolosi, V., Mattarocci, M. **"Predicting Roughness Progression of Asphalt Pavements by Empirical-Mechanistic Model"**, University of Cassino, Italy, 2010.

ISO 8608, Int.Organization for Standardization, 1995 Mechanical vibration – Road surface profiles –Reporting of measured data.

Lorenzi, F. L., Marczak, R. J., Zetola, F. B. e Pioli, D., **"Desenvolvimento de um Ambiente Computacional para Simulação Dinâmica de Veículos"** Anais do XXIII Simp. Int. Engenharia Automotiva, Blucher Eng. Proc., Vol. 1, No. 2, 2015.

Matlab, **"Getting Started Guide"**, The MathWorks, Inc, Massachusetts, 2008.

Mitschke, M., Wallentowitz, H. **"Dynamik der Kraftfahrzeuge"**, Springer-Verlag, Berlin, 1972.

Munari, L. A., Hoss, L., Fontanella, L., Marczak, R. J. **"Retrieving Road Surface Profiles from PSDs for Ride Simulation of Vehicles"**, SAE Brasil, 2012.

Pioli, D., Marczak, R. J. **"Algoritmo e Ferramenta Gráfica para a Geração de Sinais de Pavimentos Rodoviários pelo Método Fractal de Weierstrass-Mandelbrot e Pela Função Densidade de Potência Espectral"**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

Reckziegel, G., Schmidt, M. A. **"Uma metodologia para análise de vida para um semi-reboque para transporte de automóveis"** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

Robson, J. D., **"Road surface description and vehicle response"** International Journal of Vehicle Design, Vol 1, 1979.

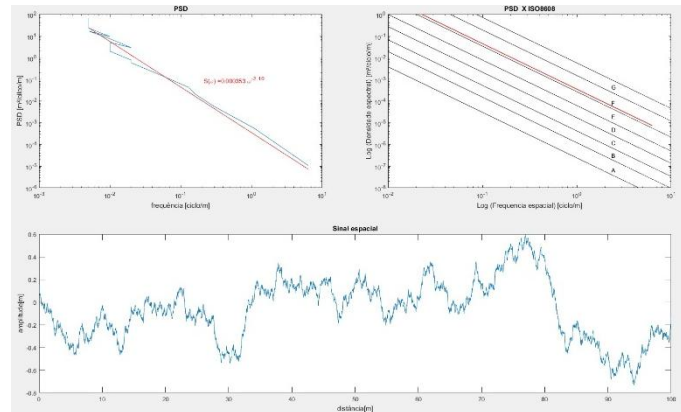
Sayers, M. W., Karamihas, M. S. **"The Little Book of Profiling, Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles"**. University of Michigan, Michigan. 1998.

Sivanesan, E. **"Power Spectral Density (PSD) Terrain Modeling for Vehicle Durability Analysis"**, The University of Tennessee, Knoxville, 2005.

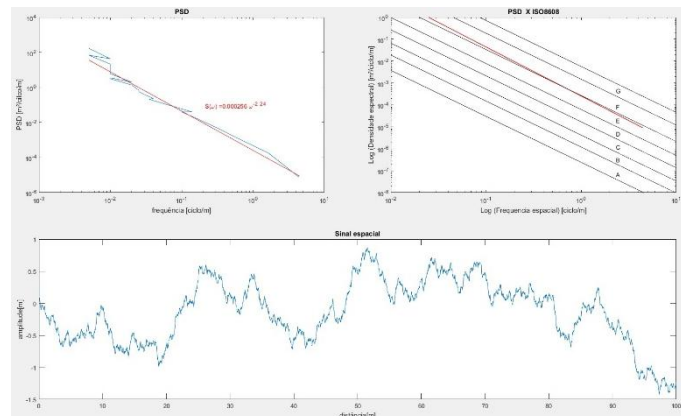
Sun, L. **"Computer simulation and field measurement of dynamic pavement loading"**, University of Texas, 2001.

Simulink, **"User's Guide"**, The MathWorks, Inc, Massachusetts, 2015.

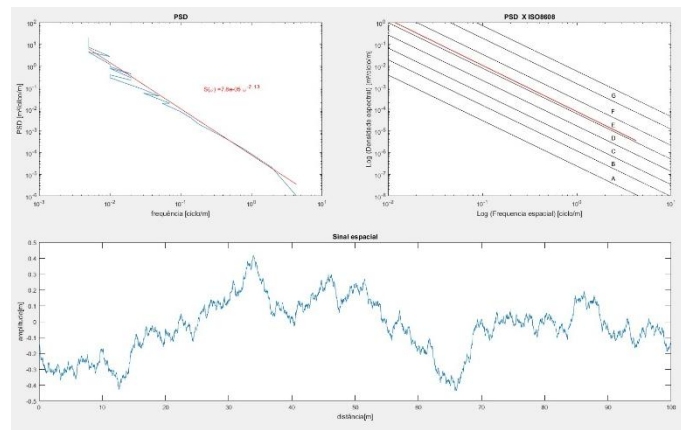
APÊNDICE



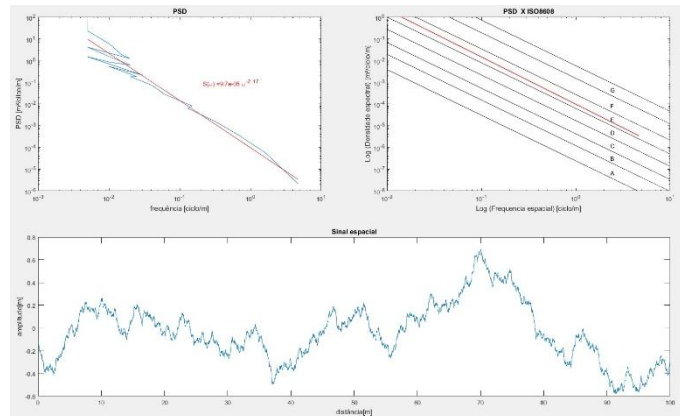
Pavimento de Cimento e Concreto Portland Antigo – 1 Sun, 2001.



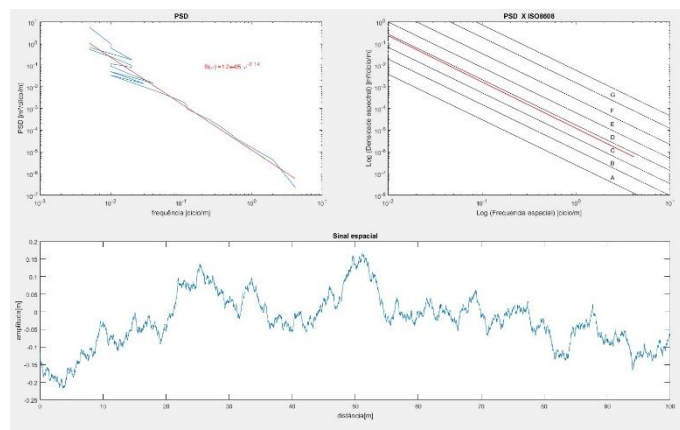
Pavimento de Cimento e Concreto Portland Antigo – 2 Sun, 2001.



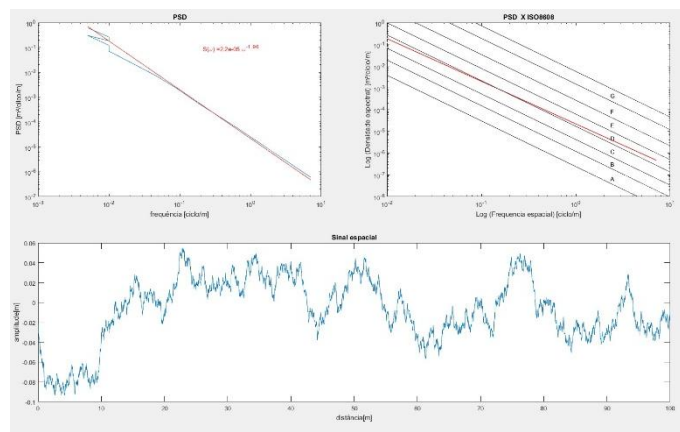
Pavimento de Cimento e Concreto Portland Novo – 3 Sun, 2001.



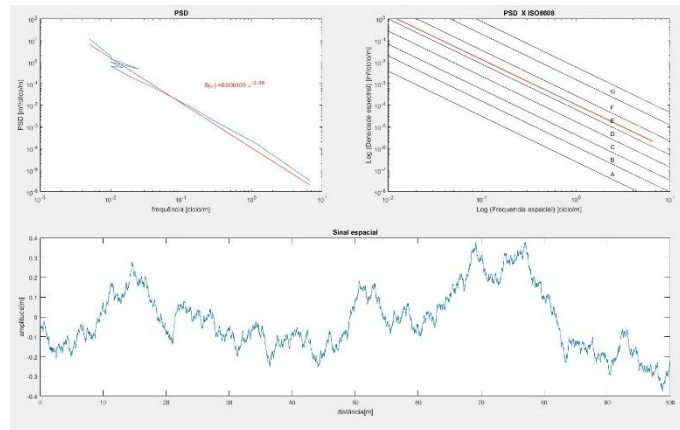
Pavimento de Cimento e Concreto Portland Novo – 4, Sun, 2001.



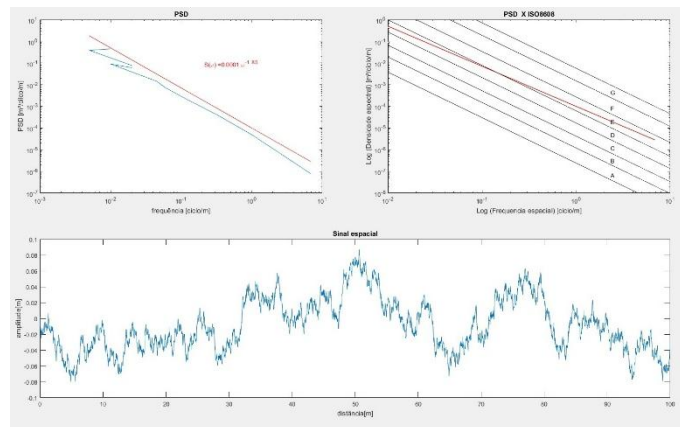
Pavimento de Cimento e Concreto Portland Novo – 5, Sun, 2001.



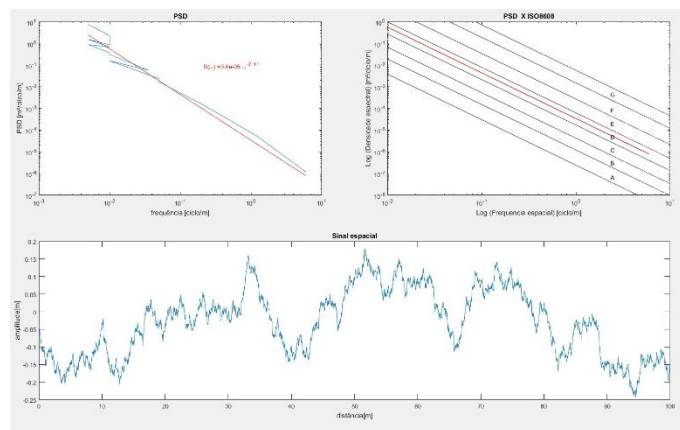
Asfalto com Superfície de Concreto e Pavimento Flexível – 6, Sun, 2001.



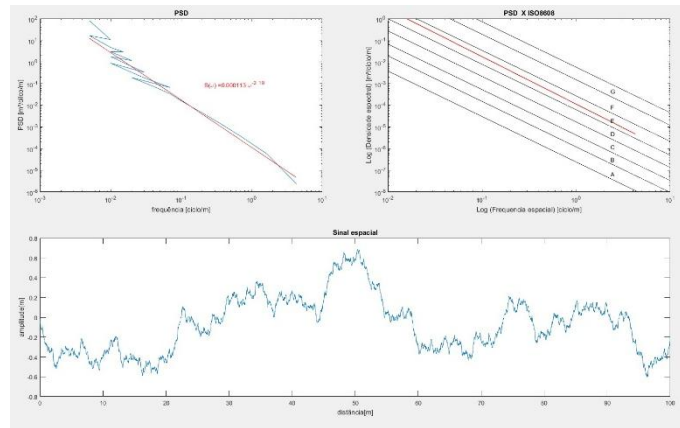
Asfalto com Superfície de Concreto e Pavimento Flexível – 7, Sun, 2001.



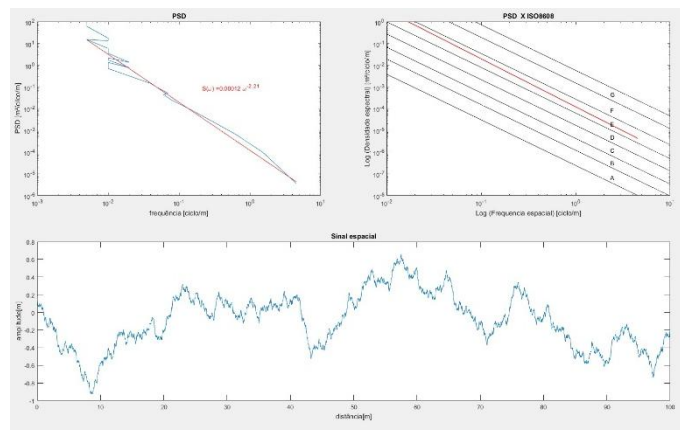
Asfalto com Superfície de Concreto e Pavimento Flexível – 8 Sun, 2001.



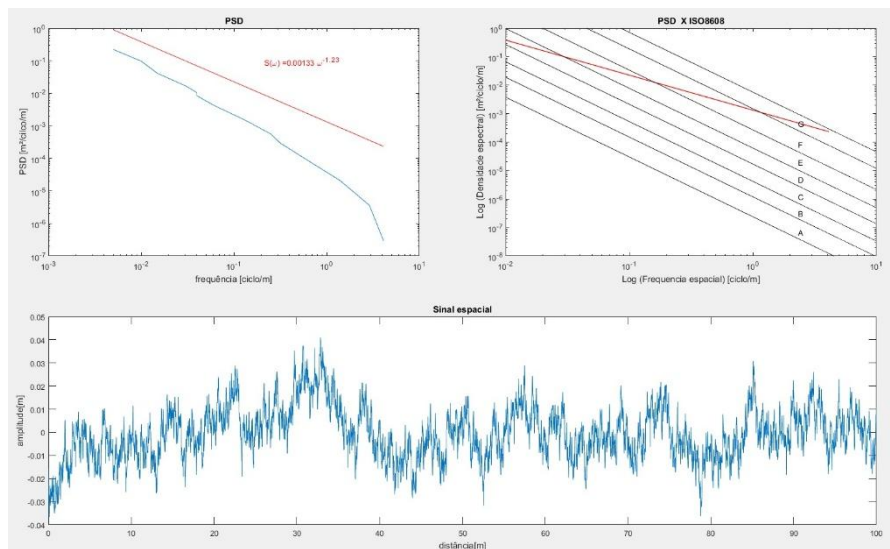
Asfalto com Superfície de Concreto e Camadas de Cimento Portland – 9, Sun, 2001.



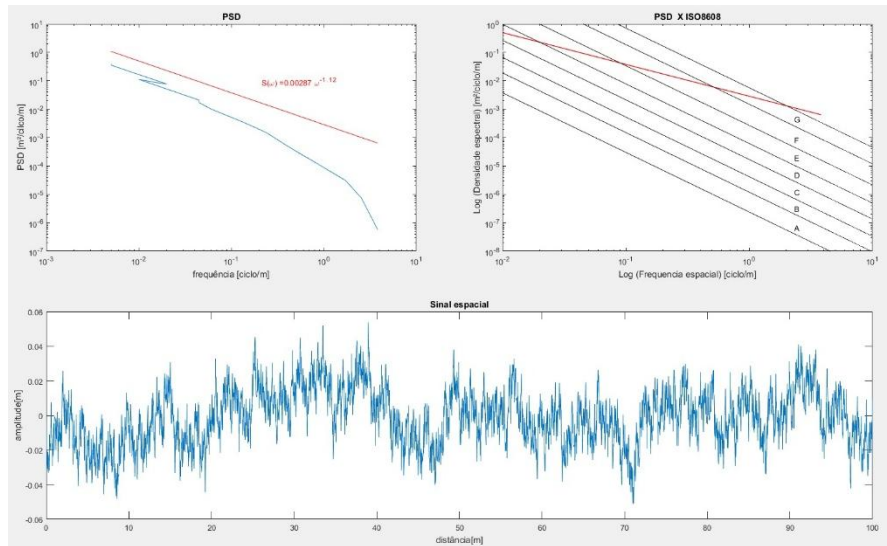
Asfalto com Superfície de Concreto e Camadas de Cimento Portland – 10, Sun, 2001.



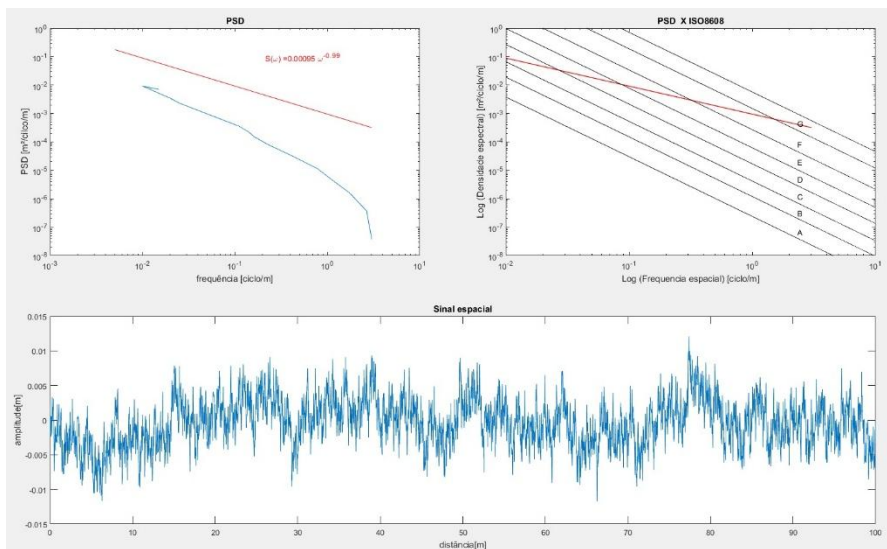
Asfalto com Superfície de Concreto sobre Ponte – 11, Sun, 2001.



Estrada de chão batido – Munari, 2012.



Estrada de transição entre chão batido e asfalto – Munari, 2012.



Asfalto de qualidade baixa – Munari, 2012.