

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

“CARACTERIZAÇÃO DO PERFIL DE PAVIMENTO”

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Para obtenção do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

MÁRCIO CARNEIRO ROCHA

Florianópolis, Dezembro de 2003

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
MESTRADO EM RUÍDO E VIBRAÇÕES**

“CARACTERIZAÇÃO DO PERFIL DE PAVIMENTO”

MÁRCIO CARNEIRO ROCHA

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA

sendo aprovada em sua forma final.

Edison da Rosa – Dr.Eng. – Orientador

José Antonio Bellini da Cunha Neto – Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

Arcanjo Lenzi – PhD – Presidente

Lauro Cesar Nicolazzi – Dr.Eng.

Marco Antonio Martins Cavaco – Phd.

À minha esposa Sibelle,

Às minhas filhas Clara e Isabel e

à minha família,

pela dedicação, carinho e compreensão da ausência.

“Não basta ensinar ao homem uma especialidade. Porque se tornará assim uma máquina utilizável, mas não uma personalidade. É necessário que adquira um sentimento, um senso prático daquilo que vale a pena ser empreendido, daquilo que é belo, do que moralmente correto. A não ser assim, ele se assemelhará, com seus conhecimentos profissionais, mais a um cão ensinado do que a uma criatura harmoniosamente desenvolvida. Deve aprender a compreender as motivações dos homens, suas quimeras e suas angústias para determinar com exatidão seu lugar exato em relação a seus próximos e à comunidade.

Imaginação é mais importante que conhecimento. Para levantar novas questões, novas possibilidades, ou para olhar velhos problemas a partir de um novo ângulo. É necessária imaginação criativa a fim de marcar reais avanços da ciência”.

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Ao professor Edson da Rosa, por sua orientação no desenvolvimento deste trabalho.

À Dra. Silvana Arrivabeni Rizzioli, pelo incentivo durante o curso.

À Fiat Automóveis SA, por possibilitar a realização do curso.

A todos os professores do curso de mestrado que contribuíram para minha formação.

Ao Gilmar Gedeon de Andrade Silva, pela ajuda na construção do perfilômetro.

Ao Irani Coelho Filho, pela ajuda na execução dos testes.

Ao Engenheiro Firmino Sávio Vasconcellos, por sua consultoria.

Aos colegas do Grupo Handling & Freio, que muito me incentivaram durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas do Grupo Experimentação Acústica, pelo convite e apoio durante o curso.

Ao Engenheiro Jose Bosco Tomich Junior, pelas conversas incentivadoras.

Ao Engenheiro Marco Fábio Inglese, pelo apoio e orientação.

Ao Engenheiro Pedro Sinobu Takahashi, pelo apoio durante os testes.

Ao Márcio Mattoso de Pádua, por sua orientação.

Ao Engenheiro Paulo Sérgio Pereira, pela orientação na execução do programa de análise.

E a todos aqueles que participaram direta ou indiretamente para o sucesso deste trabalho.

SUMÁRIO

Agradecimentos	iv
Lista de Figuras	viii
Lista de Fórmulas	xv
Lista de Tabelas	xviii
Lista de Símbolos	xix
Resumo	xxi
Abstract	xxii
Capítulo 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Pista	2
Capítulo 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Metodologias Utilizadas	6
2.1.1 Estático	7
2.1.2 <i>Dipstick</i>	8
2.1.3 Perfilômetro Inercial GM	9
2.2 Fundamentação Matemática	11
2.2.1 PSD – Densidade Espectral de Potência	11
2.2.2 Janelas de Observação	19
2.2.3 Filtros	23
Capítulo 3 METODOLOGIA	26
3.1 Perfilômetro Inercial	26
3.2 Tipo de Pesquisa	30

3.3	Veículo Utilizado	30
3.4	Ambiente Estudado	30
3.5	Variáveis Estudadas	35
3.5.1	Independentes	35
3.5.2	Dependentes.....	35
3.6	Estudo das Características do Perfil do Pavimento	36
3.7	Instrumentação Utilizada para Coleta e Análise dos Dados	36
3.8	Tratamento dos Dados	39
3.9	Parâmetros do Teste	41
3.9.1	Comprimento do Registro	41
3.9.2	Taxa / Freqüência de Amostragem	42
3.9.3	Freqüência de Interesse	44
3.9.4	Cálculo da Força de Contenção da Roda	46
3.9.5	Análise de Freqüência do Sistema.....	49
Capítulo 4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E SUA ANÁLISE	51
4.1	Tipo de Pavimento Medido	51
4.1.1	Granito Polido com Emendas	51
4.1.2	Ondulações Tipo “Quebra Molas”	74
4.1.3	Asfalto	86
4.1.3.1	Asfalto Liso.....	87
4.1.3.2	Asfalto Áspero	91
Capítulo 5	CONCLUSÃO	97
5.1	Perfilômetro	97
5.2	Ferramentas de análise dos dados.....	99

5.3	Ambiente analisado	99
5.4	Proposta para trabalhos futuros.....	100
Apêndice		101
A.1	Características do display e do painel de controle do MGCPlus	101
A.2	Características do Amplificador de tensão e conector do MGCPlus.....	101
A.3	Características do Amplificador de frequência do MGCPlus	102
A.4	Acelerômetro Endevco	103
	A.4.1 Características do Acelerômetro Endevco	104
	A.4.2 Características do Acelerômetro Endevco	105
Bibliografia.....		106

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

Página

Figura 1.1 PSDs típicas de perfil de pista.....4

Capítulo 2

Figura 2.1 Perfilômetro estático.....7

Figura 2.2 Perfilômetro Dipstick8

Figura 2.3 Perfilômetro Inercial10

Figura 2.4 Geração de sinais para um Perfil11

Figura 2.5 Série de Fourier.....12

Figura 2.6 PSD de dois perfis diferentes.....18

Figura 2.7 (a) Senoide observada com janela retangular20

Figura 2.7 (b) Transformada de Fourier da função21

Figura 2.8 Comparativo de $|\prod_t(f)|$ e $|P(f)|$ 23

Figura 2.9 Filtros ideais básicos (a) passa-baixas (b) passa-altas.24

Figura 2.10 Filtros ideais (a) passa banda (b) rejeita-banda24

Figura 2.11	Características de um filtro real.....	25
Capítulo 3		
Figura 3.1	Foto da roda esquerda do perfilômetro – O sistema é independente à suspensão do veículo e o acelerômetro é fixado sobre o eixo da roda.	27
Figura 3.2	Foto da Roda Fônica instalada no veículo	27
Figura 3.3	O contato com o pavimento é garantido pela força da mola sobre a roda do perfilômetro que pode ser alterada colocando lastro sobre o veículo	29
Figura 3.4	Foto da pista de granito polido com emendas – primeiro pavimento escolhido para análise	31
Figura 3.5	Foto da seqüência de ondulações tipo “quebra molas” – segundo pavimento escolhido para análise	32
Figura 3.6	Foto do asfalto liso	33
Figura 3.7	Foto do detalhe da textura do pavimento	33
Figura 3.8	Foto do asfalto áspero.....	34
Figura 3.9	Foto do detalhe do asfalto áspero	34
Figura 3.10	Foto do MGCPlus com os itens descritos	37
Figura 3.11	Acelerômetro Endevco	38
Figura 3.12	Roda Fônica.....	39

Figura 3.13	Diagrama de forças	46
Figura 3.14	Freqüência Natural do conjunto Roda Esquerda.....	49
Figura 3.15	Freqüência Natural do Conjunto Roda direita	49
 Capítulo 4		
Figura 4.1	Sinal do acelerômetro da trilha esquerda sem tratamento	52
Figura 4.2	Sinal do acelerômetro da trilha direita sem tratamento	52
Figura 4.3	Auto Espectro de Potência do sensor da trilha esquerda.....	53
Figura 4.4	Auto Espectro de Potência do sensor da Trilha direita.....	53
Figura 4.5	Auto Espectro de Potência do sensor da Trilha esquerda com Aproximação para observar em baixas freqüências.....	54
Figura 4.6	Auto Espectro de Potência do sensor da Trilha direita com Aproximação para observar em baixas freqüências.....	54
Figura 4.7	Barra de ferro “traversina” piso para prova de conforto.....	55
Figura 4.8	Aceleração indesejável devido a desconformidade da roda esquerda do perfilômetro	57
Figura 4.9	Aceleração indesejável devido a desconformidade da roda Direita do perfilômetro	57
Figura 4.10	Auto Espectro de Potência do sensor da Trilha esquerda conforme o sinal será analisado.....	59

Figura 4.11	Auto Espectro de Potência do sensor da Trilha direita conforme o sinal será analisado.....	59
Figura 4.12	Curva do perfil do pavimento medido – Trilha esquerda.....	60
Figura 4.13	Curva do perfil do pavimento medido – Trilha direita	60
Figura 4.14	Trecho da pista referente a um segundo – Trilha esquerda.....	61
Figura 4.15	Trecho da pista referente a um segundo – Trilha direita.....	61
Figura 4.16	Trecho da pista referente a uma placa de granito – Trilha Esquerda.....	62
Figura 4.17	Trecho da pista referente a uma placa de granito Trilha direita.....	62
Figura 4.18	Foto de uma placa de granito com acúmulo de água no centro	63
Figura 4.19	Trecho da pista referente a uma placa de granito que apresenta certa curvatura no centro	64
Figura 4.20	Trecho da pista referente a uma placa de granito que apresenta certa curvatura no centro	64
Figura 4.21	PSD da elevação da trilha esquerda do pavimento.....	65
Figura 4.22	PSD da elevação da trilha direita do pavimento.....	65
Figura 4.23	Perfil do Pavimento Medido – Trilha esquerda.....	67
Figura 4.24	Perfil do Pavimento Medido – Trilha direita.....	67

Figura 4.25	Trecho de 2,2 metros do perfil medido – Trilha esquerda	69
Figura 4.26	Trecho de 2,2 metros do perfil medido – Trilha direita	69
Figura 4.27	Trecho correspondente a uma placa de granito do perfil medido Trilha esquerda	70
Figura 4.28	Trecho correspondente a uma placa de granito do perfil medido Trilha direita.....	70
Figura 4.29	Foto evidenciando o tamanho de uma placa de granito que compõe o pavimento medido	71
Figura 4.30	Foto evidenciando a falta de alinhamento das placas de granito que compõe o pavimento medido	71
Figura 4.31	Foto evidenciando o desnível entre as placas de granito que compõe o pavimento medido	72
Figura 4.32	PSD do pavimento com variação na velocidade de passagem sobre o pavimento.....	73
Figura 4.33	Sinal do acelerômetro da trilha esquerda sem tratamento	75
Figura 4.34	Sinal do acelerômetro da trilha direita sem tratamento	75
Figura 4.35	Auto Espectro de Potência do sensor da trilha esquerda.....	76
Figura 4.36	Auto Espectro de Potência do sensor da trilha direita.....	76
Figura 4.37	Auto Espectro de Potência do sensor da Trilha esquerda com Aproximação para observar em baixas frequências.....	77

Figura 4.38	Auto Espectro de Potência do sensor da trilha direita com Aproximação para observar em baixas frequências.....	77
Figura 4.39	Auto Espectro de Potência do sensor da trilha esquerda conforme o sinal será analisado.....	79
Figura 4.40	Auto Espectro de Potência do sensor da trilha direita conforme o sinal será analisado.....	79
Figura 4.41	Curva do perfil do pavimento medido – Trilha esquerda.....	80
Figura 4.42	Curva do perfil do pavimento medido – Trilha direita	80
Figura 4.43	Trecho da pista referente a dois segundos	82
Figura 4.44	Trecho da pista referente a dois segundos	82
Figura 4.45	Desenho esquemático da interação da roda do perfilômetro com a ondulação do pavimento	83
Figura 4.46	Início da ondulação – Interação da roda com o pavimento	85
Figura 4.47	Final da ondulação – Interação da roda com o pavimento.....	85
Figura 4.48	Sinal do acelerômetro da trilha esquerda sem tratamento	87
Figura 4.49	Sinal do acelerômetro da trilha direita sem tratamento	87
Figura 4.50	Sinal da integração dupla da aceleração com o sinal da aceleração - Trilha esquerda.....	88
Figura 4.51	Sinal da integração dupla da aceleração com o sinal da aceleração – Trilha direita	88

Figura 4.52	Perfil do Pavimento Medido – Trilha esquerda.....	89
Figura 4.53	Perfil do Pavimento Medido – Trilha direita.....	89
Figura 4.54	PSD da elevação da trilha esquerda do pavimento.....	90
Figura 4.55	PSD da elevação da trilha direita do pavimento.....	90
Figura 4.56	Sinal do acelerômetro da trilha esquerda sem tratamento	91
Figura 4.57	Sinal do acelerômetro da trilha direita sem tratamento	91
Figura 4.58	Sinal da integração dupla da aceleração com o sinal da aceleração – Trilha esquerda.....	92
Figura 4.59	Sinal da integração dupla da aceleração com o sinal da aceleração – Trilha direita.....	92
Figura 4.60	Perfil do pavimento medido – Trilha esquerda	93
Figura 4.61	Perfil do pavimento medido – Trilha direita	93
Figura 4.62	PSD da elevação da trilha esquerda do pavimento.....	94
Figura 4.63	PSD da elevação da trilha direita do pavimento.....	94

LISTA DE FÓRMULAS

Capítulo 2

Página

Fórmula 2.1	$Y_t(x) = \sum_i A_i \text{sen}(\Omega_i x + \mathbf{f}_i)$	11
Fórmula 2.2	$A_i^2 = \int_{\Omega_i - \frac{\Delta\Omega}{2}}^{\Omega_i + \frac{\Delta\Omega}{2}} S(\Omega) d\Omega$	11
Fórmula 2.3	$R(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(f) e^{i2\mathbf{p}ft} df$	14
Fórmula 2.4	$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R(t) e^{i2\mathbf{p}ft} dt$	14
Fórmula 2.5	$R(t) = \frac{1}{2\mathbf{p}} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\mathbf{w}) e^{+i\mathbf{w}t} d\mathbf{w}$	14
Fórmula 2.6	$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R(t) e^{-i\mathbf{w}t} dt$	14
Fórmula 2.7	$R(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(\mathbf{w}) e^{+i\mathbf{w}t} d\mathbf{w}$	14
Fórmula 2.8	$S(\mathbf{w}) = \frac{1}{2\mathbf{p}} \int_{-\infty}^{+\infty} R(t) e^{-i\mathbf{w}t} dt$	15
Fórmula 2.9	$R(t) = 2 \int_0^{+\infty} S(f) \cos(2\mathbf{p}ft) df$	15

- Fórmula 2.10 $R(\mathbf{t}) = 4\mathbf{p} \int_0^{+\infty} S(\mathbf{w}) \cos(2\mathbf{p} \cdot \mathbf{f} \cdot \mathbf{t}) d\mathbf{f} \dots\dots\dots 15$
- Fórmula 2.11 $W(f) = 4\mathbf{p} S(\mathbf{w}) = 2S(f) \dots\dots\dots 15$
- Fórmula 2.12 $R_x(\mathbf{t} \rightarrow 0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(\mathbf{t})x(\mathbf{t} + \mathbf{t})d\mathbf{t} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(\mathbf{t})d\mathbf{t} = E|x(\mathbf{t})^2| \dots\dots\dots 16$
- Fórmula 2.13 $R_x(\mathbf{t} \rightarrow \infty) = m_x^2 \dots\dots\dots 16$
- Fórmula 2.14 $\overline{x(\mathbf{t})^2} = R_x(\mathbf{t} \rightarrow 0) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(f)d\mathbf{f} \dots\dots\dots 16$
- Fórmula 2.15 $f = \Omega \cdot v \dots\dots\dots 17$
- Fórmula 2.16 $S(\Omega) = C\Omega^{-N} \dots\dots\dots 17$
- Fórmula 2.17 $X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(t)e^{i2\mathbf{p} \cdot \mathbf{f} \cdot t} dt \dots\dots\dots 19$
- Fórmula 2.18 $X(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f)e^{i2\mathbf{p} \cdot \mathbf{f} \cdot t} d\mathbf{f} \dots\dots\dots 19$
- Fórmula 2.19 $x'(t) = x(t) \prod_t(t) \begin{cases} = 0 \Rightarrow t < 0 \\ = 1 \Rightarrow 0 \leq t \leq \mathbf{t} \\ = 0 \Rightarrow t > \mathbf{t} \end{cases} \dots\dots\dots 20$
- Fórmula 2.20 $|X'(f)| = \mathbf{t} \frac{\text{sen } \mathbf{p} \cdot \mathbf{f} \cdot \mathbf{t}}{\mathbf{p} \cdot \mathbf{f} \cdot \mathbf{t}} e^{-i\mathbf{p} \cdot \mathbf{f} \cdot \mathbf{t}} * \left\{ \frac{1}{2} i(f + f_0) - \mathbf{d}(f - f_0) \right\} \dots\dots\dots 21$
- Fórmula 2.21 $X'(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \prod_t(f - \mathbf{x}) \left[\frac{1}{2} i[\mathbf{d}(\mathbf{x} + f_0) - \mathbf{d}(\mathbf{x} - f_0)] \right] d\mathbf{x} = \dots\dots\dots 21$
 $= \frac{1}{2} i \prod_t(f + f_0) - \frac{1}{2} i \prod_t(f - f_0)$

Fórmula 2.22 $x'(t) = x(t)p(t) \xrightarrow{F} X'(f) = X(f) * P(f) \dots\dots\dots 22$

Fórmula 2.23 $X'(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f - \mathbf{x})t \frac{\text{sen}p\mathbf{x}t}{p\mathbf{x}t} e^{-i\mathbf{p}\mathbf{x}t} d\mathbf{x} \dots\dots\dots 22$

Fórmula 2.24 $p(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} P(f)df = 1 \dots\dots\dots 22$

Fórmula 2.25 $p(t) \begin{cases} = 0 \Rightarrow t < -t/2 \\ = \cos^2 \mathbf{p}t/\mathbf{p} \Rightarrow -t/2 \leq t/2 \\ = 0 \Rightarrow t > t/2 \end{cases} \dots\dots\dots 22$

Fórmula 2.26 $\cos^2 \frac{\mathbf{p}t}{t} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \frac{2\mathbf{p}t}{t} = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} e^{i2\mathbf{p}t/t} + \frac{1}{4} e^{-i2\mathbf{p}t/t} \dots\dots\dots 23$

Fórmula 2.27 $p(t) = \cos^2 \frac{\mathbf{p}t}{t} \prod_t(t) \dots\dots\dots 23$

Fórmula 2.28 $P(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4} e^{-i2\mathbf{p}t/t} + \frac{1}{4} e^{+i2\mathbf{p}t/t} \right) \prod_t(t) e^{-i2\mathbf{p}ft} dt \dots\dots\dots 23$

Fórmula 2.29 $P(f) = \frac{1}{4} \prod_t \frac{1}{4} \prod_t \left(f - \frac{1}{t} \right) + \frac{1}{2} \prod_t(f) + \frac{1}{4} \prod_t \left(f + \frac{1}{t} \right) \dots\dots\dots 23$

Capítulo 3

Fórmula 3.1 $l_{\min} \geq 10l_{\max} \dots\dots\dots 42$

Fórmula 3.2 $\Delta l_{\max} \leq \frac{1}{10} l_{\min} \dots\dots\dots 43$

Fórmula 3.3 $l_{\min} = \frac{1}{\Omega_{\max}} \dots\dots\dots 43$

Fórmula 3.4	$f_{most} = \frac{v}{\Delta l}$	43
Fórmula 3.5	$\Omega_{min} = \frac{1}{l_{max}}$	45
Fórmula 3.6	$\Omega_{max} = \frac{1}{l_{min}}$	45
Fórmula 3.7	$F_a = M.X''$	47
Fórmula 3.8	$w = 2.p.f$	47
Fórmula 3.9	$Y_t = A.Sen(w.t)$	47
Fórmula 3.10	$Y'' = -w^2 A.sen(w.t)$	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Tipos de pavimento	17
------------	--------------------------	----

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Amplitude [m]
f	Freqüência [Hz]
f_c	Freqüência de corte [Hz]
f_{amost}	Freqüência de amostragem [Hz]
F_a	Força de contenção da roda [kg.f]
l	Comprimento do registro [m]
m	média
M	Massa [kg]
p	Janela de visualização
$R(t)$	Auto Correlação
$S(\Omega)$	Densidade Espectral de Potência [m ² .m/ciclo]
t	Tempo [s]
T	Tempo total do registro [s]
v	Velocidade [m/s]
X	Transformada de Fourier
x	Deslocamento longitudinal [m]
Y	Deslocamento Vertical [m]
Y''	Aceleração vertical [m/s ²]

$W(f)$	Densidade Espectral de Potência Experimental
l	Comprimento de onda
w	Frequência [rad/s]
Ω	Frequência [rad/m] – [ciclos/m]

RESUMO

Este trabalho tem como propósito o estudo das técnicas de caracterização do perfil do pavimento, bem como o desenvolvimento de um Perfilômetro que retratará as irregularidades encontradas nas estradas de trabalho¹. Irregularidades estas que influenciam diretamente no comportamento e no conforto vibracional dos automóveis.

O trabalho foi composto por três etapas. Na primeira, é feito o estudo teórico onde serão mostrados métodos de medição de pavimento existentes e a fundamentação teórica. Na segunda etapa, será mostrado o método utilizado na medição com as descrições da instrumentação bem como os resultados das medições. Na terceira etapa, é feita a análise dos dados obtidos nas medições de forma a mostrar o perfil do piso medido.

O resultado obtido é uma curva de deslocamento vertical em função do deslocamento horizontal que poderá ser introduzida nos *softwares* de simulação para o desenvolvimento virtual da suspensão.

1 – Estradas utilizadas para o desenvolvimento das suspensões dos veículos e ou estradas de utilização pública, sendo estas pistas de testes construídas com determinados padrões de irregularidade ou pistas públicas, utilizadas pelos proprietários onde os veículos terão que atender a padrões de conforto vibracional exigidos pelo usuário

ABSTRACT

This paper is being developed as a manner to study the techniques to characterize the profile of the pavements as well as develop a way to measure those profiles that will reflect the imperfections found on the study lanes¹. Those imperfections which interfere directly on the handling and vibrational confort of the vehicles.

The paper is made of three stages. On the first stage a theoretical study is done where methods of measurement of existing pavement is presented along with its theoretical explanations. On the second stage the method used along with the specification of the instruments and its results are presented. On the third stage an analisis of the data obtained from the measurements are used to create a profile of the measured lane.

The obained result is a graphic of vertical deviation versus the horizontal deviation that can be introduced in the simulation softwares to develop the virtual suspension.

¹ – Roads used to the development of the vehicles suspension or roads of public usage. These development roads are built with some standard irregularities as well as these public roads where some confort regarding vibration is required by the users.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

Esta dissertação tem como principal objetivo fornecer ao sistema de simulação virtual o perfil dos pavimentos utilizados na avaliação subjetiva dos veículos durante o desenvolvimento das suspensões sendo este perfil suficiente para retratar a realidade dos pavimentos.

A retratação da irregularidade do pavimento é de fundamental importância quando o desenvolvimento das suspensões é feito através do método de simulação virtual, visto que, estes estão sendo cada vez mais utilizados com o objetivo de redução no tempo de desenvolvimento do projeto.

Com a utilização deste método tem-se a possibilidade de analisar em um curto espaço de tempo as várias possibilidades de configurações de suspensão. Porém, apenas este método ainda não é suficiente para concluir qual configuração de suspensão ficará melhor sendo necessárias avaliações subjetivas em diversas qualidades de pistas encontradas no país de destino dos veículos.

É comum durante o desenvolvimento a avaliação subjetiva de diversas configurações de suspensão com características variadas².

Estas diversas configurações quando conjugadas, geram uma enorme quantidade de provas subjetivas o que torna o desenvolvimento dos projetos moroso, justificando, portanto, a utilização de simuladores que têm a função de filtrar algumas configurações que estarão fora das características esperadas para cada veículo. Esta filtragem será beneficiada uma vez que o simulador trabalhe com o mesmo perfil do pavimento onde são feitas as avaliações subjetivas.

O perfil propriamente dito será conseguido através de medições de acelerações e deslocamento de um dispositivo que tem características bastante parecidas com os já conhecidos Perfilômetros. Estas medições são analisadas de tal forma a se conseguir no final o perfil do pavimento.

1.2 Pista

Do ponto de vista construtivo, segundo David Croney e Paul Croney [1], o pavimento contém irregularidades que são classificadas como sendo:

Micro-textura – que é devida a natureza mineralógica do agregado utilizado na construção do pavimento. Esta micro-textura é composta de comprimentos de onda

² – Molas com variação de flexibilidade, carga ou altura de controle - amortecedores com variação de amortecimento seja na compressão ou na tração - batentes com variação na densidade, altura ou curva – barras com variação no diâmetro – pneu com variação na construção, pressão e desenho – coxins com variação na curva de funcionamento.

da ordem de 0,001 mm e é responsável pela resistência ao arraste até velocidades de 50 km/h.

Macro-textura – é devida ao traço e dosagem da mistura asfáltica. A Macro-textura são comprimentos de onda da ordem de 1,0 mm e é responsável pela resistência ao arraste a velocidades acima de 50 km/h e também responsável em fazer o escoamento da água.

Mega-textura ou Irregularidade de perfil longitudinal – são comprimentos de onda da ordem de 2 m e é caracterizado pelo IRI (*International roughness Index*). O IRI é uma representação estatística da quantidade de movimento vertical em unidade pela quantidade de movimento longitudinal em milhar. As irregularidades de perfil longitudinal estão relacionadas com a deformabilidade do pavimento em função do acúmulo dos esforços resistentes e atuantes.

Aspereza do pavimento segundo Gillespie [2] é função tanto das limitações técnicas de construção do pavimento que se referem aos limites práticos para a qual a superfície pode ser construída e mantida quanto dos defeitos localizados como buracos e trincas. As elevações que constituem as asperezas de um pavimento se alteram de forma randômica ao longo do comprimento, portanto, a representação adequada somente é possível através de uma análise estatística.

Uma composição de espectro senoidal de variados números de onda geralmente compreendidos entre 0,016 ciclos/m e 1,6 ciclos/m pode ser a representação de um perfil de estrada, para efeitos de simulação. A forma mais empregada na

representação de um perfil de pavimento é a PSD (*Power Spectral Density*), que é a representação estatística da contribuição de cada número de onda.

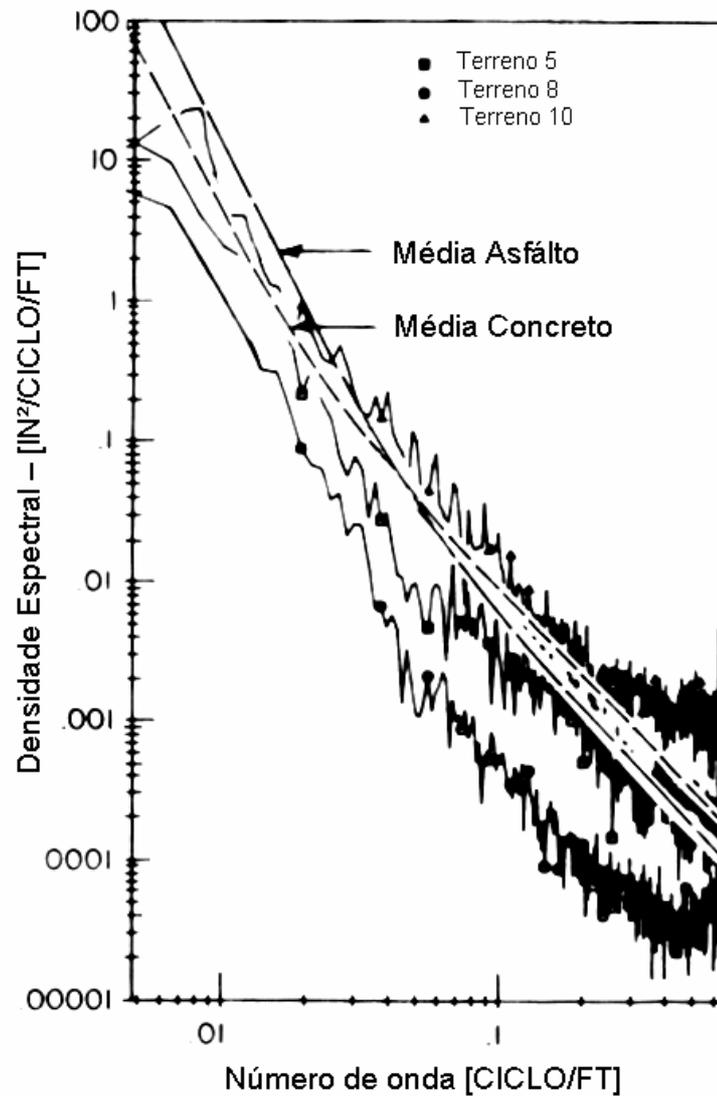


Figura 1.1 - PSDs típicas de perfil de pista

Existem aspectos similares que são relevantes para o desenvolvimento da análise do pavimento ainda que cada estrada tenha característica de perfil diferente. Na figura 1.1 são apresentadas as PSDs de vários perfis de pavimento onde é possível

observar que a densidade espectral é mais elevada na região onde o número de ondas é menor. Ao observar o aumento do número de onda uma regra geral a ser considerada é a diminuição das amplitudes de excitação.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Metodologias Utilizadas

Os chamados perfilômetros como definido no *The Little Book of Profiling* [3] são instrumentos utilizados para medições do perfil de pavimento. Eles têm como características retratar o verdadeiro perfil do pavimento através de uma série de números relacionados, porém, estes números nem sempre são iguais à verdadeira elevação do pavimento. Os perfilômetros medem as componentes do perfil do pavimento de forma verdadeira para determinados propósitos. De qualquer forma, a relação entre os dados medidos por um Perfilômetro e um verdadeiro perfil de pavimento deve alcançar uma especificação. Um perfilômetro funciona combinando três elementos:

- a) referência de elevação;
- b) altura relativa para a referência;
- c) distância longitudinal.

Estes elementos são associados em diferentes maneiras tomando como base o modelo do Perfilômetro.

2.1.1 – Estático

O método de medida de nível é chamado “Estático” porque os instrumentos não se movem quando as medidas de elevação são tomadas.

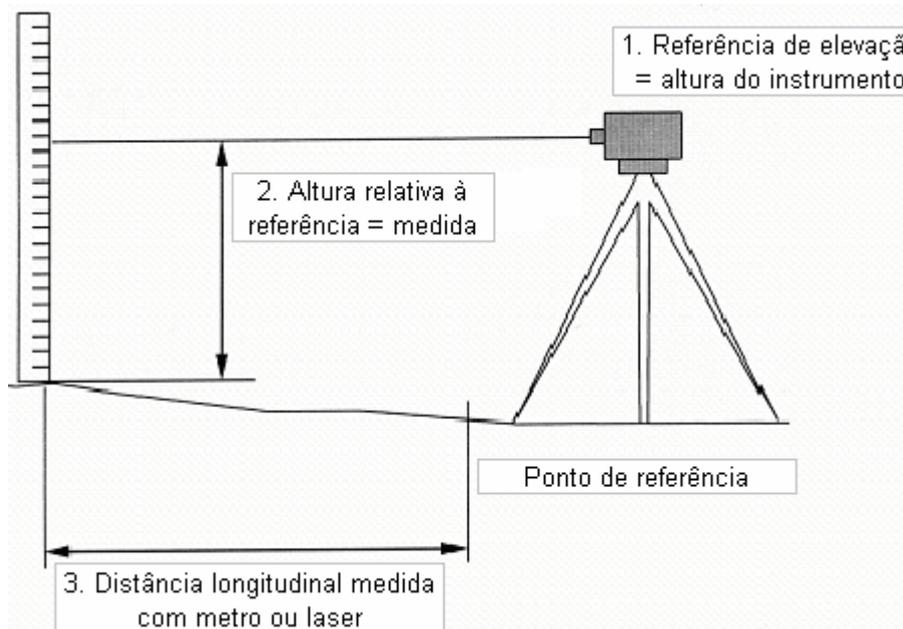


Figura 2.1 - Perfilômetro estático

Deve-se medir a elevação em intervalos próximos de 0,30 m ou menos. As medidas das alturas individuais devem ser próximas de 0,5 mm ou menos. A altura absoluta do instrumento não é de interesse quando está medindo o perfil para aspereza, apesar disto deve ser um motivo de grande preocupação quando usamos equipamentos de nível para outras aplicações. ASTM Standard E1364 fornece orientação para medida de perfis com método estático.

2.1.2 – Dipstick

O *dipstick* é um aparelho desenvolvido, patenteado e usado pela *Face Company*. Ele é um aparelho rápido e plano para medir conjunto de perfis para análise de aspereza e com auxílio de computadores para coletar e analisar dados com performance aritmética para produzir um perfil.

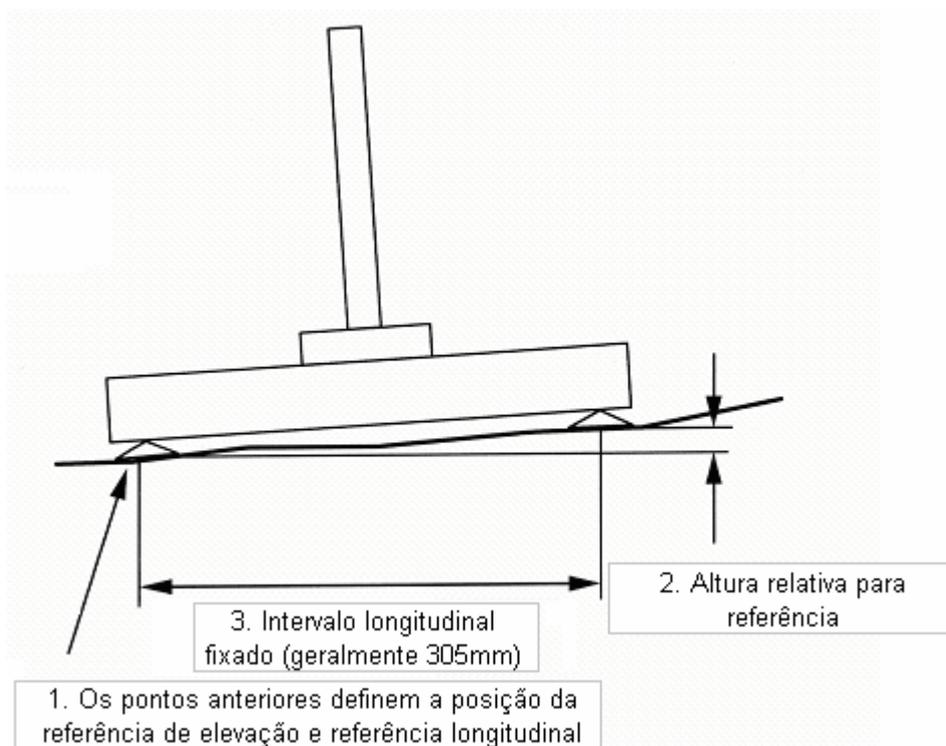


Figura 2.2 - Perfilômetro Dipstick

O correto é andar através da linha que está sendo traçada. Ela contém a inclinação exata que mede a diferença em altura entre os dois suportes, geralmente com espaço de 305 mm. Para medir uma linha no chão, inclina-se a ferramenta para que todo seu peso esteja sobre o pé de comando, levantando o pé de trás lentamente do chão. Então se gira a ferramenta 180° sobre o pé de comando, localizando o outro pé (formalmente atrás) em frente, junto da linha que está sendo traçada.

O computador monitora o sensor continuamente. Quando ele percebe que o instrumento se estabilizou, este automaticamente grava a troca em elevação e avisa que o próximo passo pode ser tomado. Com este desenho, a referência de elevação é o valor calculado pelo ponto anterior. A altura relativa para a referência é deduzida pelo ângulo formado entre o instrumento e o solo, junto com o espaço entre os suportes. A distância longitudinal é determinada pela multiplicação do número da medida feita pelos espaços conhecidos.

2.1.3 – Perfilômetro Inercial GM

A referência inercial é fornecida por um acelerômetro. O algoritmo de processamento de dados converte a medida da aceleração vertical a uma referência inercial que define a altura instantânea do acelerômetro (do veículo) e o chão abaixo do acelerômetro. Esta altura é medida com o sensor sem contato como o conversor a laser. A distância longitudinal do instrumento é geralmente encontrada através do velocímetro.

Um perfilômetro inercial deve estar se movendo a mais de 15 km/h para funcionar. Este tipo de equipamento não funciona muito bem a baixas velocidades e requer velocidades específicas.

Para a utilização deste tipo de instrumento é necessário um motorista experiente pois é difícil fazer a conexão entre os sensores e uma linha imaginária traçada sobre o pavimento quando a velocidade do veículo é de 100

km/h.

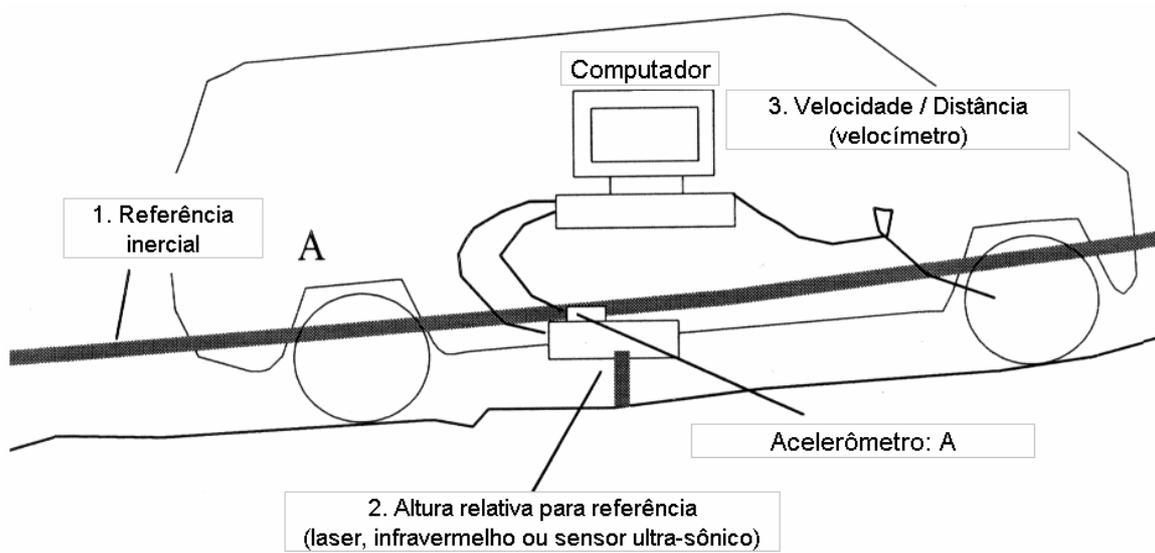


Figura 2.3 – Perfilômetro Inercial

2.2 – Fundamentação Matemática

2.2.1 - PSD – Densidade Espectral de Potência

A função PSD (Densidade Espectral de Potência) é uma representação estatística da importância de vários números de onda cujas frequências e amplitudes são dadas por $S(\Omega)$.

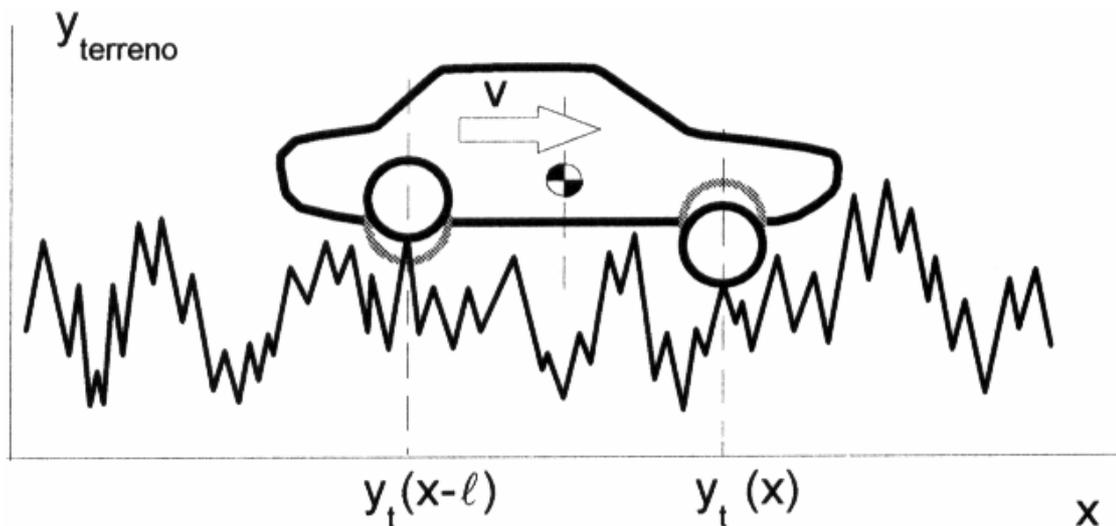


Figura 2.4 - Geração de sinais para um Perfil

O perfil deste pavimento pode ser gerado fazendo

$$Y_t(x) = \sum_i A_i \text{sen}(\Omega_i x + f_i) \quad (2.1)$$

$$A_i^2 = \int_{\Omega_i - \frac{\Delta\Omega}{2}}^{\Omega_i + \frac{\Delta\Omega}{2}} S(\Omega) d\Omega \quad (2.2)$$

Um perfil típico de estrada não tem relação direta com uma simples função senoidal.

Uma curva de forma arbitrária pode ser construída matematicamente de uma série de senoides com diferentes comprimentos de onda, amplitudes e fase.

A figura a seguir mostra como vários tipos de senoides são somadas para aproximar-se do período. Se uma simples senoide é usada cujo comprimento de onda é o mesmo do que uma distância coberta pelo gráfico, a amplitude e a fase são estabelecidas para fornecer apenas o primeiro contorno da aproximação indicado por $N = 1$.

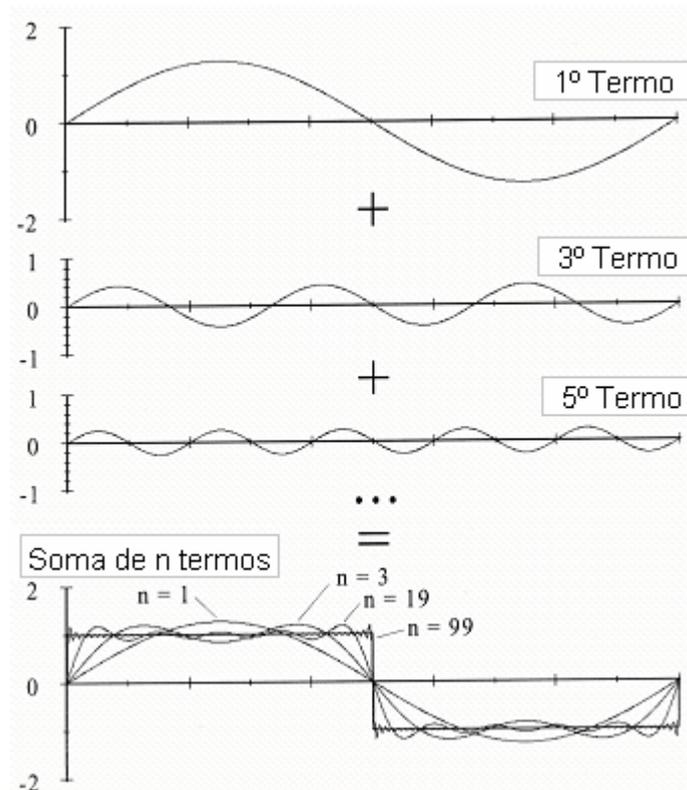


Figura 2.5 – Série de Fourier

Resulta que para uma mudança de período mostrado, as amplitudes para todos as senoides cujos comprimentos de onda são um divisor par do comprimento

$\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{6}, etc\right)$ deveriam ser zero. Uma senoide não causa aproximação para corresponder a um período ainda melhor. Entretanto, para comprimento de ondas que são divisores ímpares $\left(1, \frac{1}{3}, \frac{1}{5}, etc\right)$, cada senoide adicional melhora a aproximação. O gráfico mostra que uma aproximação rigorosa é obtida para um grande número de termos (por exemplo, $N = 99$).

O método geral para “construir” uma mudança do período com senoides funciona também para um perfil arbitrário. Se um perfil é definido com uma elevação espaçada de pontos igualmente $2N$, então pode ser duplicado matematicamente com N senoides. Há tantas senoides sendo adicionadas e suas amplitudes individuais não são largas, portanto, uma transformação matemática existe tal que processa as amplitudes das senoides que podem ser adicionadas para construir o perfil. Isso é chamado de Transformada de Fourier. A Transformada de Fourier pode ser definida em escala de tal forma que mostra como a variação do perfil espalha-se sobre uma rede de senoides. Quando estabelecida desta forma a transformação é chamada de PSD.

Uma função PSD mostra como a variação é distribuída sobre o número de ondas e fornece informações dos dados no domínio da frequência tal como as funções de correlação fornecem no domínio do tempo.

A função PSD descreve como a energia do sinal $x(t)$ está distribuída no domínio da frequência.

A função PSD e a função de auto-correlação $R(t)$ estão relacionadas por um par de transformada de Fourier (relações de Wiener-Kintchine) descritas abaixo:

$$R(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(f) e^{i2\pi ft} df \quad (2.3)$$

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R(t) e^{i2\pi ft} dt \quad (2.4)$$

onde $S(f)$ é a densidade espectral nos dois lados ($-\infty < f < +\infty$).

O par de transformada de Fourier acima também pode ser assim expresso como:

$$R(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(f) e^{+i\omega t} d\omega \quad (2.5)$$

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2.6)$$

onde $S(f)$ é expressa em média quadrática / frequência unitária em Hz.

Se $S(f)$ for substituído por $S(\omega)$, onde $S(\omega)$ é expressa como média quadrática/(rad/s) ($S(\omega) = S(f)/2\pi$) as equações acima poderão assim ser expressas como:

$$R(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) e^{+i\omega t} d\omega \quad (2.7)$$

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2.8)$$

As equações 2.3 e 2.4, 2.5 e 2.6, e 2.7 assim como a 2.8 são equivalentes.

A unidade da PSD (Densidade Espectral de Potência) é a média quadrática/Hz e a PSD é expressa apenas no lado positivo das frequências (PSD de um lado, $0 < f < +\infty$). A PSD experimental será determinada por $W(f)$. A equação 2.3 para frequências positivas é dada por:

$$R(t) = 2 \int_0^{+\infty} S(f) \cos(2\pi f t) df \quad (2.9)$$

mas $S(\omega) = S(f) / 2\pi$. Portanto, deste modo:

$$R(t) = 4\pi \int_0^{+\infty} S(\omega) \cos(2\pi f t) df \quad (2.10)$$

Na equação acima o termo $4\pi S(\omega)$ é a densidade espectral experimental $W(f)$.

$$W(f) = 4\pi S(\omega) = 2S(f) \quad (2.11)$$

O Fator “ 4π ” é um artifício do fator 2π considerado para mudanças na unidade de frequência $\omega = 2\pi f$ e o fator 2 é devido por considerarmos apenas as frequências positivas.

A função de auto-correlação $R_x(t)$ para $R_x(t \rightarrow 0)$ é:

$$R_x(t \rightarrow 0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+t) dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt = E|x(t)|^2 \quad (2.12)$$

e $R_x(0)$ é igual a média quadrática.

E quando $t \rightarrow \infty$ o processo não tem correlação e assim:

$$R_x(t \rightarrow \infty) = m_x^2 \quad (2.13)$$

onde m é a média de $x(t)$.

As equações 2.12 e 2.13, para $t \rightarrow 0$ resultam em:

$$\overline{x(t)^2} = R_x(t \rightarrow 0) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(f) df \quad (2.14)$$

Que é igual à área sob a curva de $S(f)$, em freqüência, que é igual à energia total do sinal. A equação 2.14 equivale à equação 2.2.

Para caracterizar o perfil de um pavimento, a forma mais exata é considerar como um processo estocástico, com variações de altura sendo função da posição espacial.

A análise de Fourier do perfil deve considerar a freqüência espacial, Ω , rad/m. Assim, os períodos são os comprimentos de onda. Na passagem do veículo sobre o pavimento, as excitações do pavimento devem ser colocadas na forma de freqüência temporal, relacionando diretamente a freqüência espacial e a velocidade v de deslocamento, m/s, na forma:

$$f = \Omega.v \quad (2.15)$$

O resultado final da análise do pavimento $S(\Omega)$ é a densidade espectral do perfil do pavimento que pode ser representada por:

$$S(\Omega) = C\Omega^{-N} \quad (2.16)$$

C e N dependem do tipo de pavimento.

A tabela a seguir, segundo Edison da Rosa [4], fornece algumas indicações em m e ciclos/ m .

Tabela 2.1 – Tipos de pavimento.

Nº	Descrição	C	N
1.	Pista de aeroporto lisa	$4,3 \times 10^{-11}$	3,8
2.	Pista de aeroporto rugosa	$8,1 \times 10^{-6}$	2,1
3.	Estrada lisa	$4,8 \times 10^{-7}$	2,1
4.	Estrada com brita	$4,4 \times 10^{-6}$	2,1
5.	Campo de pasto	$3,0 \times 10^{-4}$	1,6
6.	Campo arado	$6,5 \times 10^{-4}$	1,6

Considere dois perfis de estrada com características similares de propriedade de aspereza mas obviamente de diferentes formas de perfis.

As amplitudes PSD abrangem muitas ordens de magnitude. Para baixos números de ondas, as amplitudes são muito mais altas do que para altos números de ondas.

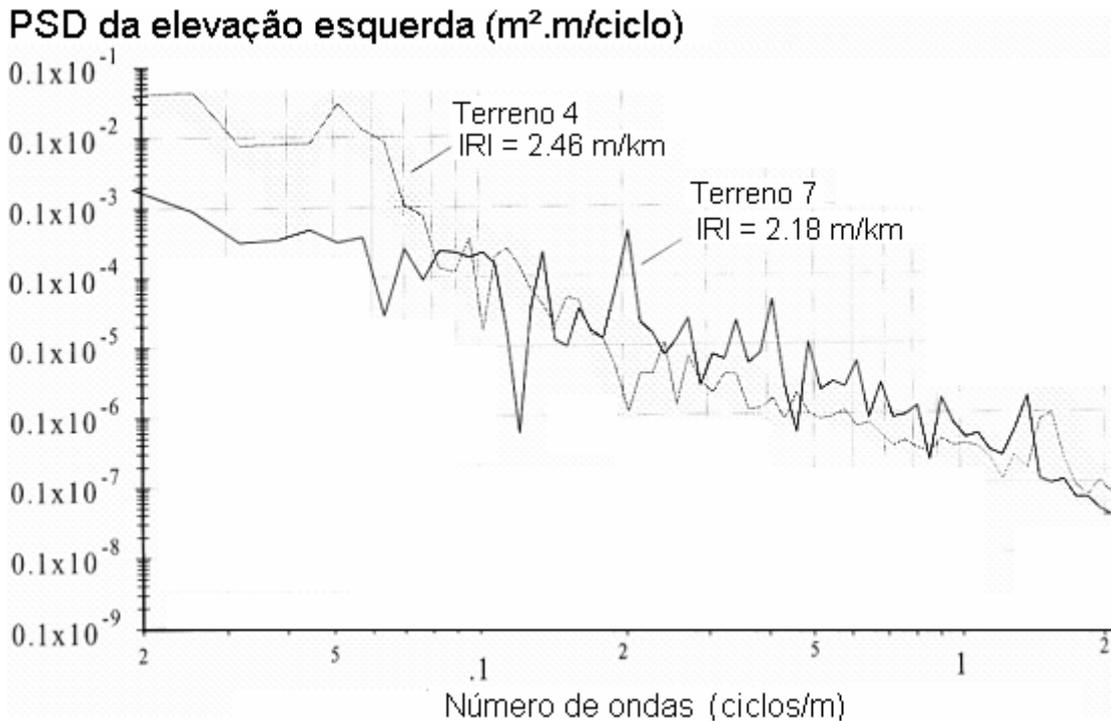


Figura 2.6 – PSD de dois perfis diferentes

Na Figura 2.6, o pavimento de nº4 tem relativamente mais altas amplitudes para baixo número de ondas nas proximidades de 0,1 ciclo/m o que corresponde a visíveis ondulações. Por outro lado, no pavimento de nº4 há amplitudes mais baixas para um alto número de ondas perto de 1 ciclo/m. Note que o pavimento de nº4 é mais acidentado para números de ondas menores que 0,1 ciclos/m e mais suave para comprimentos de onda entre 0,2 ciclos/m e 1 ciclo/m.

2.2.2 – Janelas de Observação

A Transformada de Fourier direta $x(t) \xrightarrow{F} X(f)$ dada pela equação (2.17) e conseqüentemente sua inversa $X(f) \xrightarrow{F^{-1}} x(t)$ pela equação (2.18) permite a representação de um sinal do domínio das freqüências ou no domínio do tempo.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{i2\pi ft} dt \quad (2.17)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) e^{-i2\pi ft} df \quad (2.18)$$

A definição da transformada de Fourier dada pela expressão (2.17) implica numa dificuldade de obtenção prática devido aos limites de integração. Como os sinais tratados provêm da observação de fenômenos físicos, eles terão um início e um término dentro dos limites finitos no tempo. Implicando, assim matematicamente, no truncamento do sinal.

Pegando-se como exemplo uma senoide com duração t . Matematicamente é o mesmo que multiplicar a senoide $\sin 2\pi f_0 t$ por uma função “janela retangular” de amplitude unitária e duração t :

$$x'(t) = x(t) \prod_t(t) \begin{cases} = 0 \Rightarrow t < 0 \\ = 1 \Rightarrow 0 \leq t \leq t \\ = 0 \Rightarrow t > t \end{cases} \quad (2.19)$$

Seria como a figura 2.7 se fosse observada a senoide através de uma janela retangular:

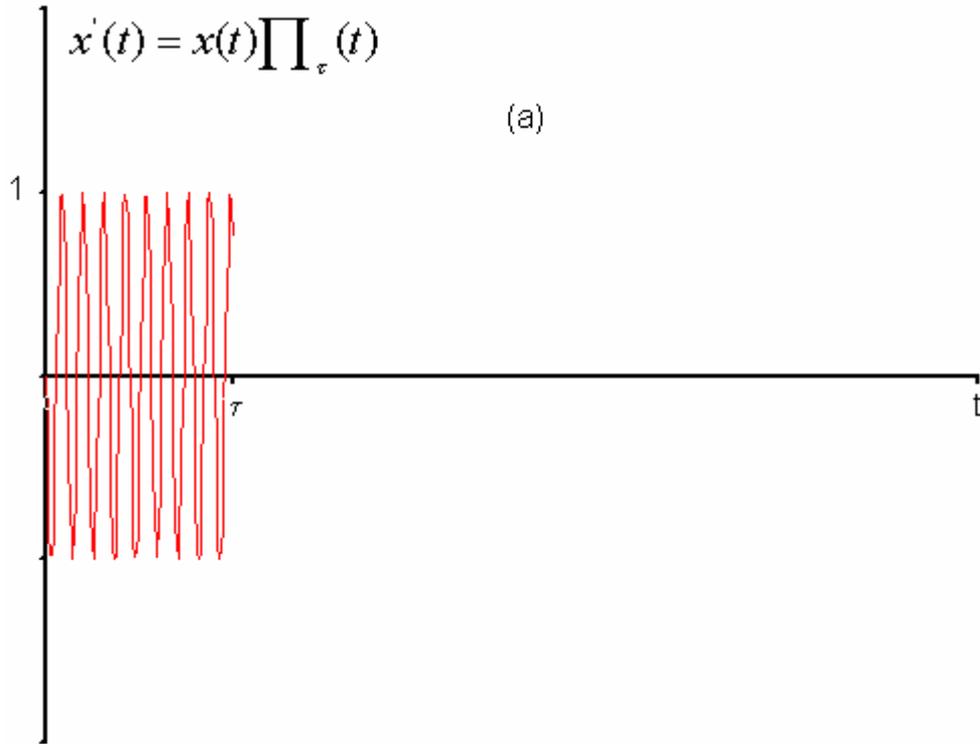


Figura 2.7 (a) – Senoide observada com janela retangular

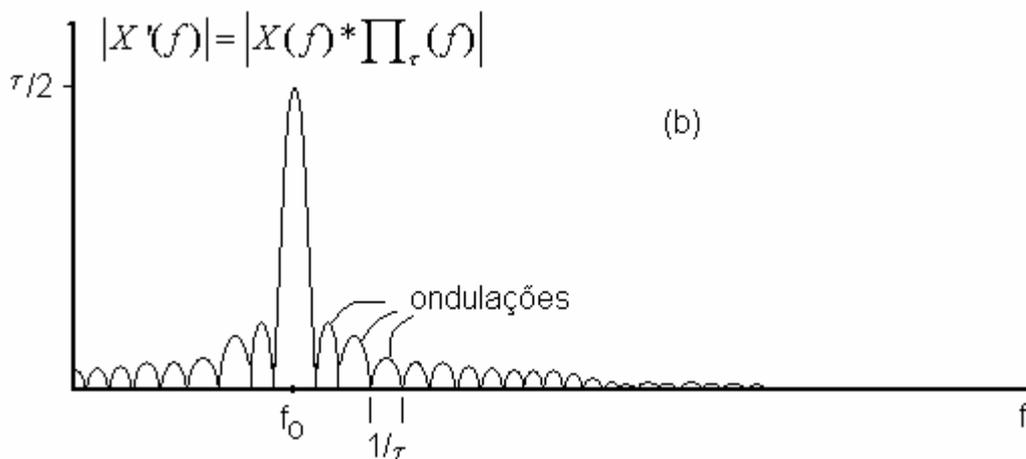


Figura 2.7 (b) – Transformada de Fourier da função

Pelo teorema da convolução para multiplicação no tempo é o mesmo que fazer em frequência a convolução da transformada da senoide com a transformada da função.

$$|X'(f)| = t \frac{\text{sen} p f t}{p f t} e^{-ip f t} * \left\{ \frac{1}{2} i (f + f_0) - d(f - f_0) \right\} \quad (2.20)$$

Aplicando as propriedades da distribuição d :

$$\begin{aligned} X' f &= \int_{-\infty}^{+\infty} \Pi_t(f - x) \left[\frac{1}{2} i [d(x + f_0) - d(x - f_0)] \right] dx = \\ &= \frac{1}{2} i \Pi_t(f + f_0) - \frac{1}{2} i \Pi_t(f - f_0) \end{aligned} \quad (2.21)$$

onde $\Pi_t(f)$ é a transformada de $\Pi_t(t)$. $X'(f)$ é mostrada na figura 2.7(b).

Dada uma janela $p(t)$ de transformada $P(f)$ e um sinal observado através dela $x(t)$, tem-se que:

$$x'(t) = x(t)p(t) \xrightarrow{F} X'(f) = X(f) * P(f) \quad (2.22)$$

para a janela retangular, ou seja, o sinal truncado com duração t :

$$X'(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f - x) t \frac{\text{sen} p x t}{p x t} e^{-ip x t} dx \quad (2.23)$$

Pode-se imaginar que, o sinal truncado tem componentes de frequências vizinhas e as ondulações laterais (2.7(b)) introduzirão erros na leitura das amplitudes.

Com o objetivo de atenuar este problema, podem-se utilizar outras formas de janelas onde observa-se uma diminuição nas amplitudes das ondulações laterais que é

conseguida em troca da precisão na medida da frequência pois o pico principal fica mais arredondado.

As janelas são normalizadas de tal forma que:

$$p(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} P(f)df = 1 \quad (2.24)$$

A janela mais utilizada é a janela de Hanning que é expressa por:

$$p(t) \begin{cases} = 0 \Rightarrow t < -t/2 \\ = \cos^2 \frac{pt}{p} \Rightarrow -t/2 \leq t/2 \\ = 0 \Rightarrow t > t/2 \end{cases} \quad (2.25)$$

para obter a transformada $P(f)$ faz-se:

$$\cos^2 \frac{pt}{t} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \frac{2pt}{t} = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} e^{i2pt/t} + \frac{1}{4} e^{-i2pt/t} \quad (2.26)$$

Aplicando então (2.17) com:

$$p(t) = \cos^2 \frac{pt}{t} \prod_t(t) \quad (2.27)$$

Tem-se:

$$P(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4} e^{-i2pt/t} + \frac{1}{4} e^{+i2pt/t} \right) \prod_t(t) e^{-i2pft} dt \quad (2.28)$$

como $\prod_t(f) \xleftarrow{F} \prod_t(t)$ finalmente resulta em:

$$P(f) = \frac{1}{4} \prod_t \frac{1}{4} \prod_t (f - \frac{1}{t}) + \frac{1}{2} \prod_t (f) + \frac{1}{4} \prod_t (f + \frac{1}{t}) \quad (2.29)$$

A figura 2.8 - mostra um comparativo entre $\prod_t (f)$ e $P(f)$ de hanning.

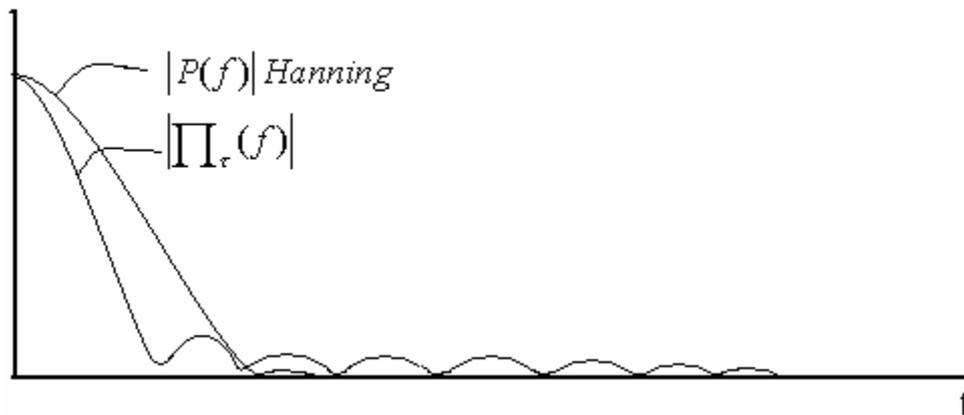


Figura 2.8 - Comparativo de $|\prod_t(f)|$ e $|P(f)|$

2.2.3 – Filtros

Todo sistema linear é um filtro. Um filtro analógico é fisicamente possível se $h(t) = 0$ para $t < 0$. Os filtros são utilizados para atenuar ou até mesmo eliminar os sinais indesejados chamados de “ruído” em determinadas faixas de frequência.

Os filtros podem ser definidos em dois tipos básicos: passa-baixas e passa-altas (Figura 2.9). A aplicação destes dois filtros ao mesmo tempo é ideal já que eles eliminariam componentes de frequência superior e inferior respectivamente a uma determinada frequência f_c denominada frequência de corte. Estes dois tipos básicos

de filtro geram, quando colocados em seqüência, outros dois tipos de larga utilização: passa-banda e rejeita-banda (Figura 2.10).

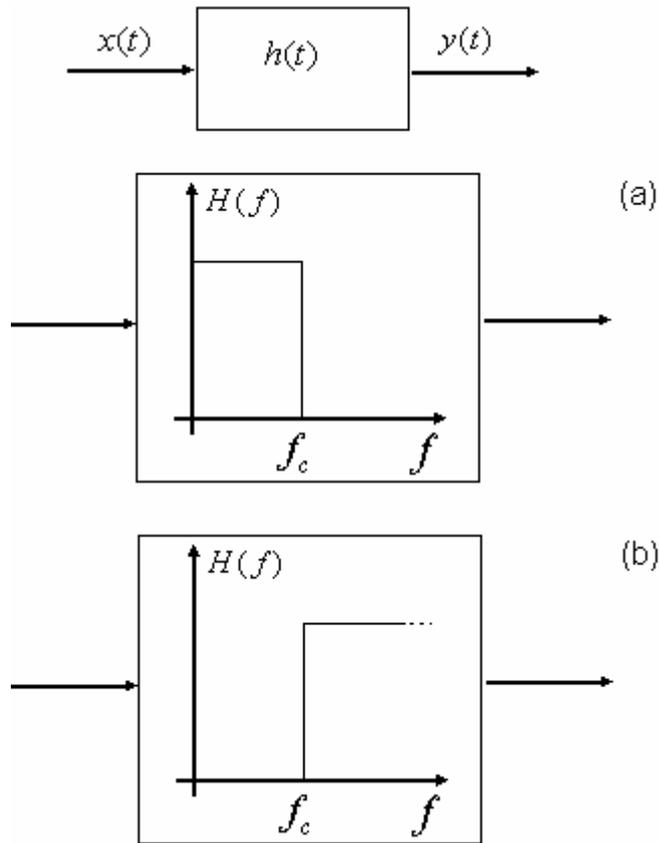


Figura 2.9 - Filtros ideais básicos (a) passa-baixas (b) passa-altas.

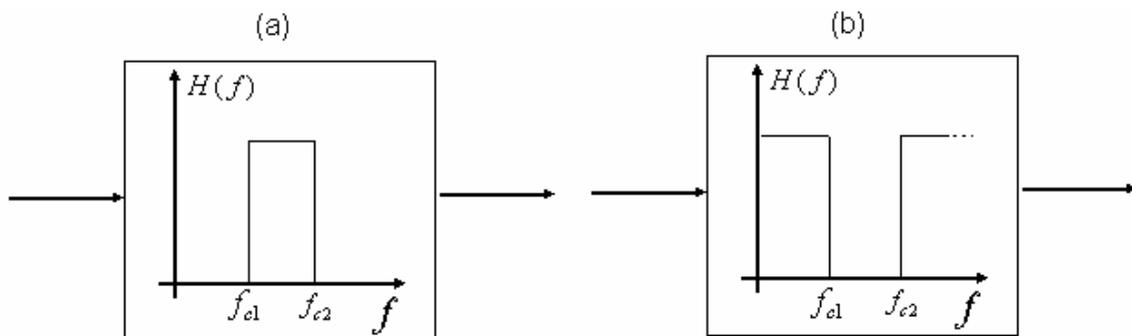


Figura 2.10 - Filtros ideais (a) passa banda (b) rejeita-banda

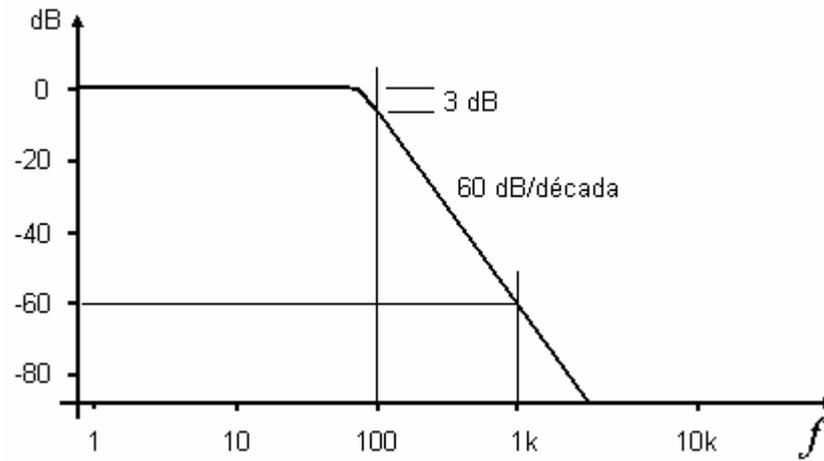


Figura 2.11 - Características de um filtro real

A figura 2.11 mostra que um filtro ideal é quando se consegue atenuar 60 dB para cada década de frequência.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

Neste capítulo será mostrado o método de coleta dos dados, os equipamentos utilizados bem como os pavimentos medidos e as variáveis estudadas.

3.1 Perfilômetro Inercial

Os dados são coletados através de um perfilômetro inercial como pode ser visto na Figura 3.1. Este perfilômetro foi fixado ao veículo de forma a ser independente da suspensão do mesmo, ao contrário do perfilômetro Inercial GM.

A referência inercial é fornecida por acelerômetros fixados sobre o eixo da roda (considerada rígida) que perfila em constante contato com o pavimento. Este contato é garantido pela força da mola que comprime a roda contra o pavimento. Esta força pode ser aumentada, quando necessário, controlando-se a carga sobre o veículo. A aceleração vertical é convertida em deslocamento que define a elevação instantânea do acelerômetro.

A velocidade de passagem do veículo é calculada em função do diâmetro dinâmico do pneu e as informações passadas por um contador de pulsos instalado na roda dianteira do veículo, mostrado na Figura 3.2.

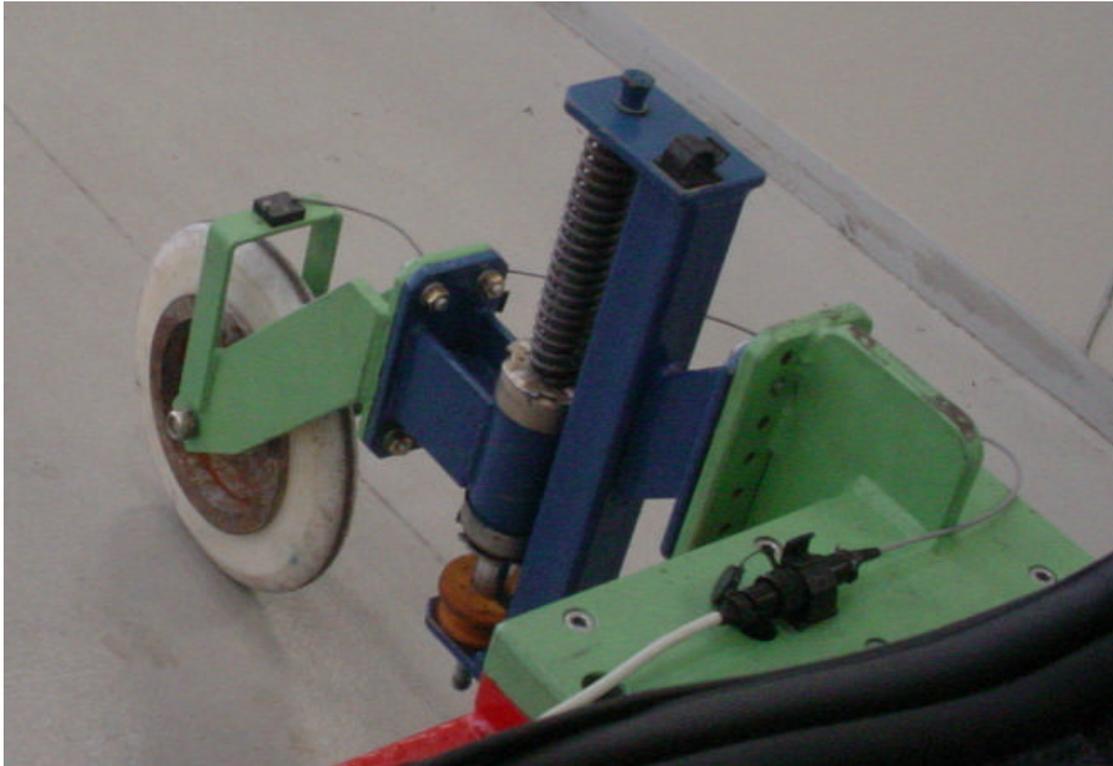


Figura 3.1 - Foto da roda esquerda do perfilômetro – O sistema é independente à suspensão do veículo e o acelerômetro é fixado sobre o eixo da roda.



Figura 3.2 – Foto da Roda Fônica instalada no veículo

Para definir a velocidade de passagem do veículo que garanta o constante contato da roda do perfilômetro com o pavimento como ilustrado na Figura 3.3 é necessário levar em consideração os seguintes itens:

- a) tipo de pavimento a ser medido (comprimento de onda, amplitude e frequência);
- b) peso da massa não suspensa do perfilômetro (roda e suporte da roda);
- c) lastro a ser introduzido sobre o veículo para produzir, sobre a mola, a força suficiente para compensar a inércia da roda do perfilômetro ao passar sobre o pavimento.

Com os dados de elevação (variação de altura do acelerômetro) em função da posição espacial tem-se um gráfico que representa o perfil do pavimento e logo será este o método para validação do perfilômetro e dos dados coletados.

Com os dados validados é aplicada a função PSD (Densidade Espectral de Potência) possibilitando assim classificar e analisar as características do pavimento medido e introduzi-lo no *software* de simulação virtual.

Uma vez coletados, analisados e validados os dados podem ser utilizados em várias configurações seja elas em forma de matriz ou em forma de curva como:

- a) aceleração coletada em função do tempo;
- b) variação de altura em função do tempo;
- c) variação de altura em função da posição espacial (perfil do pavimento);

d) PSD (Densidade Espectral de Potência).



Figura 3.3 – O contato com o pavimento é garantido pela força da mola sobre a roda do perfilômetro que pode ser alterada colocando lastro sobre o veículo.

3.2 - Tipo de Pesquisa

Esta pesquisa é do tipo descritiva, comparativa com o objetivo de desenvolvimento tecnológico do método de caracterização do perfil do pavimento reduzindo o tempo e o custo no desenvolvimento dos projetos.

3.3 - Veículo Utilizado

O veículo utilizado para o auxílio na coleta de dados foi o modelo Fiat Stilo 1.8 8V ano 2003. O motivo desta escolha foi a facilidade em adaptar o suporte do perfilômetro de forma a garantir rigidez nas fixações, sendo possível também, controlar o peso no compartimento de carga e, conseqüentemente, sobre o dispositivo que estará montado na traseira do veículo. Para o perfeito funcionamento do sistema tem-se que garantir o contato constante entre o dispositivo de medição (perfilômetro) e o pavimento. Este contato é garantido através do peso do veículo que apóia sobre a mola forçando-a contra a roda do perfilômetro e contra o pavimento.

3.4 - Ambiente Estudado

Foram medidos diversos pavimentos como: pista de granito polido com emendas Figura 3.4, seqüência de ondulações tipo “quebra molas” Figura 3.5, asfalto liso Figura 3.6^a e 3.6^b e asfalto áspero Figura 3.7^a e 3.7^b.

Dentre os pisos medidos foram escolhidos para análise e validação da metodologia e dos dados coletados a pista de granito polido Figura 3.4 e a seqüência de ondulações tipo “quebra molas” Figura 3.5. O motivo desta escolha foi por que estes

pavimentos são de fácil reprodução analítica e de fácil compreensão do processo. Pretendeu-se, ao final do processo de coleta e análise dos dados, reproduzir as ondulações do pavimento como sendo um gráfico de elevação em função da posição espacial de tal forma a poder visualizar em partes o perfil que compõem o pavimento.

3.4.1 Pista de Granito Polido



Figura 3.4 – Foto da pista de granito polido com emendas – primeiro pavimento escolhido para análise

3.4.2 Seqüência de Ondulações Tipo “Quebra Molas”

O pavimento mostrado na Figura 3.5 é muito utilizado pelo setor de produção passando sobre ela 100% dos veículos produzidos e tem como finalidade avaliar a movimentação da suspensão após a montagem. Porém durante o desenvolvimento

não é muito utilizado o objetivo em medir este pavimento é definir os tipos de pavimentos que o perfilômetro utilizado pode perfilar com fidelidade.



Figura 3.5 - Foto da seqüência de ondulações tipo “quebra molas” – segundo pavimento escolhido para análise.



Figura 3.6 – Foto do asfalto liso



Figura 3.7 – Foto do detalhe da textura do pavimento



Figura 3.8 - Foto do asfalto áspero



Figura 3.9 – Foto do detalhe do asfalto áspero

3.5 - Variáveis Estudadas

3.5.1 - Independentes:

a) Aceleração - imposta no dispositivo pelas irregularidades do piso e que foi coletada pelo condicionador de dados através de dois acelerômetros. Os acelerômetros foram instalados na direção das trilhas feitas pelas rodas do veículo sobre o eixo das rodas consideradas rígidas do perfilômetro, sendo um do lado esquerdo e outro do lado direito.

b) Velocidade – velocidade de passagem do veículo e, conseqüentemente, do perfilômetro sobre o pavimento analisado. Esta velocidade será calculada pelo *software* através das informações do diâmetro dinâmico do pneu e da quantidade de pulsos fornecidos pelo contador de pulsos instalado na roda dianteira direita do veículo.

3.5.2 - Dependente:

a) Elevação do pavimento - que será conseguida através do cálculo da integral dupla da aceleração fornecida pelos acelerômetros.

b) Deslocamento do perfilômetro - que será conseguido através do cálculo da integral simples da velocidade calculada, ou pela multiplicação dos dados de velocidade pelo dados do tempo em cada ponto.

3.6 - Estudo das Características do Perfil de Pavimento

Os dados coletados de aceleração e velocidade de passagem do veículo sobre os pavimentos escolhidos, foram estudados e analisados através dos métodos descritos no capítulo 2 no domínio do tempo e da frequência. O resultado deste estudo / análise, servirá como dados para alimentar o *software* de simulação virtual que recebe tanto sinal de aceleração no domínio do tempo, como foi medido pelo perfilômetro, quanto no domínio da frequência ou como curvas de elevação em função da posição espacial.

Faz-se necessário o estudo matemático completo, para a validação dos dados coletados e somente assim utilizá-los para simulação virtual.

3.7 - Instrumentação Utilizada Para Coleta e Análise dos Dados

A instrumentação utilizada para coleta e análise dos dados foi a seguinte:

a) Coletor de dados marca HBM tipo MGC Plus , mostrado na Figura 3.8 e composto de:

- Rack TG 004 B
- Display AB 22A
- Processador interno CP 32B
- Hard disk interno
- Amplificador de sinal tipo ML 801 para canais de tensão

- Conector tipo AP 801S6 multicanal para controle de canais de tensão
- Conector tipo AP 01 para controle de canais de frequência
- Amplificador de sinal ML 60 B para canais de frequência



Figura 3.10 – Foto do MGCPPlus com os itens descritos

- b) Software de coleta e análise de dados Catman versão 3.1 - HBM
- c) Software para análise de dados LabVIEW 7.0 – National Instruments.
- d) Micro computador Compaq Evo N600c
- e) Sensores de aceleração, mostrado na Figura 3.9 que ilustra a foto do acelerômetro, o desenho e dados técnicos.

- Marca - Endevco (Capacitivo)
- Modelo 7290A
- Fundo de escala 30g

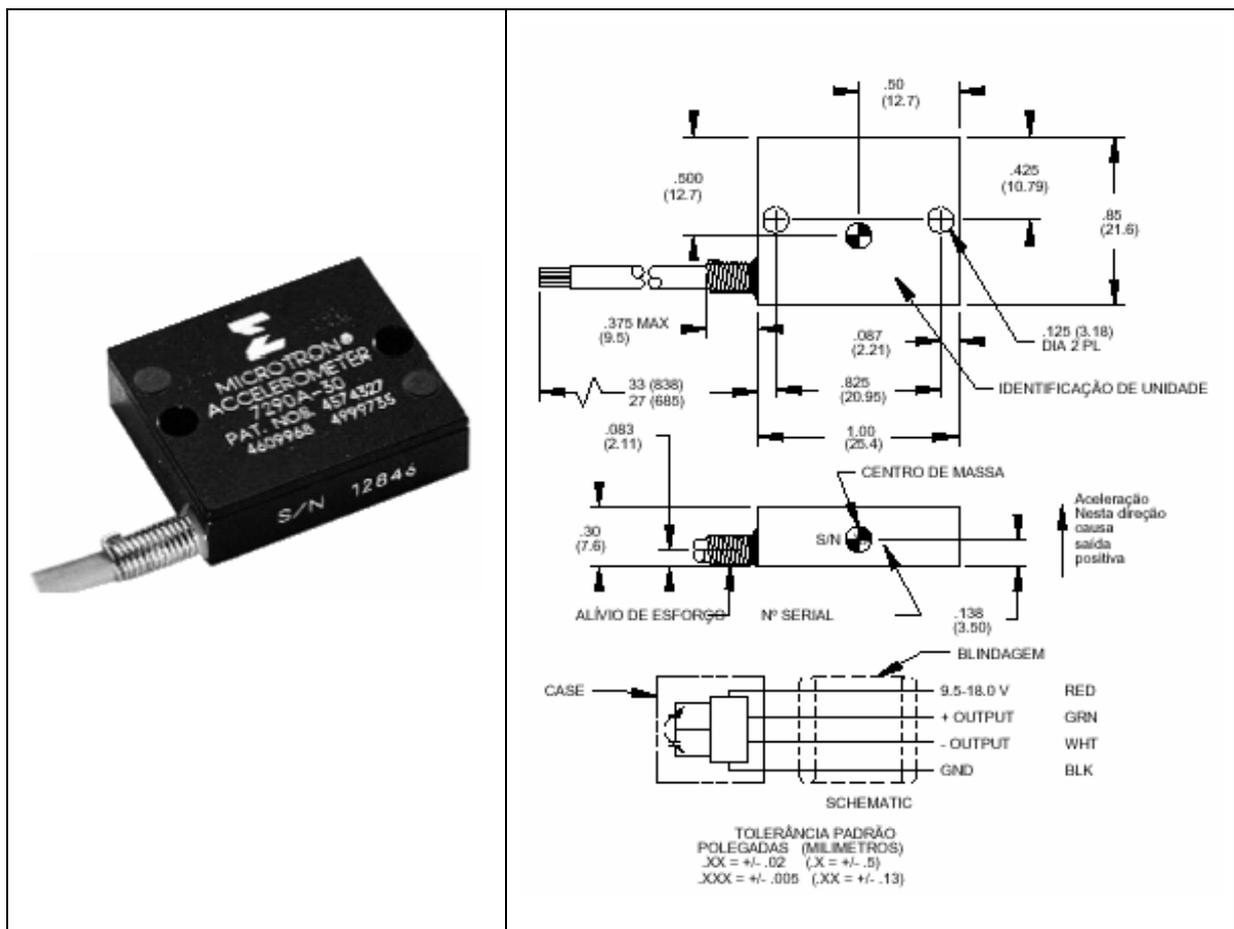


Figura 3.11 – Acelerômetro Endevco

f) Contador de pulsos tipo Roda Fônica, mostrado na Figura 3.10.

- Modelo RF 73 Y45
- 360 pulsos/giro

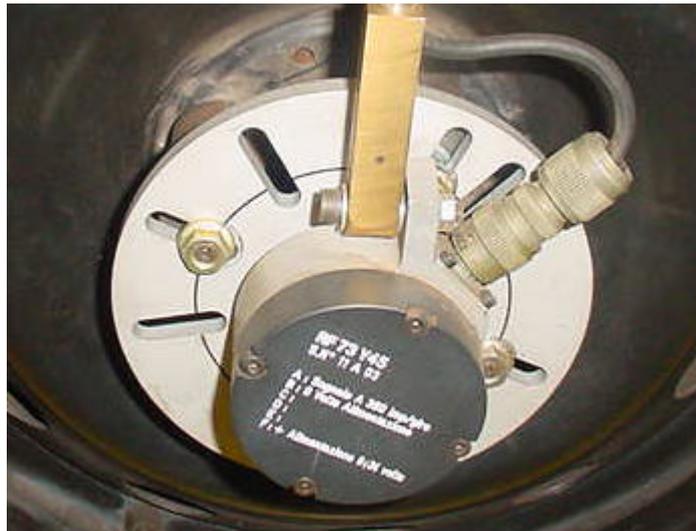


Figura 3.12 – Roda Fônica

3.8 - Tratamento dos Dados

Foram utilizadas para tratamento, análise e interpretação dos dados as seguintes ferramentas:

- a) APS (Auto Espectro de Potência) – Com esta ferramenta foi possível encontrar a frequência de interesse para coleta dos dados e escolher e definir a necessidade de usar os filtros;

- b) Filtros – Com o objetivo de minimizar a interferência de sinais indesejáveis chamados ruídos e deixar os sinais em condições de serem interpretados;
- c) Integração – Para encontrar o deslocamento imposto através da aceleração e, conseqüentemente, a elevação do pavimento como se pretendeu, foi necessário utilizar cálculos de integração;
- d) PSD (Densidade Espectral de Potência) – Objetivo final da análise foi conseguir a PSD espacial e com ela as características do pavimento.

Para manipulação do sinal e construção das curvas foi desenvolvido um programa no ambiente LabVIEW que tem as seguintes funções:

- a) ler um arquivo do tipo texto em forma de matriz do sinal coletado já digitalizado originado do sistema de coleta de dados;
- b) segregar os sinais por coluna;
- c) construir os gráficos do sinal original de aceleração;
- d) fazer o Auto Espectro de Potência do sinal original;
- e) integrar os sinais de aceleração;
- f) montar matriz com os sinais integrados e o sinal de deslocamento do perfilômetro;
- g) fazer a PSD dos sinais na forma de freqüência espacial;

- h) construir os gráficos de elevação do pavimento em função da posição espacial;
- i) gravar novo arquivo do tipo texto com todos os dados.

3.9 - Parâmetros do teste

Com o objetivo de captar todas as flutuações das variáveis envolvidas foram utilizados os parâmetros para o teste indicados pelo Edison da Rosa [4] como serão vistos nos próximos tópicos.

3.9.1- Comprimento do registro l_{\min}

$$l_{\min} \geq 10l_{\max} \quad (3.1)$$

3.9.1.1 – Pista de granito com emendas

Aplicando a equação (4.1) tem-se que o comprimento do registro para a pista de granito que tem $l_{\max} = 0,53m$ é de:

$$l_{\min} \geq 5,3m$$

Com o cálculo de l_{\min} tem-se que $5,3m$ de pista é suficiente para reproduzir o pavimento de interesse que tem como comprimento de onda máximo de $0,53m$.

3.9.1.2 – Pista com seqüência de ondulações “quebra molas”

Para a pista de “quebra molas” que $I_{máx} = 1,37m$ tem-se que:

$$I_{\min} = 13,7m$$

3.9.2 – Taxa / Freqüência de Amostragem

$$\Delta l_{\max} \leq \frac{1}{10} I_{\min} \quad (3.2)$$

$$I_{\min} = \frac{1}{\Omega_{\max}} \quad (3.3)$$

$$f_{\text{amost}} = \frac{v}{\Delta l} \quad (3.4)$$

3.9.2.1 – Pista de granito com emendas

O comprimento de onda mínimo I_{\min} que se considerou foi o comprimento da emenda das pedras que compõe este pavimento que é de $I_{\min} = 0,003m$, sendo assim:

$$\Delta l_{\max} = 0,0003m$$

$$\Omega_{\max} \cong 333,3 \text{ ciclos}/m$$

Considerando uma velocidade $v = 10 \text{ km}/h \cong 2,78 \text{ m}/s$ definida em função do tipo de pavimento e da força necessária para manter a roda do perfilômetro sempre em contato com o solo, tem-se que:

$$f_{\text{amost}} \cong 9260\text{Hz}$$

Esta seria a frequência mínima para se obter 10 pontos para cada comprimento de onda igual a 0,003mm, porém, neste caso não será necessário esta resolução e definiu-se como frequência de amostragem $f_{\text{amost}} = 2400\text{Hz}$ em função das limitações do equipamento de coleta de dados.

3.9.2.2 – Pista com seqüência de ondulações “quebra molas”

Será considerado para este tipo de pavimento $I_{\text{min}} = 0,01m$ com a intenção de poder observar os transientes após o impacto com as ondulações. Assim tem-se que:

$$\Delta l_{\text{max}} = 0,001m$$

$$\Omega_{\text{max}} = 100\text{ciclos}/m$$

A Velocidade $v = 5\text{km}/h \cong 1,39\text{m}/s$ foi definida em função do tipo de pavimento medido e da força necessária para conter a inércia da massa não suspensa do perfilômetro e manter a roda sempre em contato com o pavimento.

A frequência de amostragem calculada é de $f_{\text{amost}} = 1390\text{Hz}$, mas foi utilizada durante as medições $f_{\text{amost}} = 1200\text{Hz}$ em função das limitações do equipamento de medição. Como foi dito anteriormente iremos observar os transientes após o impacto da roda do perfilômetro contra o pavimento e a frequência utilizada permitirá isto com um pouco menos de resolução. Porém, as frequências de maior interesse são frequências mais baixas como será visto adiante.

3.9.3 – Freqüências de interesse

A freqüência que irá permitir identificar o impacto com as emendas do granito ou o início das ondulações será conseguida através de I_{\max} e Ω_{\max} como segue:

$$\Omega_{\min} = \frac{1}{I_{\max}} \quad (3.5)$$

$$\Omega_{\max} = \frac{1}{I_{\min}} \quad (3.6)$$

3.9.3.1 – Pista de granito com emendas

Para $I_{\max} = 0,53m$ tem-se que:

$$\Omega_{\min} \cong 1,887 \text{ ciclos}/m$$

Seja $\Omega_{\max} \cong 333,3 \text{ ciclos}/m$ e $v = 2,78m/s$ como visto anteriormente e fazendo a conversão usando a equação (2.15) resulta em:

$$f_{\min} \cong 5,25Hz$$

$$f_{\max} \cong 926,5Hz$$

As freqüências calculadas f_{\min} e f_{\max} serão identificadas na análise espectral já que as mesmas deverão estar bem definidas.

3.9.3.2 – Pista com seqüência de ondulações “quebra molas”

Para $I_{\max} = 1,37m$ tem-se que:

$$\Omega_{\min} = 0,7299 \text{ ciclos}/m$$

Já foi visto que $\Omega_{\max} = 100 \text{ ciclos}/m$ e $v = 2,39 m/s$ e novamente fazendo a conversão usando a equação (2.15) resulta em:

$$f_{\min} \cong 1,014 Hz$$

$$f_{\max} \cong 139 Hz$$

As frequências f_{\min} e f_{\max} calculadas deverão manifestar-se na análise espectral e serão identificadas como sendo respectivamente as frequências das ondulações do pavimento e dos transientes após os impactos resultantes da inércia do sistema.

3.9.4 – Cálculo da Força de Contenção da Roda

A força de amortecimento F_a é responsável em manter a roda sempre em contato com o solo e está em função da massa não suspensa e da maior amplitude do pavimento.

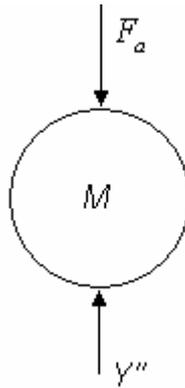


Figura 3.12 – Diagrama de forças

$$F_a = M.Y'' \quad (3.7)$$

$$\omega = 2\pi.f \quad (3.8)$$

$$Y_t = A.\text{Sen}(\omega.t) \quad (3.9)$$

$$Y'' = -\omega^2 A.\text{sen}(\omega.t) \quad (3.10)$$

A massa não suspensa é $M = 9\text{kg}$.

3.9.4.1 – Pista de granito com emendas

Sendo:

$$f_{\min} \cong 5,25\text{Hz} \Rightarrow \omega_{\min} \cong 32,97 \text{ rad/s}$$

$$f_{\max} \cong 926,5\text{Hz} \Rightarrow \omega_{\max} \cong 5818 \text{ rad/s}$$

A amplitude do piso medida é $A_{\max} = 0,003\text{m}$ e $A_{\min} = 0,0005\text{m}$.

Resolvendo a equação (4.10) e considerando $(-Sen(\omega.t)=1)$ pois será onde acontecerão as máximas acelerações, tem-se que:

$$Y''_{\min} \cong 3,26m/s^2$$

$$Y''_{\max} \cong 16925m/s^2$$

Através da equação (4.7) será possível determinar a força mínima necessária a ser aplicada sobre a massa não suspensa para manter a roda do perfilômetro sempre em contato com o pavimento. Para que seja garantida as duas condições de aceleração será considera a maior Y''_{\max} . Sendo assim:

$$F_a \geq 1523KN$$

Neste caso, será feita outra consideração já que a freqüência mais baixa é nosso principal interesse. Será levado em conta a força máxima para garantirmos a passagem sobre o pavimento de “quebra molas” e assim resultando em uma calibração para ambos os pavimentos. Para conseguir medir com tanta exatidão deveria redimensionar o perfilômetro ou redefinir a velocidade de passagem do veículo.

3.9.4.2 – Pista com seqüência de ondulações “quebra molas”

Sendo:

$$f_{\min} \cong 1,014Hz \Rightarrow \omega_{\min} \cong 6,4rad/s$$

$$f_{\max} \cong 139Hz \Rightarrow \omega_{\min} \cong 872,9rad/s$$

A amplitude do piso medida é $A_{\max} = 0,06m$ e $A_{\min} = 0,005m$.

Resolvendo a equação (4.10) e considerando $(-Sen(\omega t)=1)$ pois será onde acontecerão as máximas acelerações, resulta em:

$$Y''_{\min} \cong 2,43m/s^2 \text{ e}$$

$$Y''_{\max} \cong 381m/s^2$$

Portanto, resolvendo novamente (4.7) tem-se que:

$$F_a \geq 3,4KN$$

Esta é a força aplicada sobre a roda do perfilômetro que vai permitir observar os transientes devido a inércia do sistema após os impactos das rodas.

3.9.5 – Análise de Freqüência do Sistema.

Esta análise se torna importante uma vez que define a faixa em que o sistema responde sem interferir nos dados coletados.

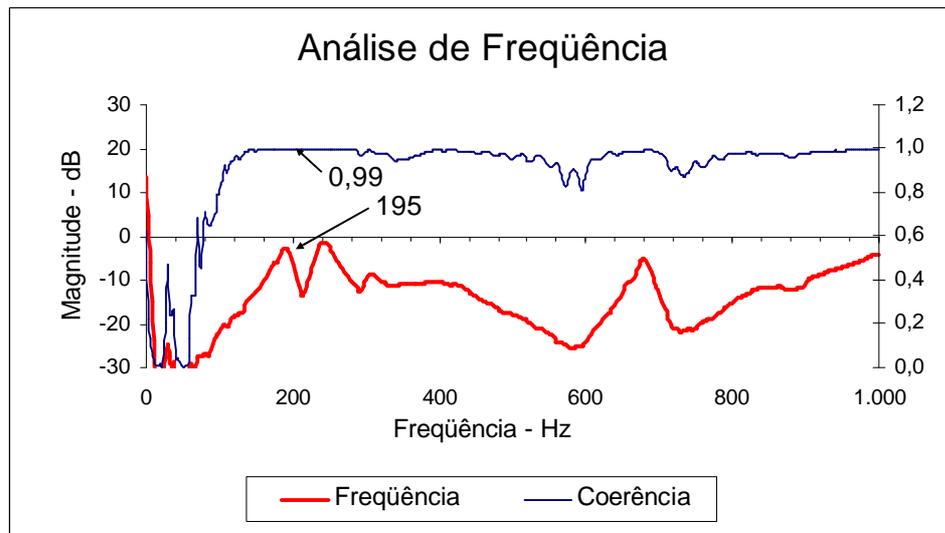


Figura 3.14 – Freqüência Natural do conjunto Roda Esquerda

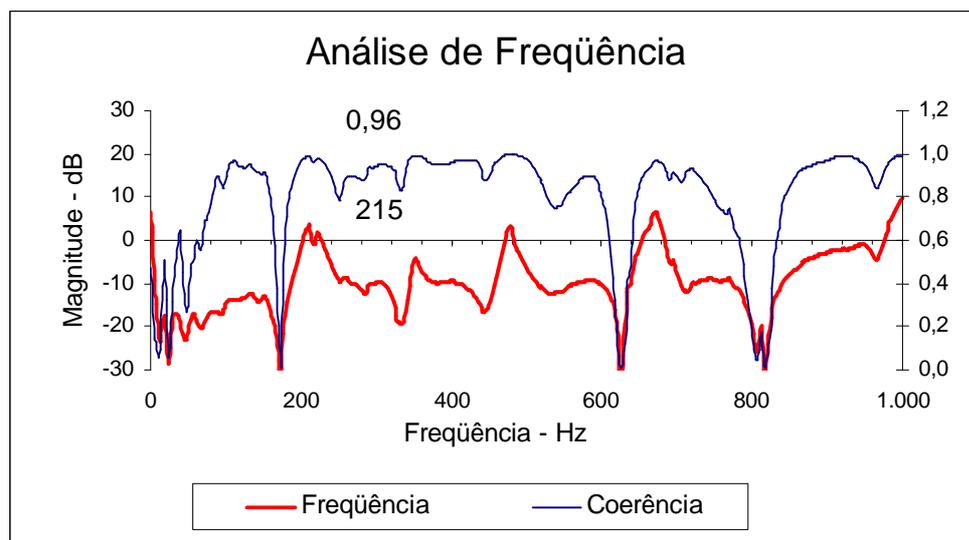


Figura 3.15 – Freqüência Natural do Conjunto Roda direita

O perfilômetro vai responder bem nas freqüência abaixo de $2/3$ da freqüência de ressonância. A freqüência de ressonância é o primeiro pico manifestado onde coincide com a coerência igual a 1. Como pode-se observar nas figuras 3.12 e 3.13, a freqüência de ressonância do sistema montado é de 195Hz para o lado esquerdo e 215 Hz para o lado direito. A diferença encontrada entre os lados é função da construção do dispositivo, como pode ser visto nas Figuras 3.1 e 3.3, no lado direito

existe um suporte que não tem no lado esquerdo o que torna o dispositivo mais rígido. Isto quer dizer que o perfilômetro medirá com exatidão as acelerações abaixo de 130Hz considerando a frequência mais baixa.

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO DOS DADOS E SUA ANÁLISE

4.1 Tipo de Pavimento Medido

4.1.1 – Granito Polido com Emendas

Nas figuras que serão vistas a seguir estão dispostos os gráficos em ordem, desde a coleta até a análise de PSD, e o resultado final com os gráficos de elevação em função da posição espacial (deslocamento do perfilômetro), separados primeiro pelo sinal do sensor da roda esquerda e depois pelo sensor da roda direita.

Nas Figuras 4.1 e 4.2, pode-se observar o sinal coletado sem tratamento. Estes sinais foram coletados de acordo com os parâmetros definidos no capítulo anterior (ver capítulo 3). Em seguida, foi efetuado o Auto Espectro de Potência (Figuras 4.3 e 4.4) com o objetivo de observar as frequências que compõe o sinal verdadeiro.

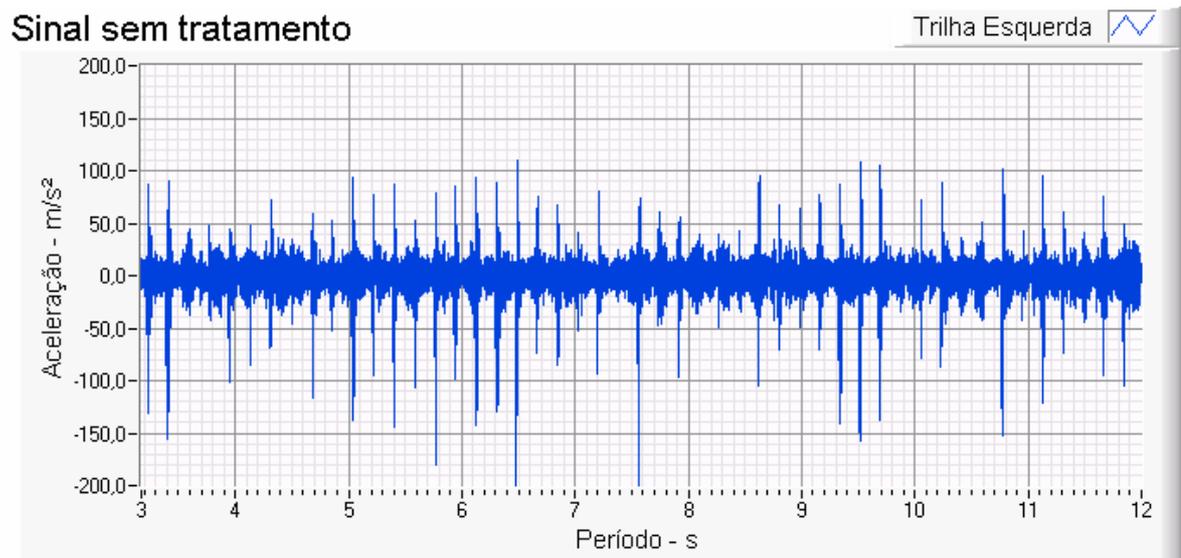


Figura 4.1 – Sinal do acelerômetro da trilha esquerda sem tratamento

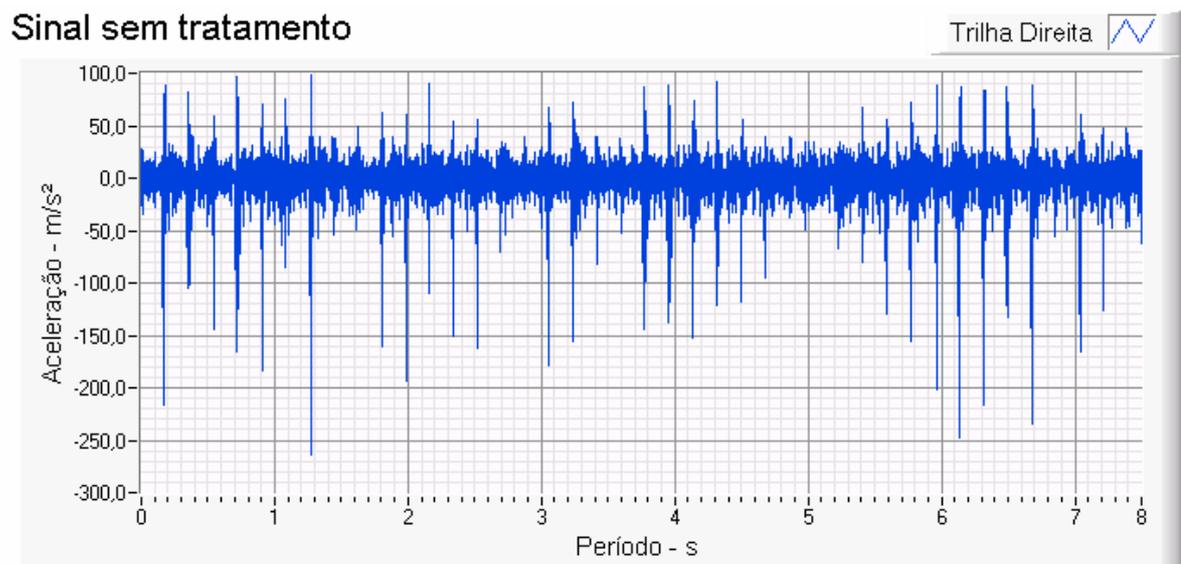


Figura 4.2 – Sinal do acelerômetro da trilha direita sem tratamento

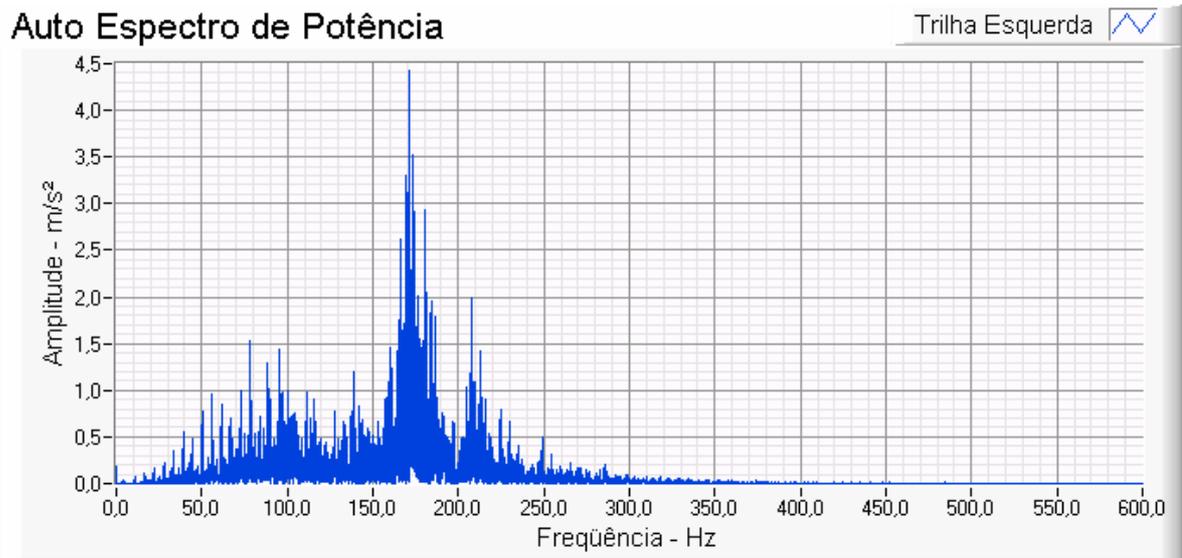


Figura 4.3 – Auto Espectro de Potência do sensor da trilha esquerda

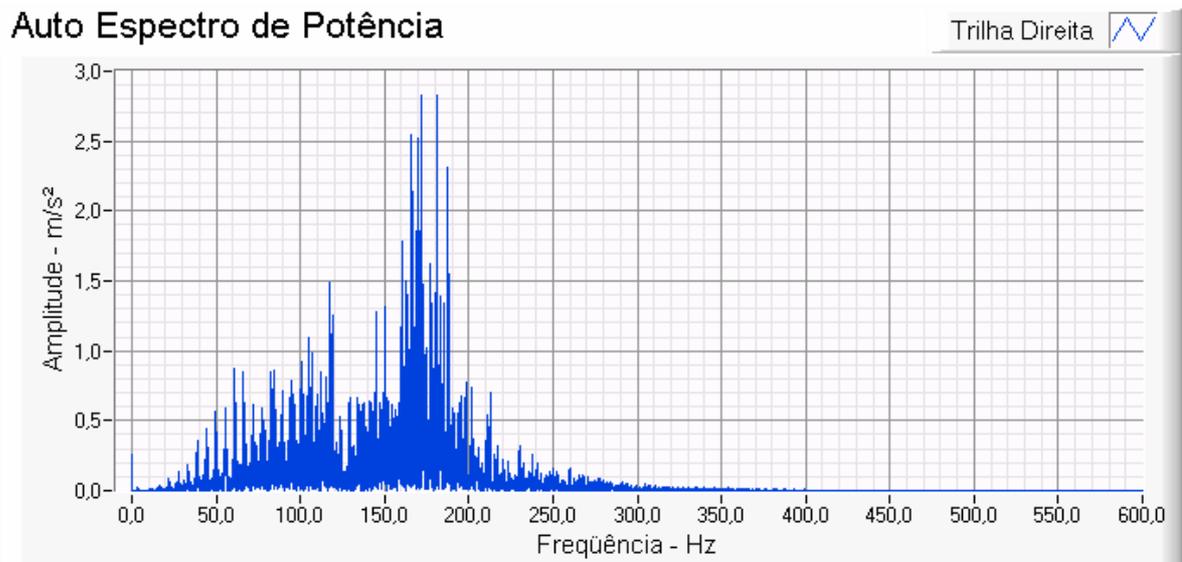


Figura 4.4 – Auto Espectro de Potência do sensor da Trilha direita

Pode-se observar que nas proximidades de 210Hz tem um pico que difere dos demais pela amplitude e pelo espaçamento. Se for observado a análise de frequência natural do conjunto roda esquerda e direita (Figuras 3.12 e 3.13), pode-se dizer que esta é a frequência de ressonância do conjunto, onde está fixado o acelerômetro.

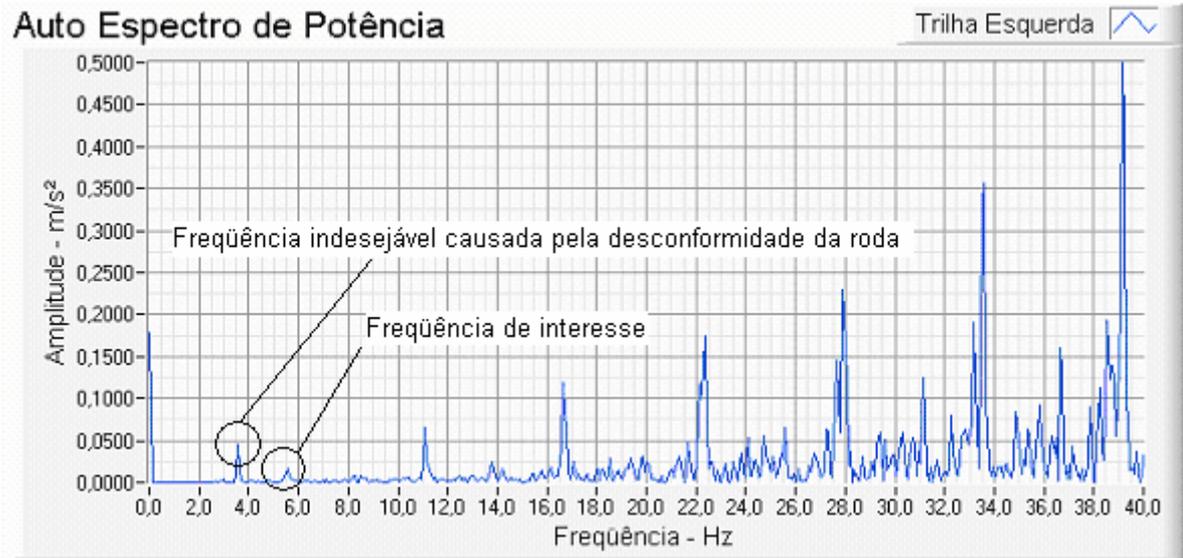


Figura 4.5 – Auto Espectro de Potência do sensor da Trilha esquerda com Aproximação para observar em baixas frequências.

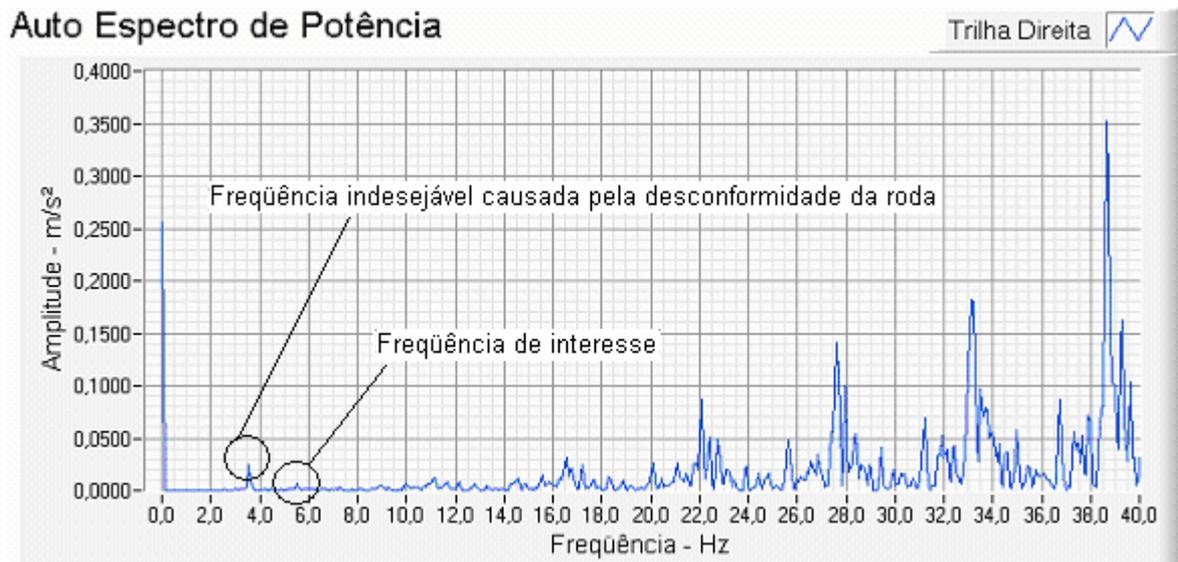


Figura 4.6 – Auto Espectro de Potência do sensor da Trilha direita com Aproximação para observar em baixas frequências.

Nas figuras anteriores (Figuras 4.5 e 4.6), foram efetuadas aproximações para observar a frequência do primeiro pico e assim confrontar com a esperada (ver capítulo 3).

Era esperada uma freqüência de 5,25Hz que foi calculada considerando uma velocidade constante de 2,78m/s, porém, durante a prova, esta velocidade variou em torno de 0,14m/s (0,5 km/h) e isto fez com que houvesse variação também na freqüência.

Observa-se também nestas mesmas figuras que o pico de freqüência que aparece está em 5,52Hz e os demais picos são as harmônicas desta freqüência.

Isto comprova que o sinal coletado através do perfilômetro é coerente com o pavimento que foi medido.

Apareceu no sinal uma freqüência indesejável de 3,5 Hz como pode ser visto na Figura 4.5 e confirmada na Figura 4.6. Esta freqüência deve-se a uma desconformidade da roda do perfilômetro provocada pela passagem sobre uma barra metálica quadrada de quinas vivas (Figura 4.7).



Figura 4.7 – Barra de ferro “traversina” piso para prova de conforto

Esta barra denominada “traversina” é utilizada em provas de acústica e tinha-se inicialmente o interesse em verificar o comportamento do perfilômetro ao passar por este obstáculo. Este inconveniente não foi visto durante as provas mas pode ser explicado da seguinte forma:

Características da roda:

- a) material: nylon;
- b) diâmetro a novo = $0,240m$;
- c) desenvolvimento a novo = $pd = 0,753982m$.

Considerando a velocidade média durante a prova de $v = 2,94m/s$ a irregularidade da roda provocada pela barra estaria em contato com o solo a cada $t = 0,2565s$.

Observa-se, na Figura 4.8 duas acelerações negativas sendo uma antes do evento desejado a $t = 2,445s$ e outra após este evento a $t = 2,695s$. Fazendo a diferença tem-se $\Delta t = 0,250s$. O mesmo pode ser confirmado na Figura 4.9.

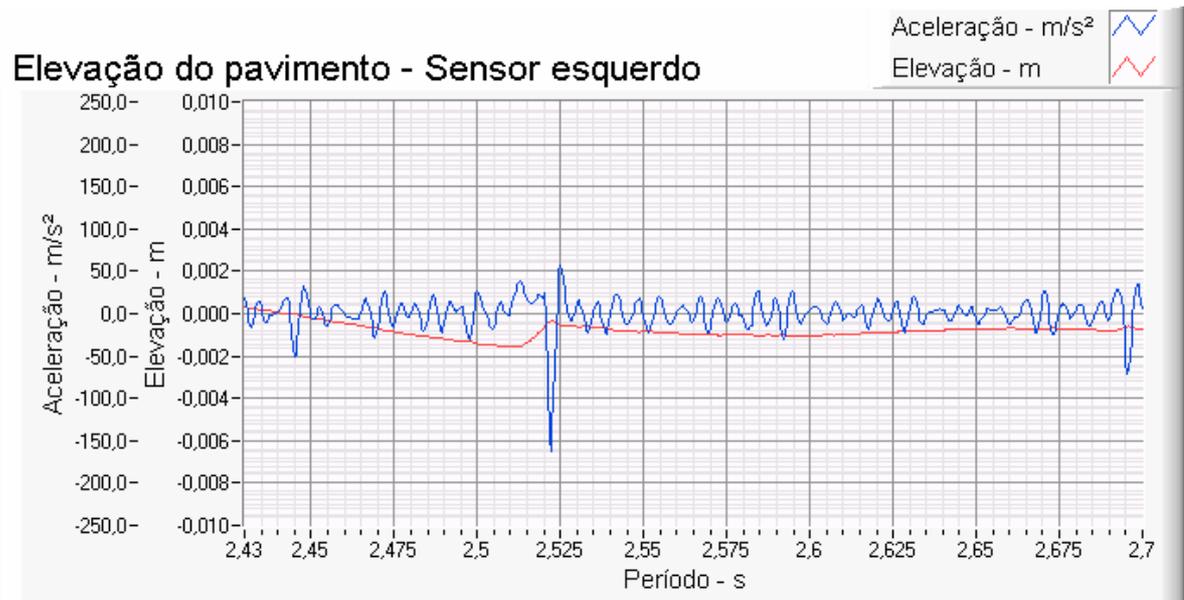


Figura 4.8 – Aceleração indesejável devido à desconformidade da roda esquerda do perfilômetro.

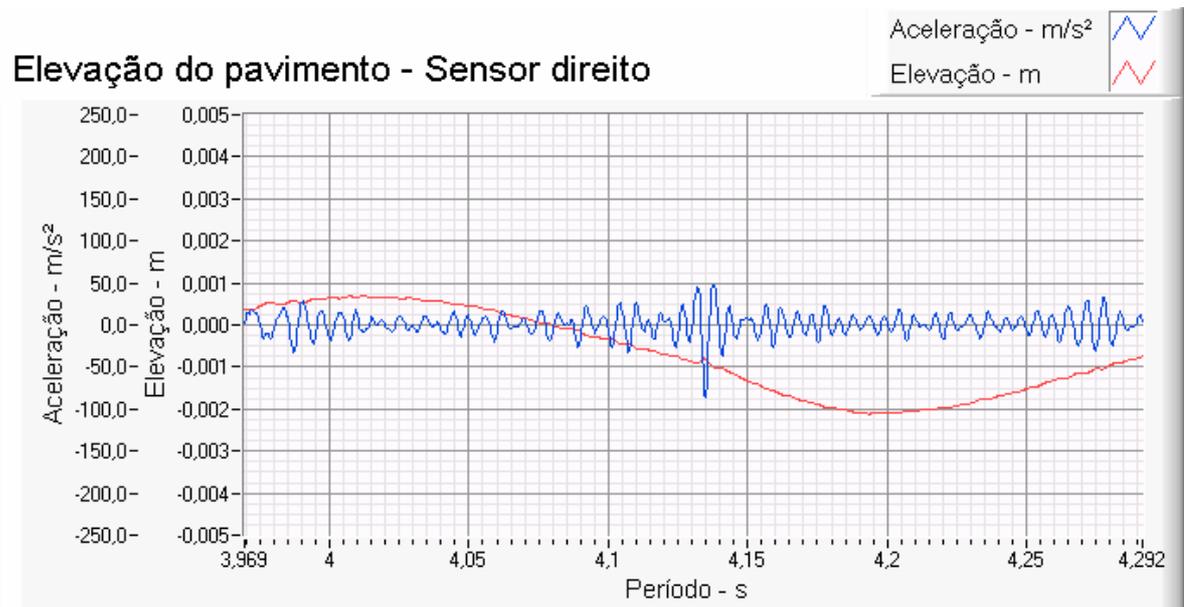


Figura 4.9 – Aceleração indesejável devido à desconformidade da roda direita do perfilômetro.

Com esta análise, conclui-se que a frequência indesejável é proveniente da roda do perfilômetro.

Ainda que esta aceleração seja um inconveniente, ela não é ruído mas, sim, um sinal presente no sistema e, portanto, não é conveniente passar filtros para tentar eliminá-la.

Em seguida, foi efetuada a análise do perfil do pavimento com e sem a utilização de filtros definindo-se a não utilização dos mesmos, permanecendo, então, o Auto Espectro de Potência conforme as Figuras 4.10 e 4.11.

Caso fosse necessária a utilização dos filtros seria interessante que os mesmos fossem aplicados sobre o deslocamento e não sobre a aceleração para não correr o risco de perder o sinal original e também para diminuir as incertezas causadas pelos filtros.

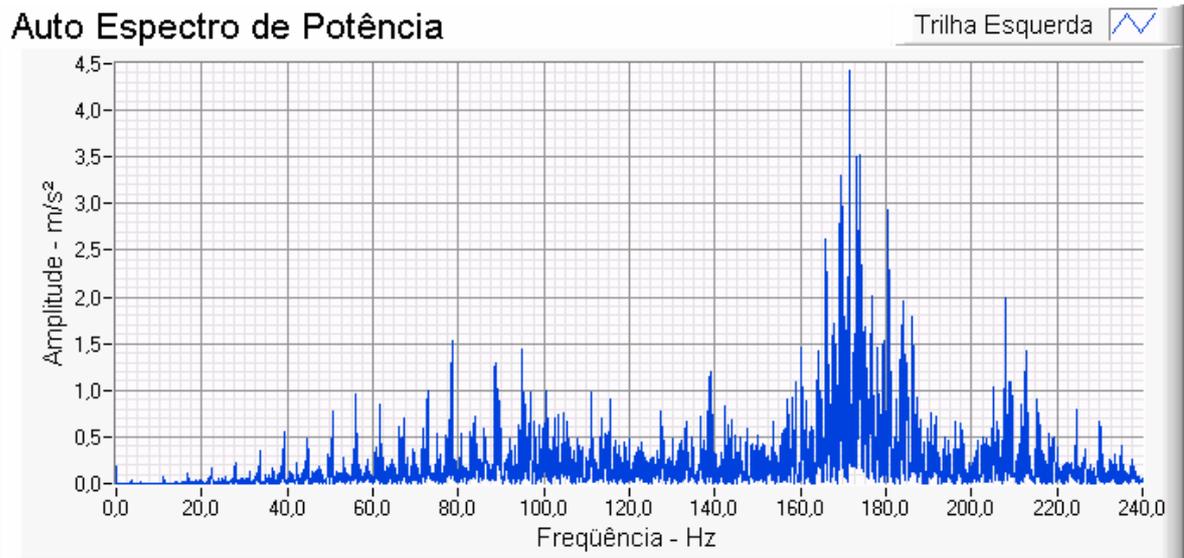


Figura 4.10 – Auto Espectro de Potência do sensor da Trilha esquerda conforme o sinal será analisado.

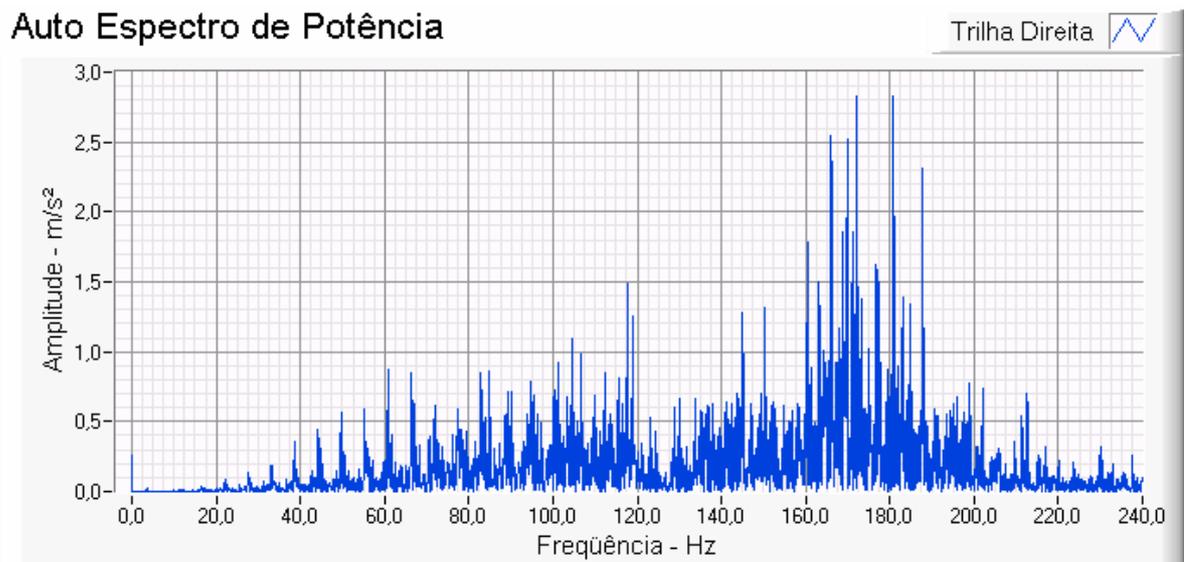


Figura 4.11 – Auto Espectro de Potência do sensor da Trilha direita conforme o sinal será analisado.

Na seqüência, como representados graficamente nas Figuras 4.12 e 4.13, foram efetuados os cálculos das integrais duplas das acelerações e construídas as curvas das elevações em função do tempo.

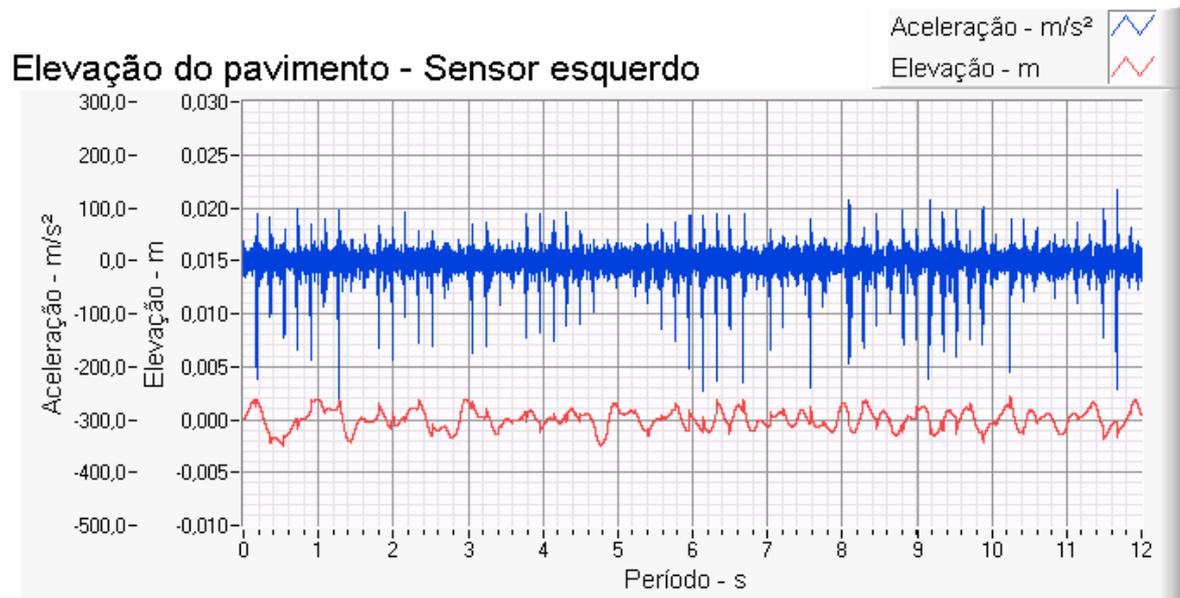


Figura 4.12 – Curva do perfil do pavimento medido – Trilha esquerda.

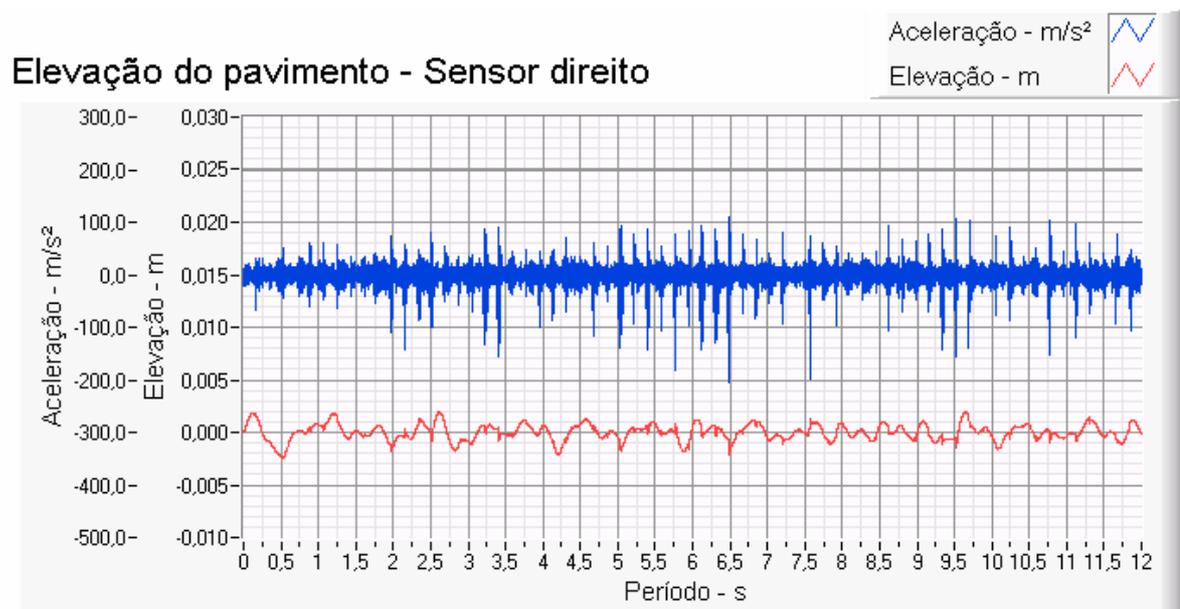


Figura 4.13 – Curva do perfil do pavimento medido – Trilha direita.

Na Figura 4.14, observa-se um trecho da pista perfilada e pode-se identificar 5 parte e mais uma parcela da 6ª parte. Estas partes representam as placas de granito que compõem o pavimento.

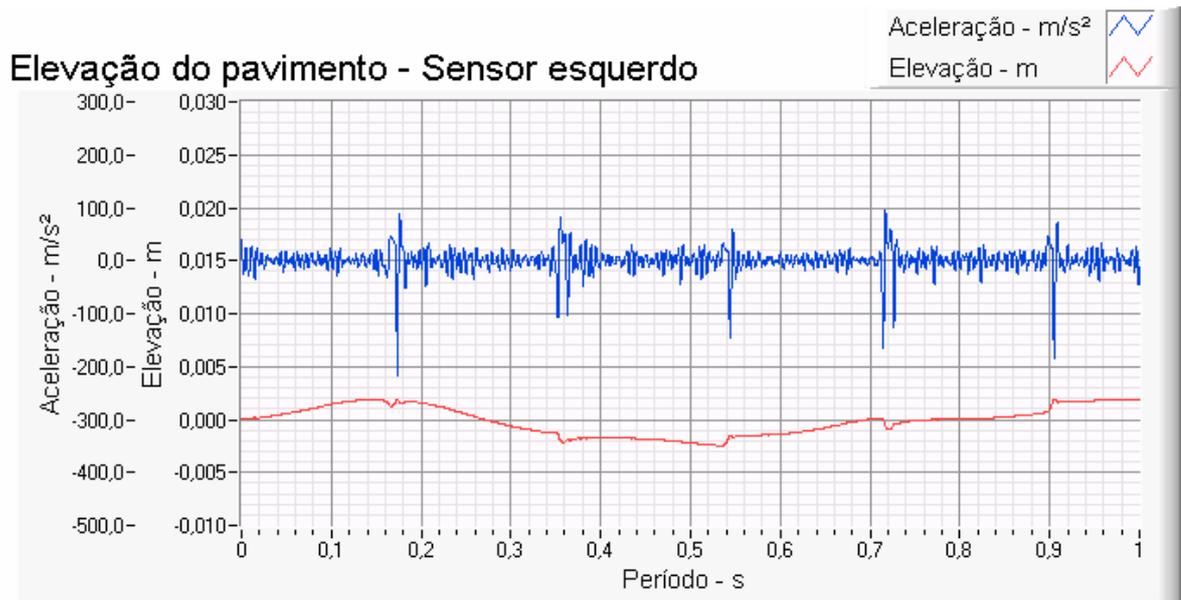


Figura 4.14 – Trecho da pista referente a um segundo – Trilha esquerda.

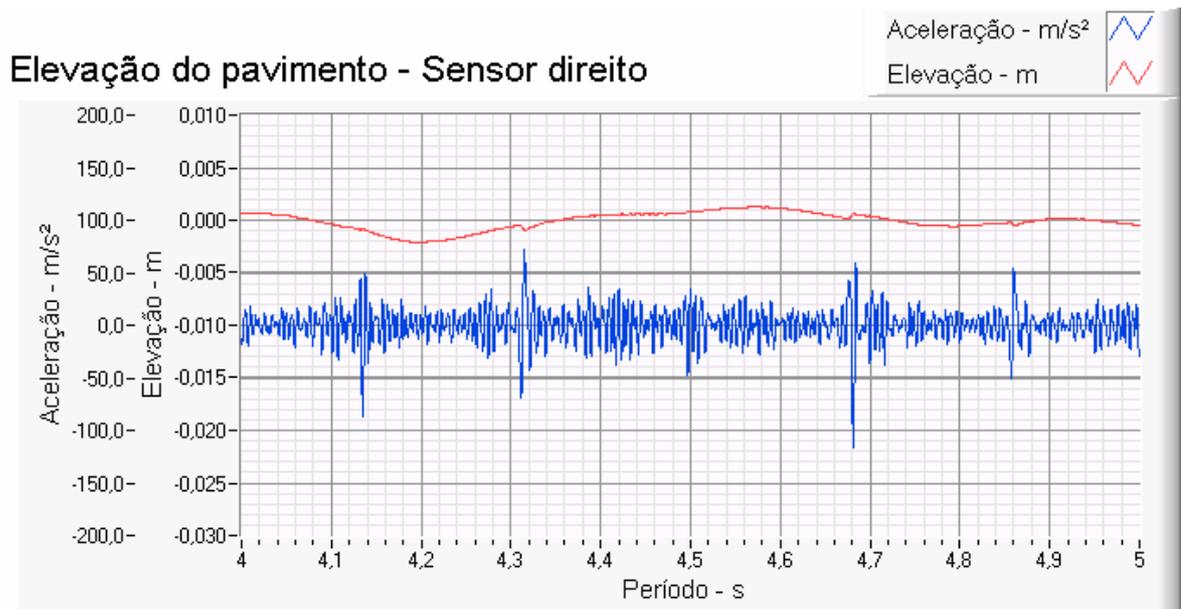


Figura 4.15 – Trecho da pista referente a um segundo – Trilha direita.

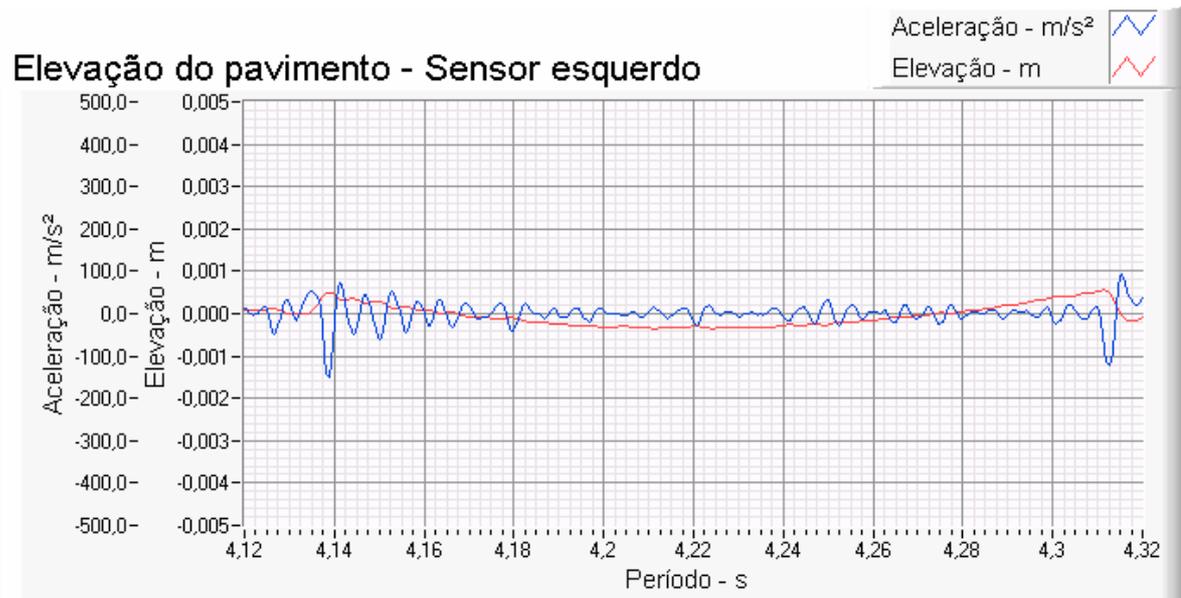


Figura 4.16 – Trecho da pista referente a uma placa de granito – Trilha esquerda.

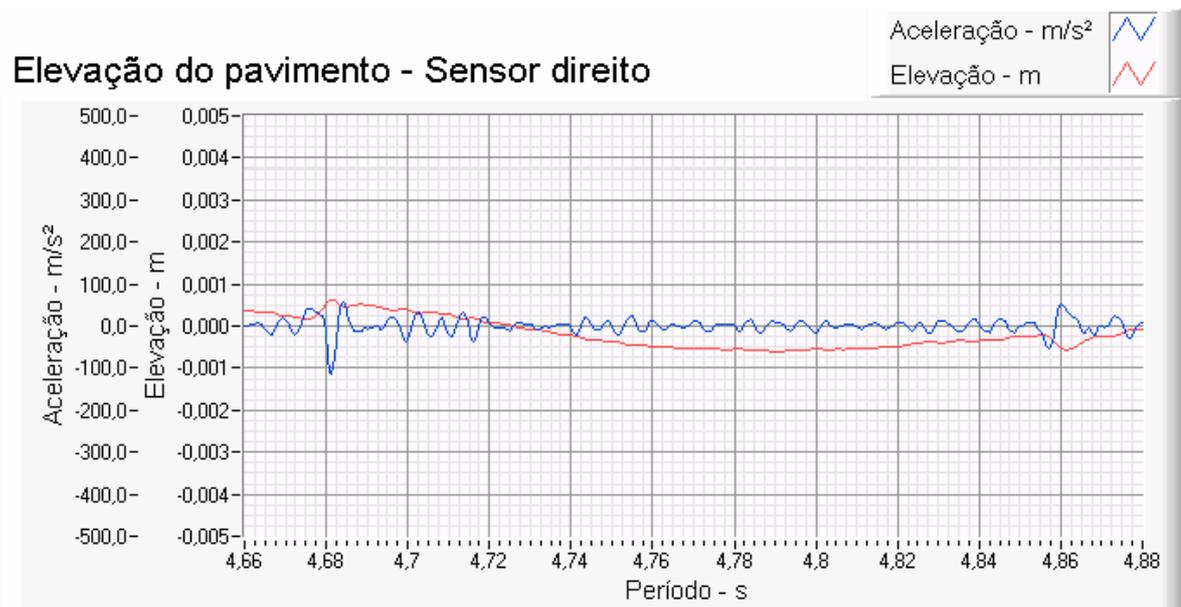


Figura 4.17 – Trecho da pista referente a uma placa de granito – Trilha direita.

Nas Figuras 4.16 e 4.17, é possível visualizar nitidamente uma placa de granito do pavimento. Na Figura 4.16, esta placa inicia-se em $t = 4,14s$ e termina em $t = 4,31s$

fazendo a diferença e multiplicando pela velocidade média $v = 2,94m/s$, tem-se que o tamanho da placa é de $0,4998m$.

O pavimento medido é composto de placas de granito que tem como comprimento nominal $0,50m$ e espaço entre elas que variam entre $0,001m$ e $0,004m$. Esta pista é utilizada em provas de frenagem, logo, apresenta um certo desgaste da superfície polida o que justifica a leve curvatura nas placas. Isto pode ser observado na Figura 4.10, onde é apresentada a foto de uma placa de granito.

Nas Figuras 4.19 e 4.20, estão ilustradas as curvas de outras placas que teriam uma certa curvatura no centro e o espaço entre ela e a próxima placa é quase invisível. Como pode ser observado esta curvatura é da ordem de $0,0025m$, mas “In loco” é visível devido ao acúmulo de água no centro da placa, Figura 4.18.



Figura 4.18 – Foto de uma placa de granito com acúmulo de água no centro

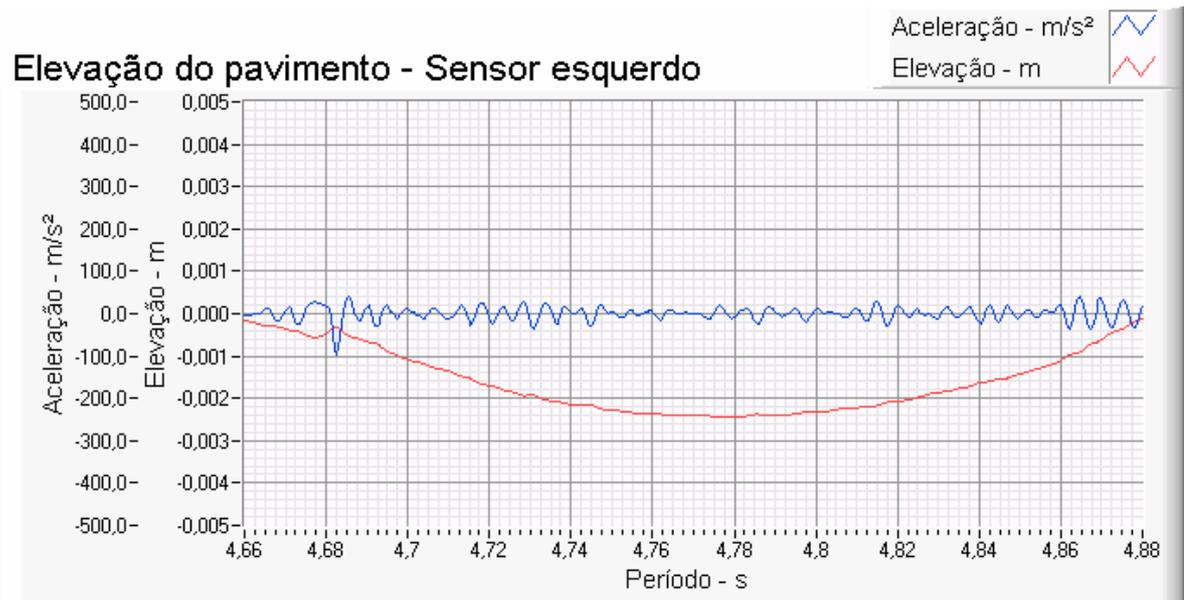


Figura 4.19 – Trecho da pista referente a uma placa de granito que apresenta certa curvatura no centro.

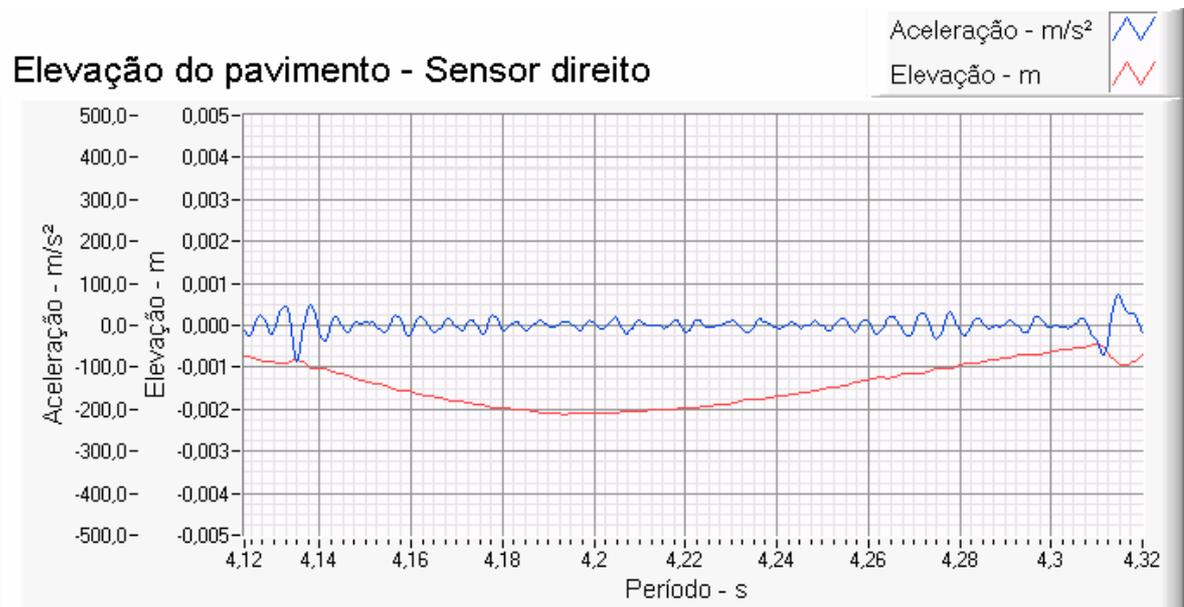


Figura 4.20 – Trecho da pista referente a uma placa de granito que apresenta certa curvatura no centro.

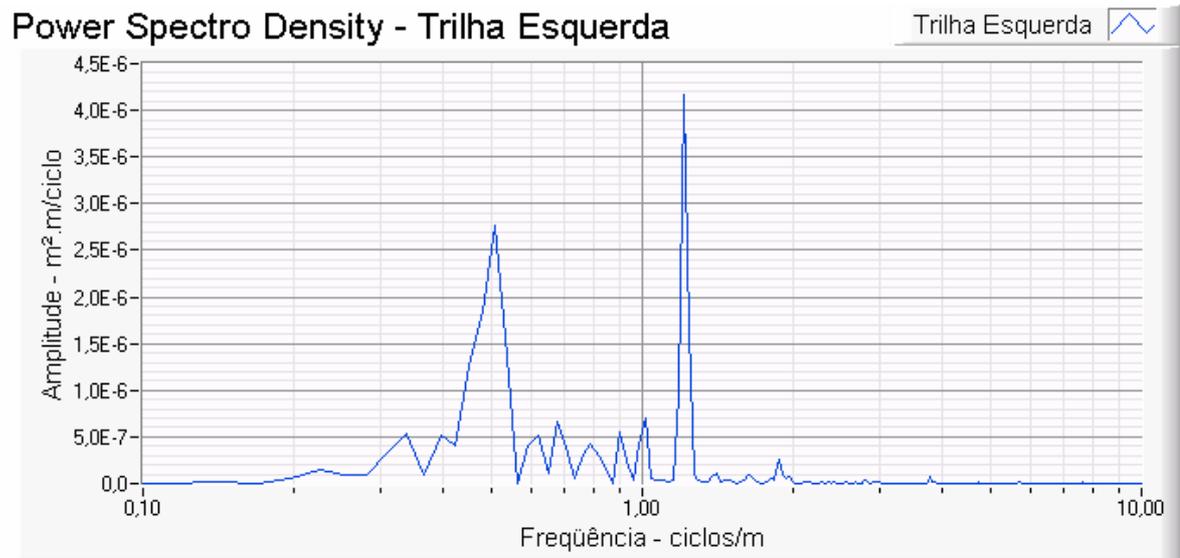


Figura 4.21 – PSD da elevação da trilha esquerda do pavimento.

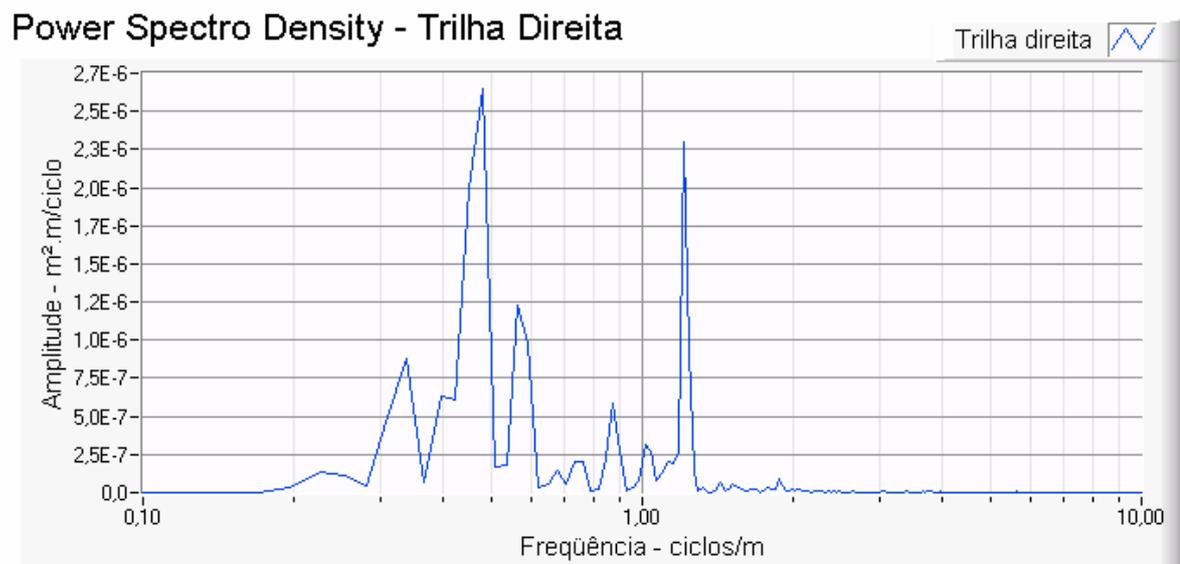


Figura 4.22 – PSD da elevação da trilha direita do pavimento.

As Figuras 4.21 e 4.22 mostram as PSDs do pavimento perfilado. A pequena variação de amplitude fora das frequências definidas pode indicar um perfil liso sem ondulação para baixo número de onda e com pouca aspereza para alto número de

onda. Porém deve-se levar em consideração as freqüências de interesse para qual o perfil foi medido. Isto significa que, se o pavimento é constituído também de baixo número de onda mas o interesse era as ondas de alta freqüência e o equipamento foi calibrado para tal, a PSD vai mostrar a faixa de freqüência medida mesmo que o pavimento tenha outro perfil. Na figura 4.32 se mostra um comparativo de PSDs do mesmo pavimento, porém com variação de velocidade de passagem e isto será melhor entendido.

Pode-se observar que o pavimento apresenta o maior número de ondas acima de 0,25ciclos/m com picos em 0,50ciclos/m e 1,25ciclos/m. Os demais picos não apresentam variação significativa na amplitude o que conclui que é bastante confortável. Para baixas freqüências, apresenta menor número de ondas e com baixa amplitude o que indica ter pouca ondulação.

No geral, a PSD está indicando um pavimento confortável, sem muita ondulação, bastante homogêneo e com baixa amplitude tanto para baixo quanto para alto número de ondas.

Como pode-se observar a freqüência de interesse, definida no capítulo anterior, não tem muita influência quando comparada às outras freqüências que aparecem no pavimento e que são função da construção e do desgaste do pavimento como será visto mais adiante.

Nas próximas figuras será possível correlacionar a análise da PSD com o pavimento medido.

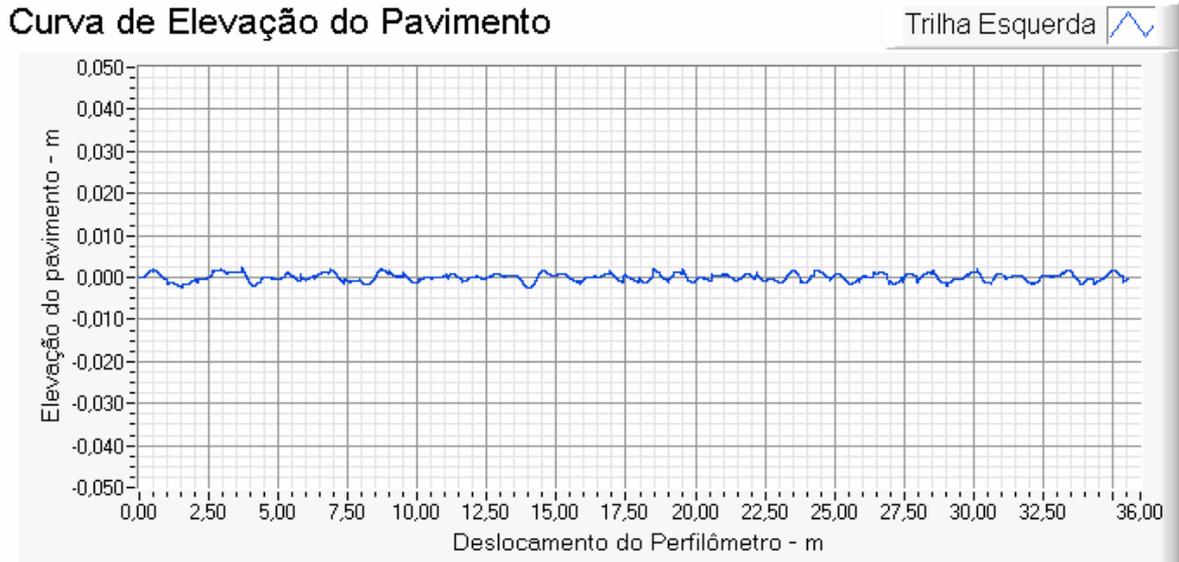


Figura 4.23 – Perfil do Pavimento Medido – Trilha esquerda.

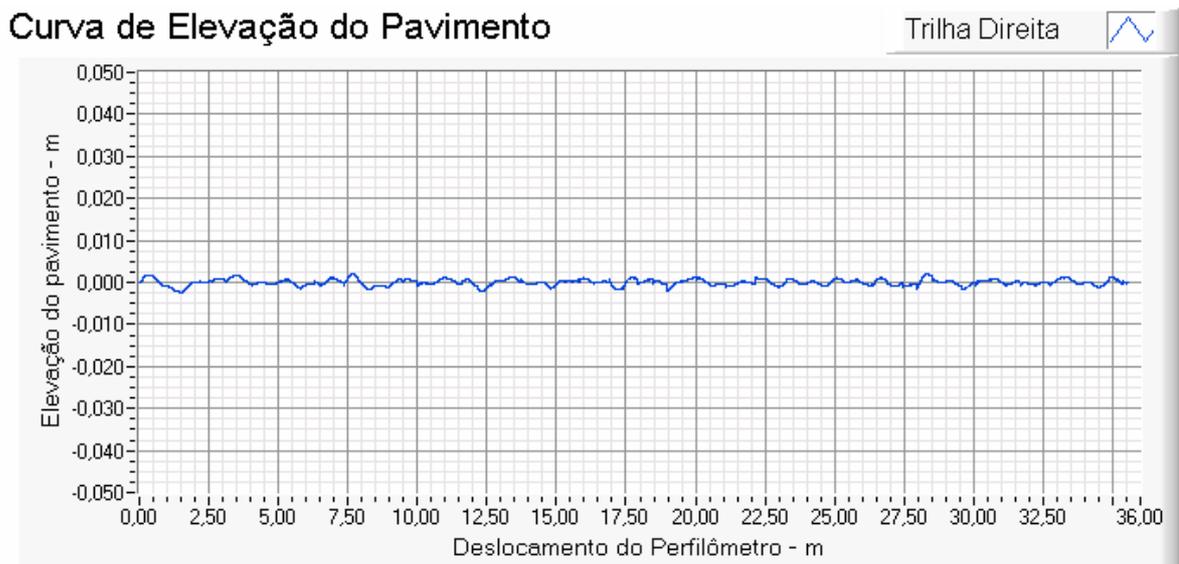


Figura 4.24 – Perfil do Pavimento Medido – Trilha direita.

Nas Figuras 4.23 e 4.24, pode-se observar o perfil do pavimento medido. Conseguir-se, também, visualizar as ondas com comprimento de 4m (0,25ciclos/m) e de 2m

(0,50ciclos/m) o que reforça a indicação da PSD que descreve exatamente o que acontece.

Pode ser mais fácil entender estes valores quando se faz uma aproximação dos gráficos das Figuras 4.23 e 4.24. As Figuras 4.25 e 4.26 mostram esta aproximação e, assim, pode-se concluir que a frequência de 0,25ciclos/m e 0,50ciclos/m são provenientes da constituição do pavimento já que o mesmo é feito de placas com 0,50m de comprimento.

As ondas com comprimento igual a dois metros são provenientes do resultado do posicionamento desnivelado de quatro placas como pode ser visto na Figura 4.25.

As ondas com comprimento igual a um metro são provenientes do resultado da união de duas placas curvas e desniveladas, estas placas podem ser vistas nas Figuras 4.19 e 4.20.

Já as ondas com comprimento menor que meio metro devem-se às irregularidades de cada placa ver Figura 4.27 e 4.28.

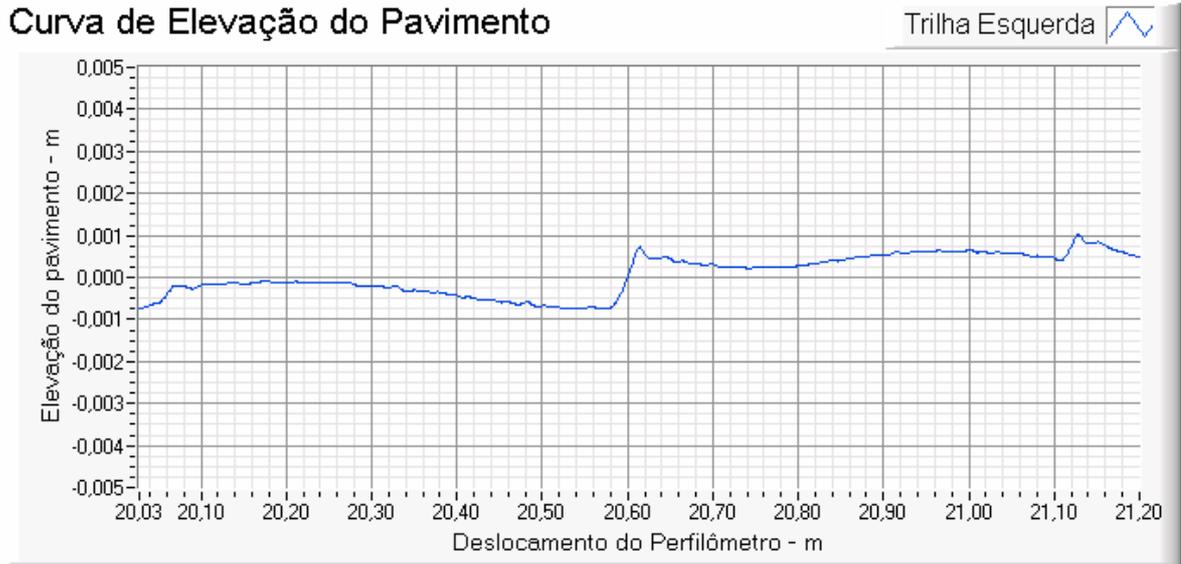


Figura 4.25 – Trecho de 2,2 metros do perfil medido – Trilha esquerda.

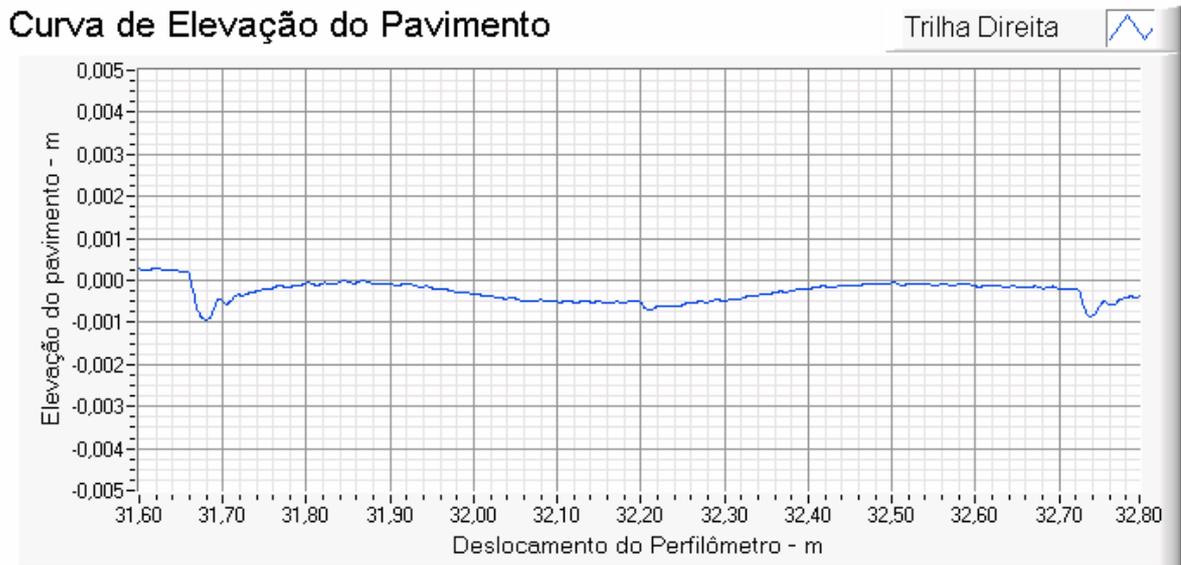


Figura 4.26 – Trecho de 2,2 metros do perfil medido – Trilha direita.

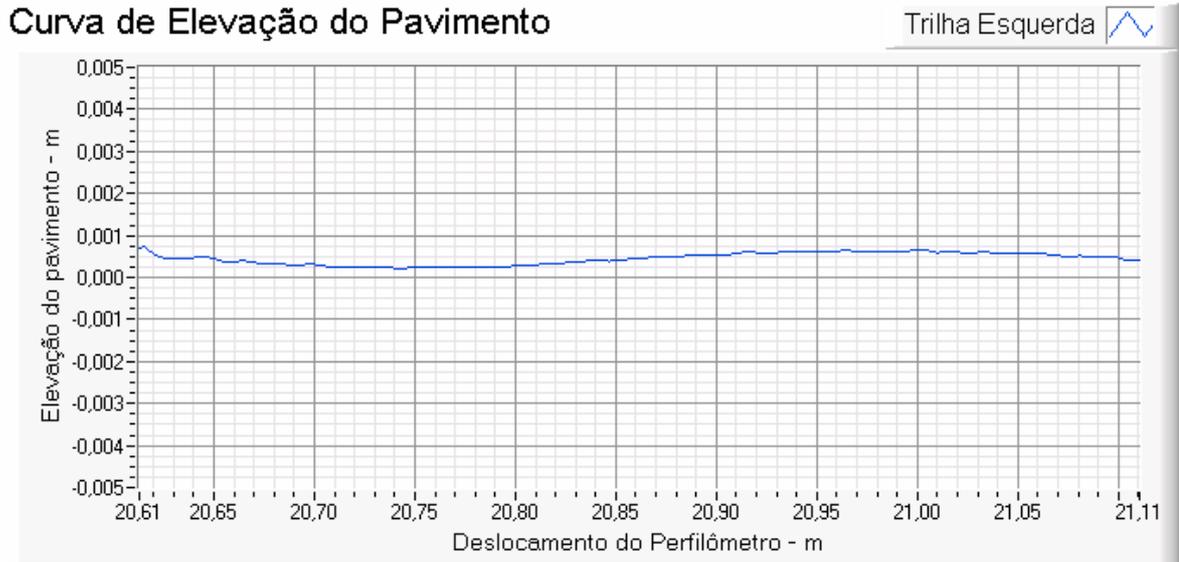


Figura 4.27 – Trecho correspondente a uma placa de granito do perfil medido Trilha esquerda.



Figura 4.28 – Trecho correspondente a uma placa de granito do perfil medido Trilha direita.

As Figuras 4.27e 4.28 mostram duas placas retiradas dos trechos mostrados nas Figuras 4.25 e 4.26. Nelas é possível observar duas placas com irregularidades na superfície em torno de 0,0006m (0,6mm) e 0,0007m(0,7mm) e de comprimento 0,50m.

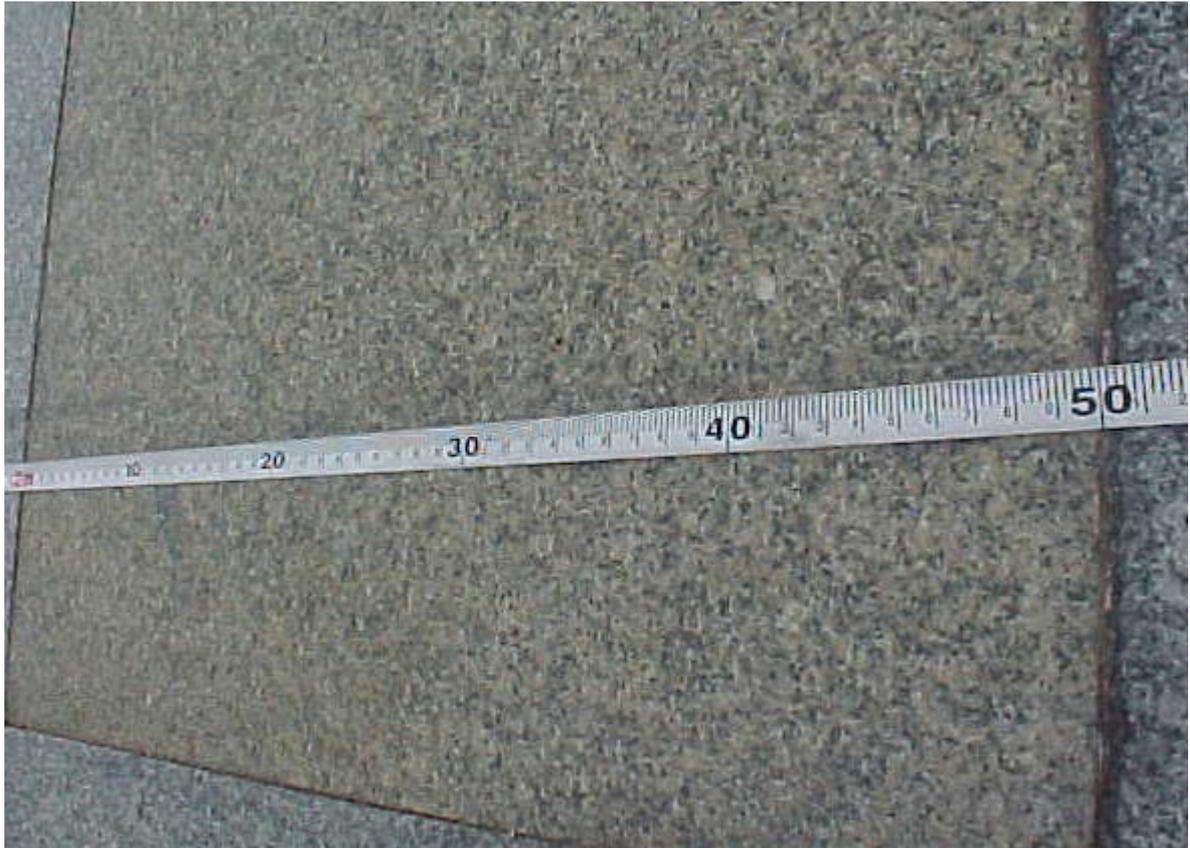


Figura 4.29 – Foto evidenciando o tamanho de uma das placas de granito que compõe o pavimento medido.

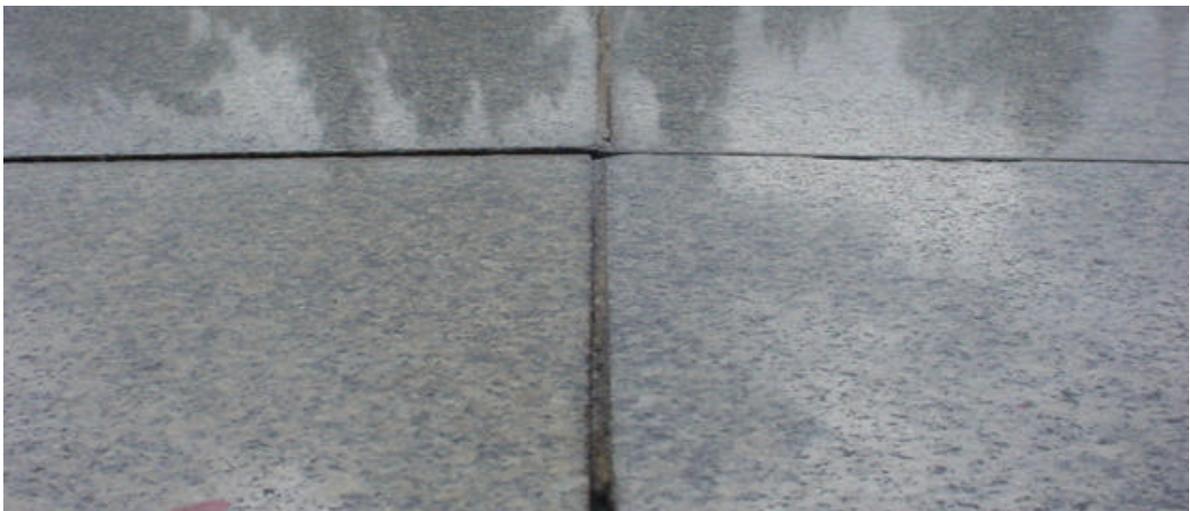


Figura 4.30 – Foto evidenciando a falta de alinhamento das placas de granito que compõe o pavimento medido.

É possível observar, na Figura 4.30, a falta de uniformidade nas emendas do pavimento o que pode ser observado também nas medições em alguns pontos pois

não se percebe as emendas já que as mesmas estão muito juntas e em outros casos a emenda é bem evidenciada.



Figura 4.31 – Foto evidenciando o desnível entre as placas de granito que compõe o pavimento medido.

O que foi medido pelo perfilômetro e mostrado nas curvas de elevação x deslocamento (nas Figuras 23 à 28) retrata o que pode ser visto nas fotos das Figuras 4.29 a 4.31.

Foi mostrado, nas Figuras 4.21 e 4.22, que a PSD do pavimento perfilado está concentrada entre 0,2ciclo/m e 2ciclos/m. Com o objetivo de verificar a influência da velocidade do perfilômetro nesta faixa de frequência foram efetuadas provas em outras velocidades. Como pode ser visto na Figura a seguir.

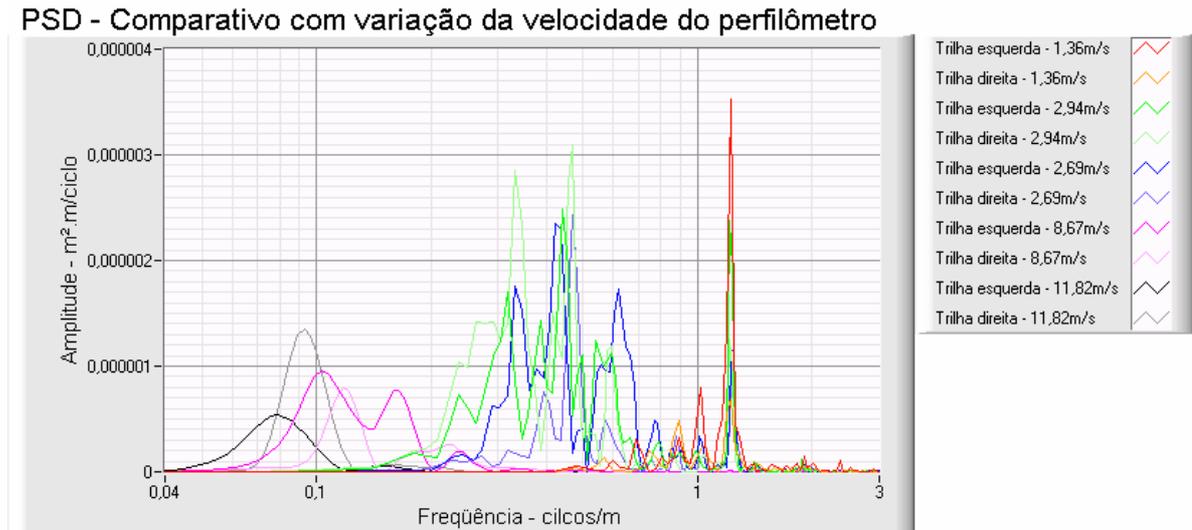


Figura 4.32 – PSD do pavimento com variação na velocidade de passagem sobre o pavimento.

Como foi visto no capítulo anterior, no Item 3.9.2, a frequência de amostragem varia conforme o comprimento de onda de interesse, o que está indicado para ter boa resolução na Equação 3.2.

A Figura 4.32 mostra uma seqüência de provas onde se variou apenas a velocidade de passagem, com isto, para manter a mesma frequência de amostragem aumentou-se o Δl conforme a Equação 3.4 e conseqüentemente perdeu-se resolução nas ondas de comprimento mínimo. Por outro lado, consegue-se medir as ondas com comprimentos abaixo de 0,5ciclo/m.

Analisando a Figura 4.32, tem-se que, para a mesma frequência de amostragem existe uma velocidade diferente para medir comprimentos de onda diferentes, ou seja:

- a) comprimentos de onda de 0,04 a 0,2 ciclo/m a velocidade ideal é em torno de 42km/h;
- b) comprimentos de onda de 0,05 a 0,4 ciclo/m a velocidade ideal é em torno de 31km/h;
- c) comprimentos de onda de 0,1 a 2 ciclos/m a velocidade ideal é em torno de 10km/h;
- d) e comprimentos de onda de 0,5 a 3 ciclos/m a velocidade ideal é em torno de 5km/h.

Outras formas de melhorar a definição do perfil medido são diminuir o diâmetro da roda e adicionar carga sobre a mesma para garantir o constante contato com o pavimento.

4.1.2 – Ondulações tipo “quebra molas”

As considerações feitas para a análise do pavimento em questão foram às mesmas para a pista de granito polido com emendas.

Primeiro serão apresentados os dados conforme foram coletados e na seqüência serão feitas as análises de Auto Espectro de Potência, da integração para encontrar o deslocamento, da análise da PSD e finalmente a curva de elevação do pavimento em função da posição espacial (deslocamento do perfilômetro).

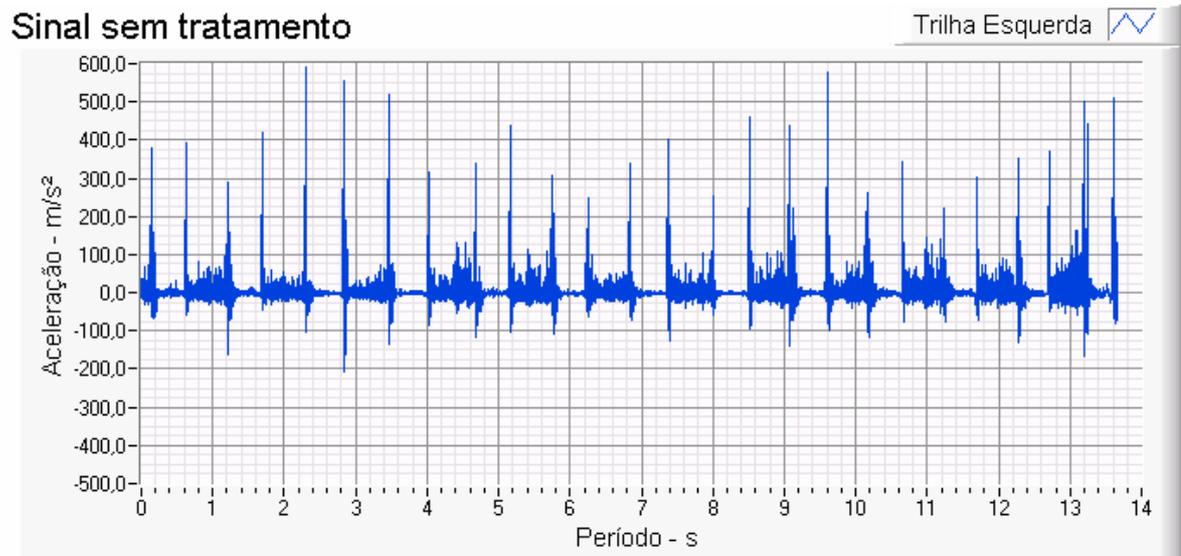


Figura 4.33 – Sinal do acelerômetro da trilha esquerda sem tratamento

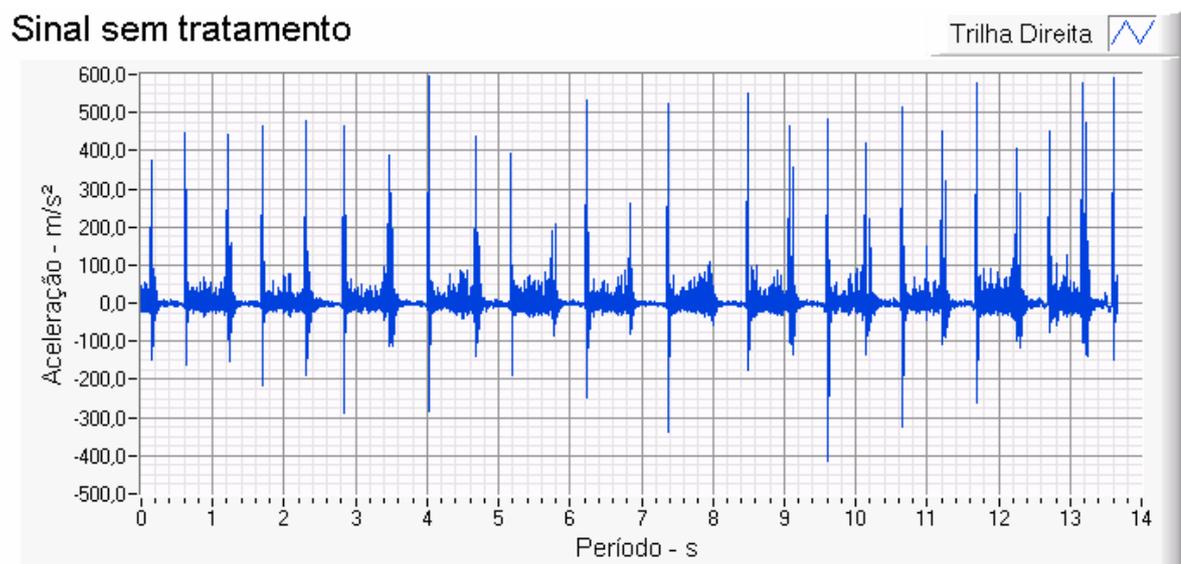


Figura 4.34 – Sinal do acelerômetro da trilha direita sem tratamento

A princípio, a característica da aceleração mostrada nas Figuras 4.33 e 4.34 é bem coerente com o que poderia se esperar para o pavimento medido como mostrado na pista da Figura 3.5. Em uma análise rápida, vê-se os picos de aceleração e logo pode-se concluir que estes são os impactos das rodas do perfilômetro contra as ondulações ou contra o pavimento.

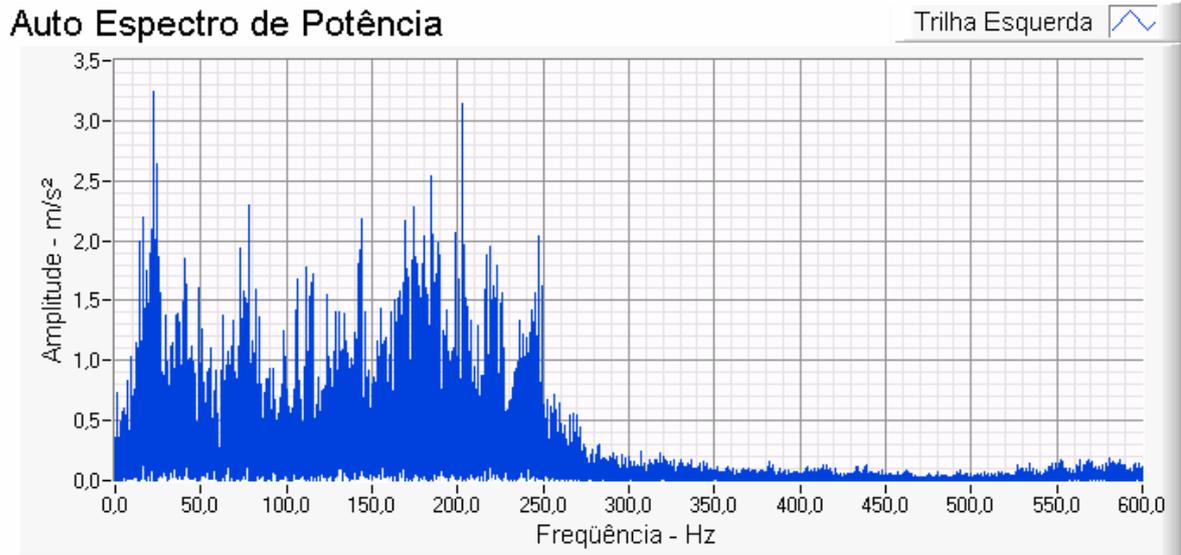


Figura 4.35 - Auto Espectro de Potência do sensor da trilha esquerda

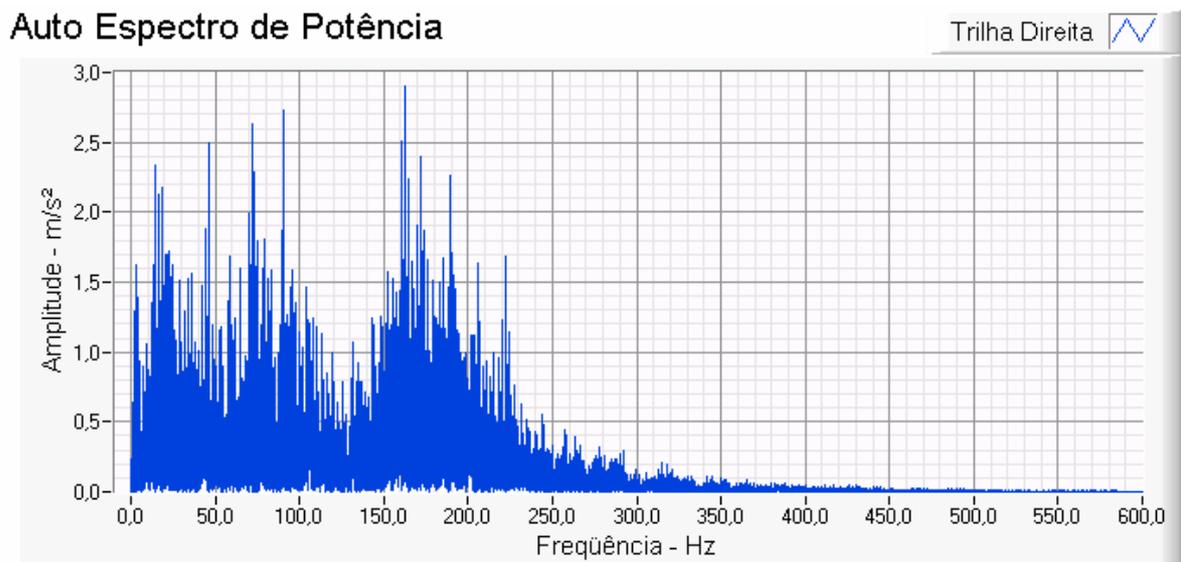


Figura 4.36 - Auto Espectro de Potência do sensor da trilha direita

As Figuras 4.35 e 4.36 mostram o Auto Espectro de Potência dos sinais coletados. São também perceptíveis nestas figuras os mesmos picos de freqüência que foram vistos na análise do pavimento anterior. São as freqüências de ressonância do perfilômetro.

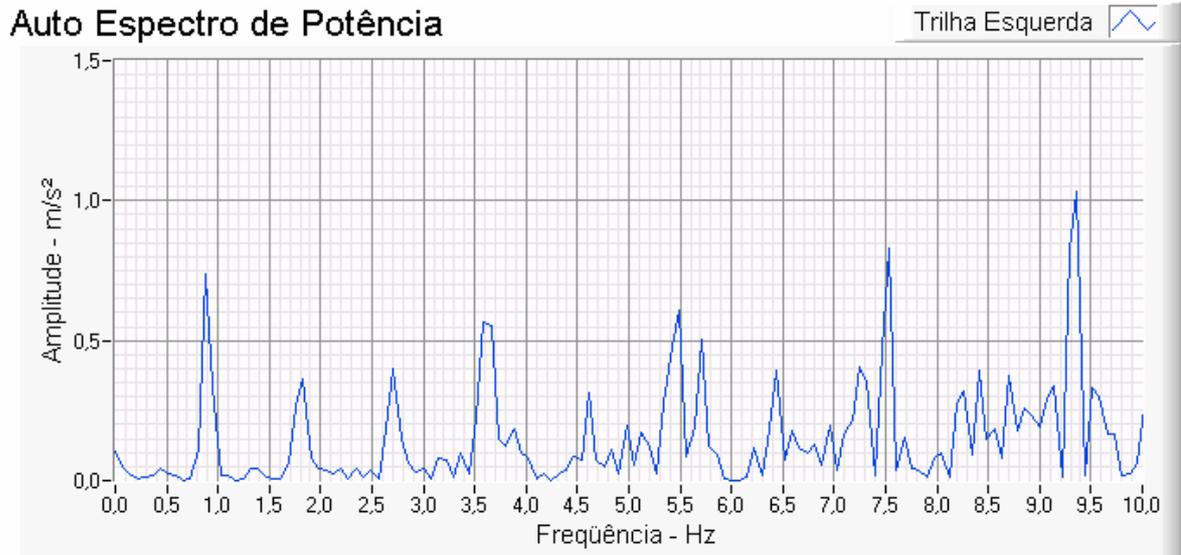


Figura 4.37 - Auto Espectro de Potência do sensor da Trilha esquerda com aproximação para observar em baixas freqüências.

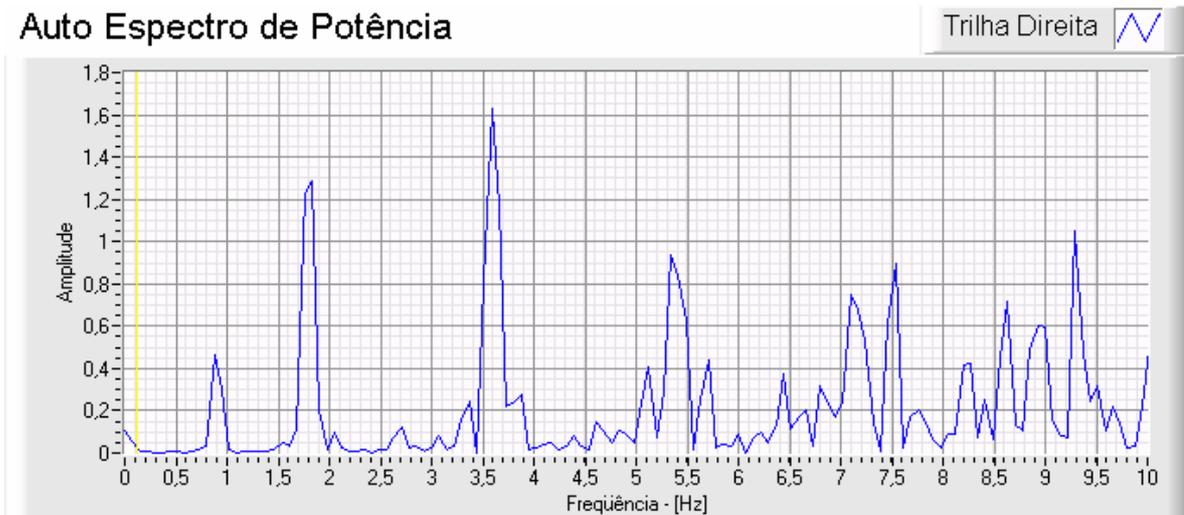


Figura 4.38 - Auto Espectro de Potência do sensor da trilha direita com aproximação para observar em baixas freqüências.

As Figuras 4.37 e 4.38 mostram que as freqüências estão em torno de 0,9Hz e o que se esperava era de 1,01Hz. Esta alteração também é devida à variação de velocidade durante a prova, como foi dito na análise do pavimento de granito, e também ao fato de que o perfilômetro ao passar sobre as ondas descreve um comprimento de onda maior do que o considerado nos cálculos feitos no parâmetro do teste. Ou seja, nos cálculos foi considerado como comprimento de onda a

distância entre dois picos subseqüentes mas como a amplitude da onda que foi medida é muito grande (0,06m), tal fato teve influência nos comprimentos de onda medidos.

O comprimento de onda máximo considerado foi de 1,37m e o máximo medido foi de 1,49m.

Tendo em vista estas considerações, pode-se concluir que as freqüências estão bem definidas e não será utilizado nenhum filtro neste momento.

Sendo assim as Figuras 4.39 e 4.40 mostram os Auto Espectro de Potência das acelerações que serão analisadas.

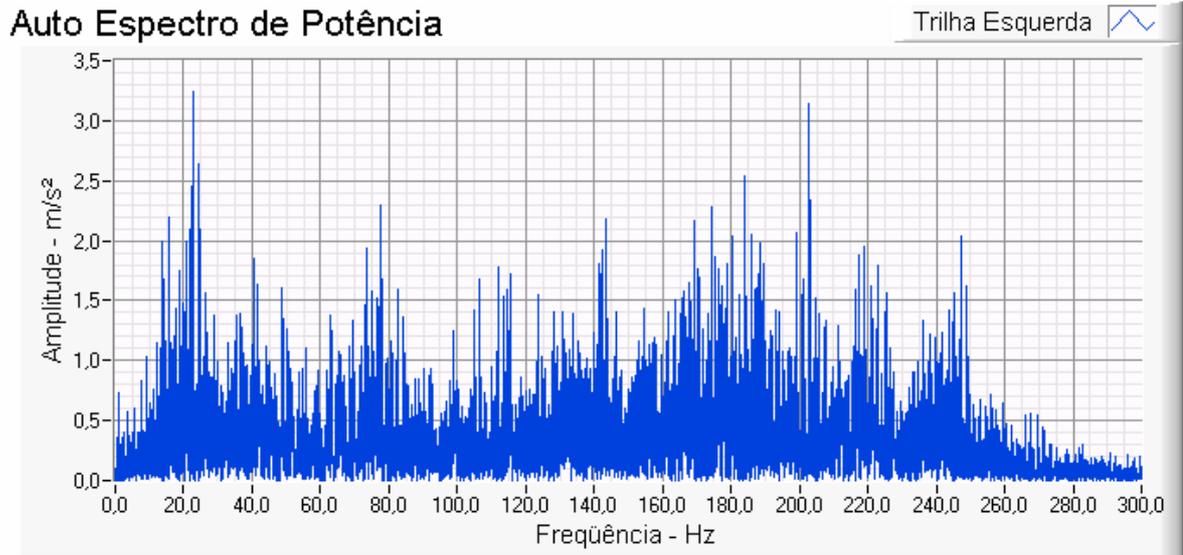


Figura 4.39 - Auto Espectro de Potência do sensor da trilha esquerda conforme o sinal será analisado.

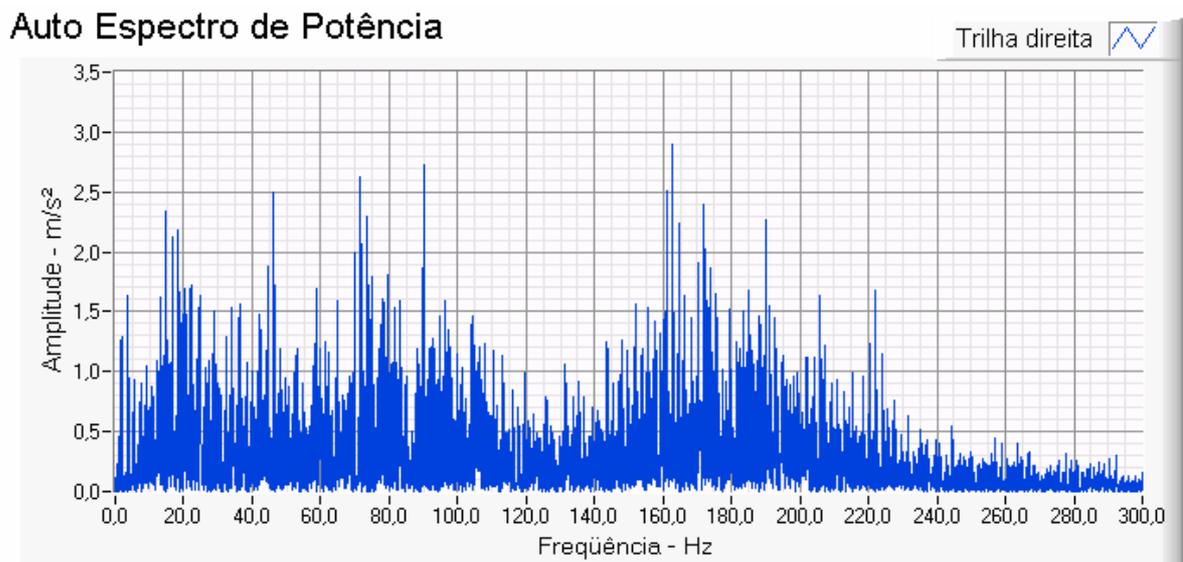


Figura 4.40 - Auto Espectro de Potência do sensor da trilha direita conforme o sinal será analisado.

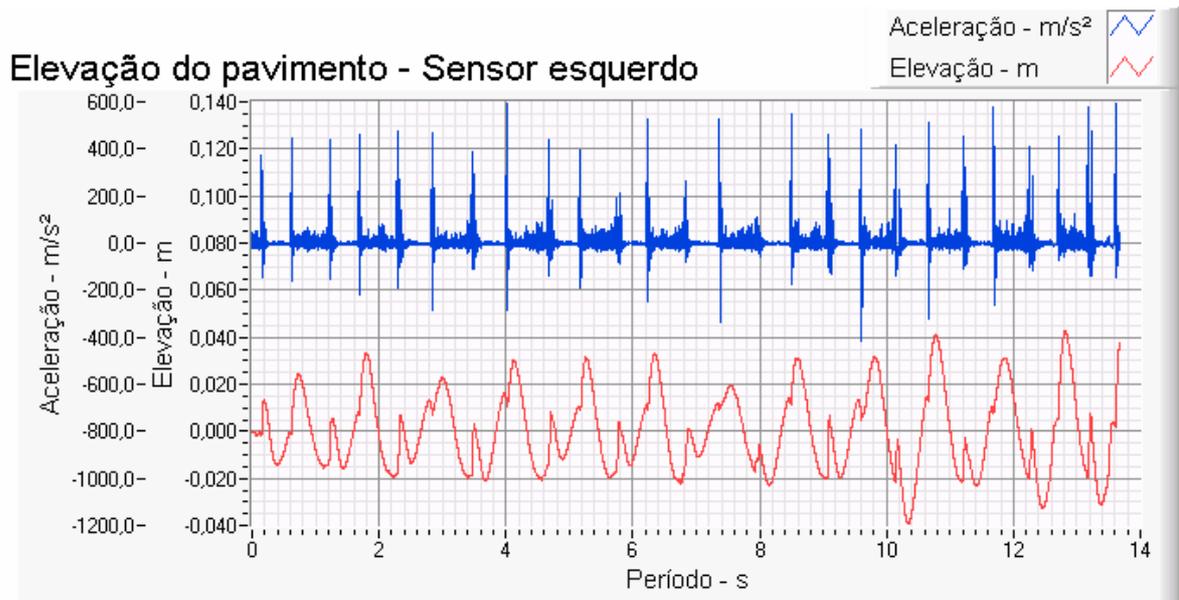


Figura 4.41 – Curva do perfil do pavimento medido – Trilha esquerda.

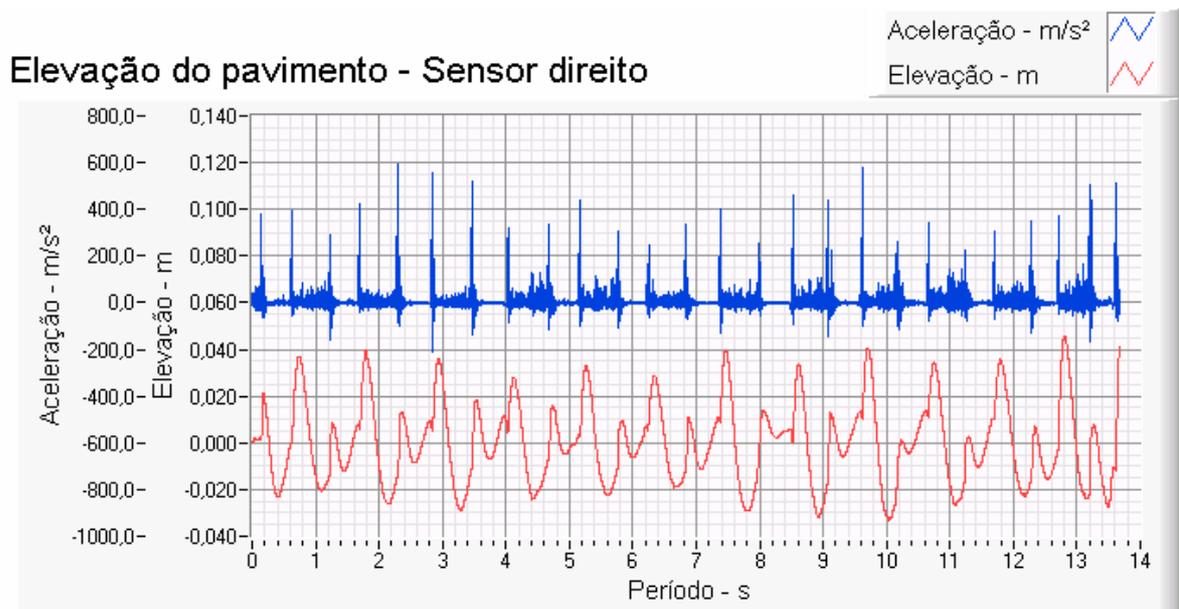


Figura 4.42 – Curva do perfil do pavimento medido – Trilha direita.

As Figuras 4.41 e 4.42 mostram a elevação do pavimento perfilado. Estas elevações são resultados das integrações dos sinais de aceleração coletados pelo perfilômetro ao passar pelas ondulações do pavimento.

Como será visto nas próximas figuras, neste caso não se conseguiu retratar a realidade em função de fatores que deveriam ter sido definidos no parâmetro do teste.

É mostrado, nas Figuras 4.43 e 4.44, o momento exato do impacto entre as rodas do perfilômetro e as ondulações do pavimento. Pode-se perceber que este impacto acontece no mesmo instante nos sensores esquerdo e direito, isto para evitar que um interfira na medição do outro e para isto o motorista tem que alinhar o veículo antes de passar pelos obstáculos.

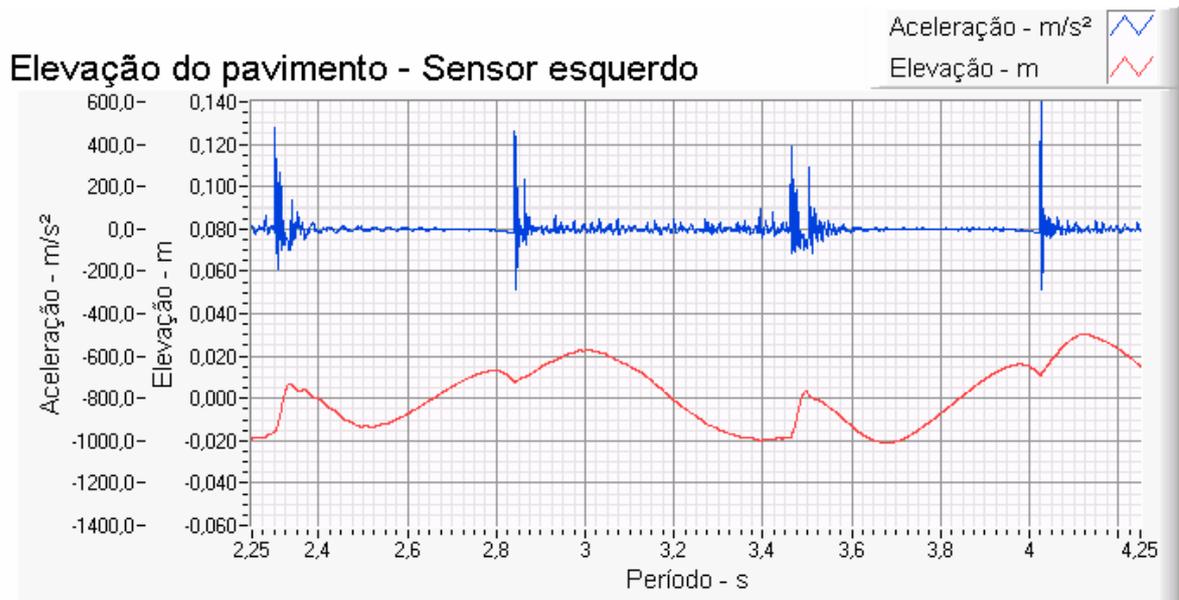


Figura 4.43 – Trecho da pista referente a dois segundos

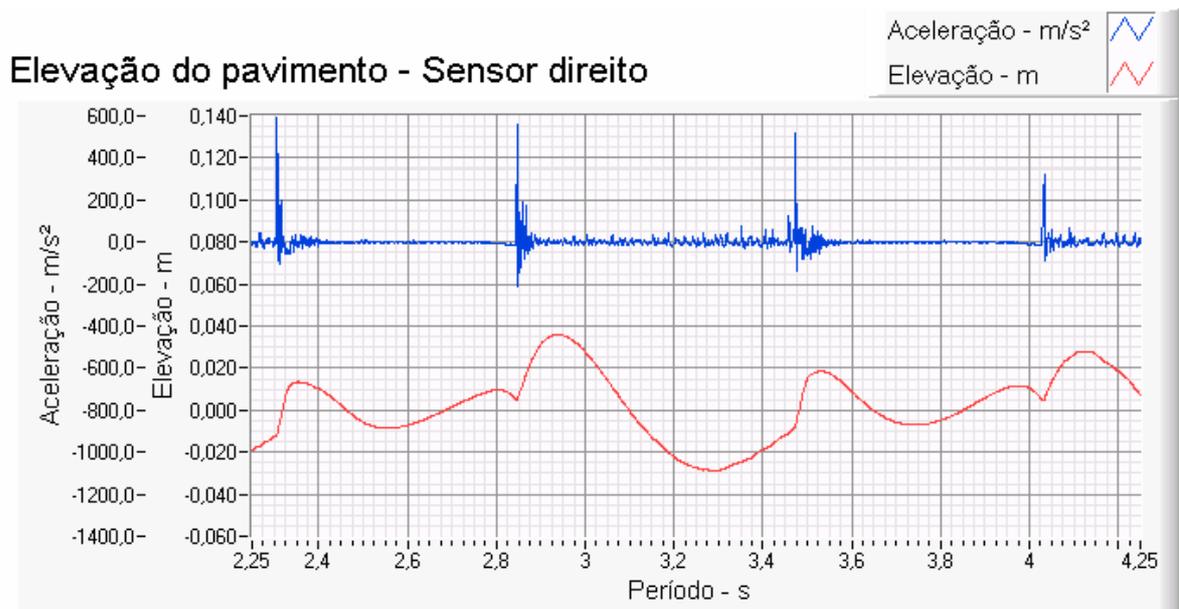


Figura 4.44 – Trecho da pista referente a dois segundos

Ainda nas figuras 4.43 e 4.44, no instante 2,3s, as rodas do perfilômetro encontram-se com a ondulação e registram um pico de aceleração, a partir deste pico percebe-se uma região mais lisa, sem muitas variações, que é devida à ondulação ser feita

de aço (ver Figura 3.5). Durante este tempo até pouco antes 2,85s a roda do perfilômetro está sobre a ondulação. No instante 2,85s a roda bate no pavimento e registra outro pico de aceleração e percorre até 3,475s medindo a parte baixa do pavimento. É possível observar que, durante o tempo que a roda permaneceu sobre o quebra mola, a elevação resultante da integração foi uma curva côncava e não convexa, como se esperava, e ainda se a fizer convexa a magnitude não representaria a altura da ondulação. Observa-se que o mesmo acontece quando a roda do perfilômetro encontra com a parte baixa do pavimento. A elevação resultante deveria ser uma reta e não uma senoide como aparece no gráfico.

Estes erros serão mais bem entendidos com as próximas figuras.

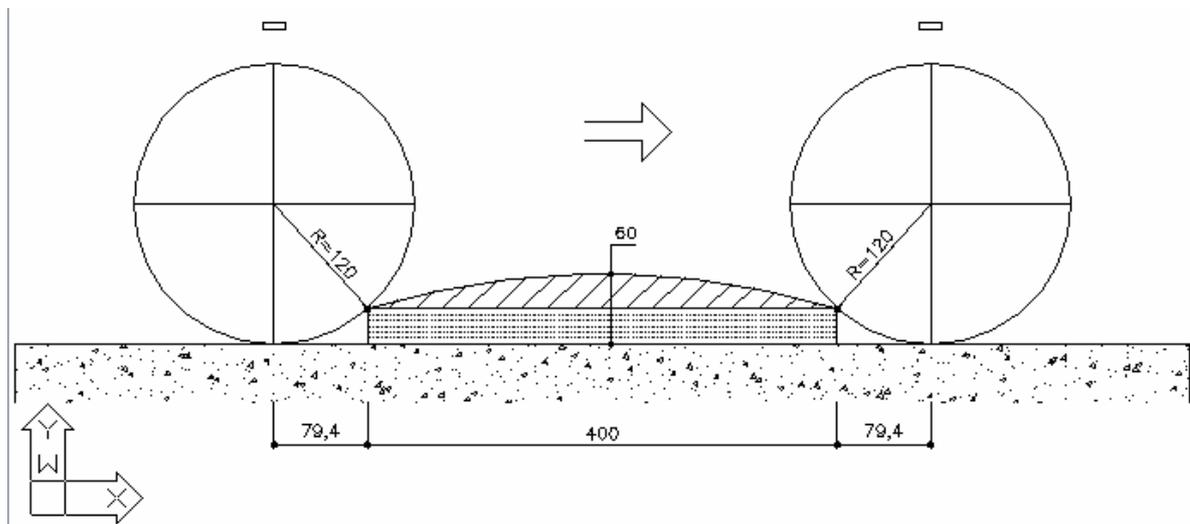


Figura 4.45 – Desenho esquemático da interação da roda do perfilômetro com a ondulação do pavimento.

Observando a Figura 4.45, conclui-se que a interação do diâmetro da roda e a ondulação causaram as seguintes incertezas na medição:

- a) a ondulação que na realidade tem 0,400m é descrita pelo perfilômetro como se tivesse, neste exemplo, 0,559m mais o arco da circunferência da ondulação. A roda começa a subir a ondulação pouco antes e desce pouco depois;
- b) a aceleração imposta no instante do impacto é uma componente da aceleração principal e, portanto, menor do que deveria, sendo assim, justificada a magnitude da ondulação caso rebatesse a curva fazendo-a côncava;
- c) na saída da ondulação a aceleração imposta já é a aceleração equivalente à altura da ondulação. Portanto, observa-se que na Figura 4.44 a magnitude é aproximadamente 0,06m que é exatamente a altura da ondulação. Esta magnitude pode variar ao longo das ondulações pois as mesmas são apoiadas sobre calços de borracha e algumas deslocam com a passagem do veículo.

A interação da roda do perfilômetro com a ondulação pode ser melhorada diminuindo o diâmetro da mesma.

Já o problema da curva ser côncava pode ser resolvido com o aumento da velocidade de passagem sobre a ondulação. Aumentando a velocidade de passagem e diminuindo o tempo do evento pode ser que este problema seja resolvido ou minimizado para isto é necessário diminuir o peso do perfilômetro. Esta é uma proposta de trabalhos futuros, aprofundar mais no estudo deste fenômeno e construir um perfilômetro que possa minimizar as incertezas das medições.

A seguir as Figuras 4.46 e 4.47 mostram as fotos da interação real entre a roda do perfilômetro



Figura 4.46 – Início da ondulação – Interação da roda com o pavimento



Figura 4.47 – Final da ondulação – Interação da roda com o pavimento

Neste caso a análise da PSD não foi feita devida à elevação espacial e o comprimento das ondulações conseguidas não representarem o pavimento medido.

4.1.3 – Asfalto

Foram também perfilados dois tipos de asfalto, sendo aqui denominados como liso e áspero devido ao conforto ao passar sobre os mesmos.

Não é objetivo deste estudo analisar todos os pavimentos perfilados, porém, estão expostos a seguir os gráficos e as PSDs dos mesmos para consulta e comparações futuras.

4.1.3.1 – Asfalto Liso

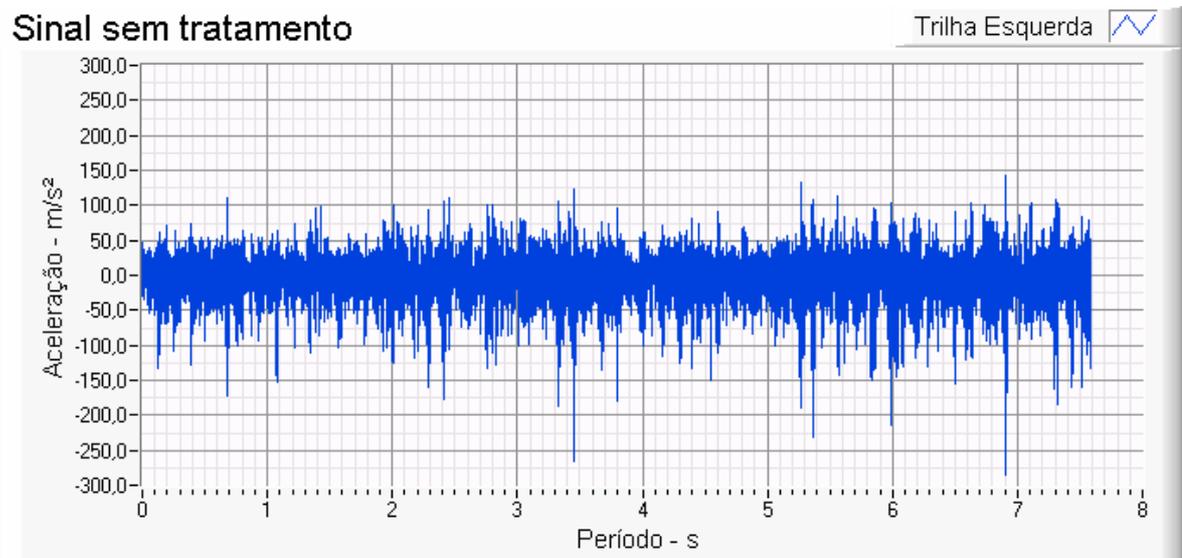


Figura 4.48 – Sinal do acelerômetro da trilha esquerda sem tratamento

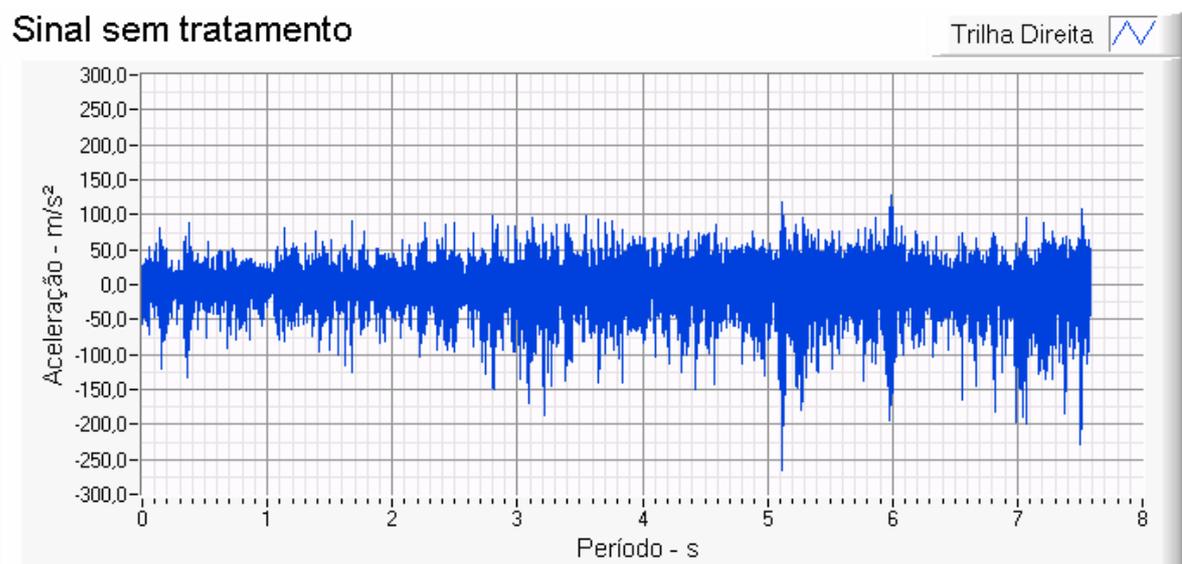


Figura 4.49 – Sinal do acelerômetro da trilha direita sem tratamento

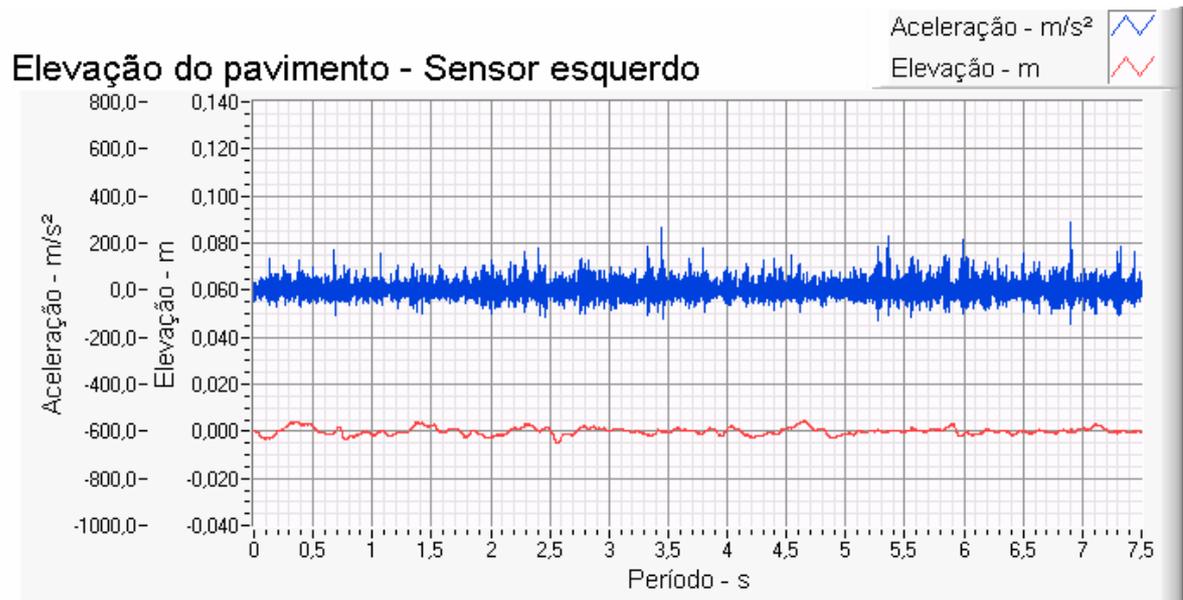


Figura 4.50 – Sinal da integração dupla da aceleração com o sinal da aceleração – Trilha esquerda

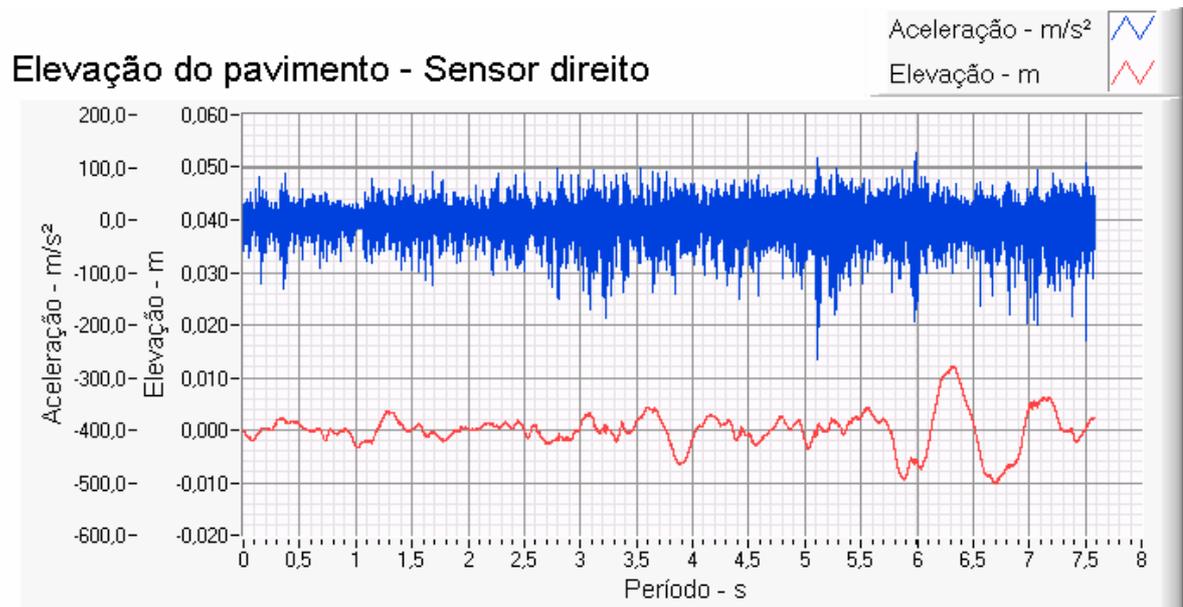


Figura 4.51 – Sinal da integração dupla da aceleração com o sinal da aceleração – Trilha direita

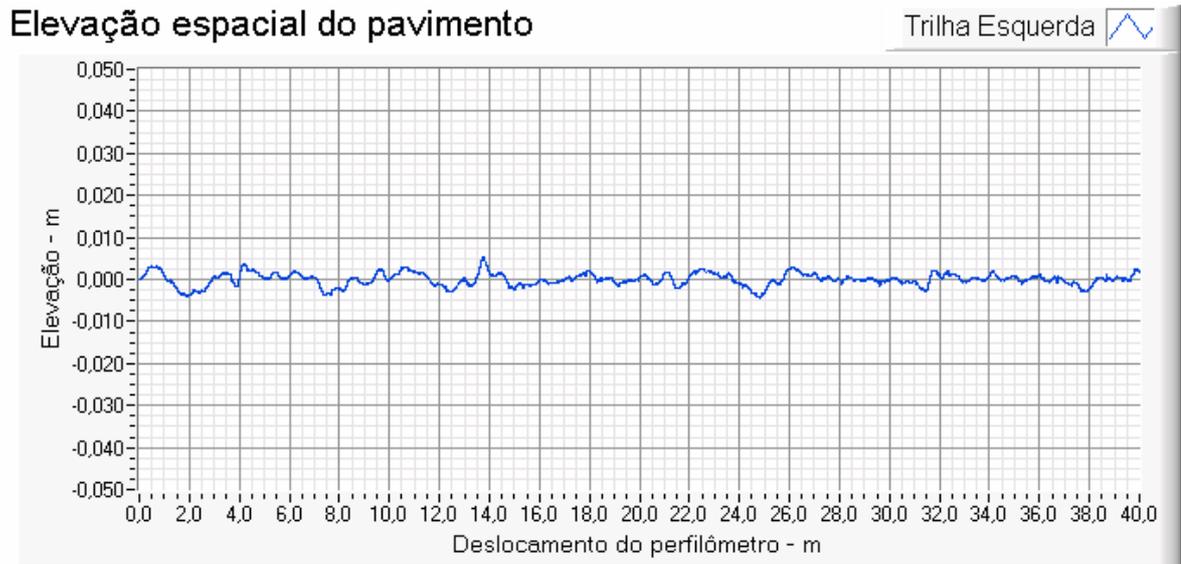


Figura 4.52 – Perfil do Pavimento Medido – Trilha esquerda.



Figura 4.53 – Perfil do Pavimento Medido – Trilha direita.

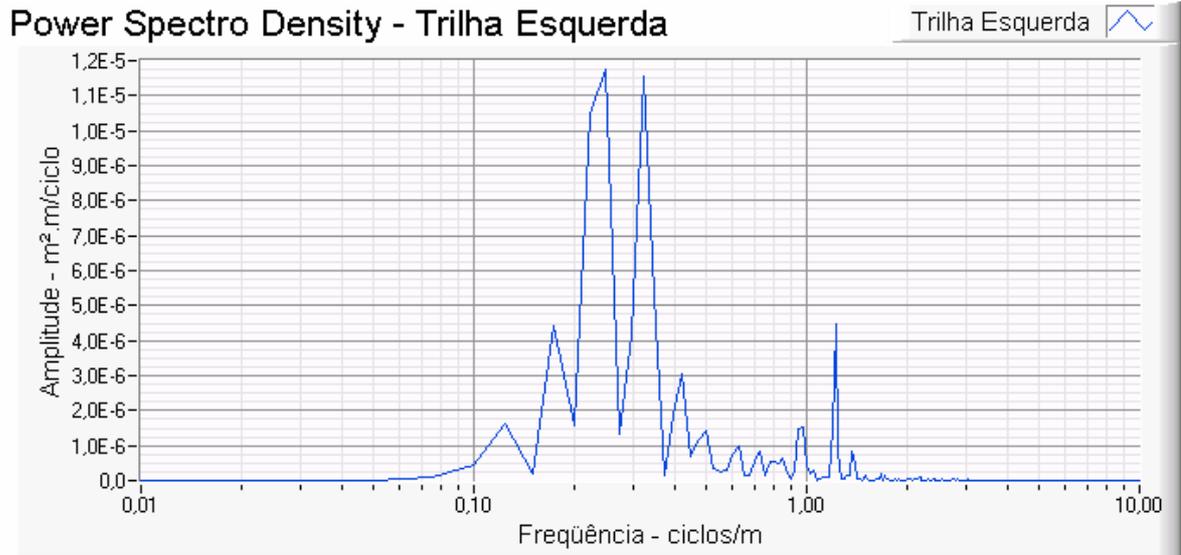


Figura 4.54 – PSD da elevação da trilha esquerda do pavimento



Figura 4.55 – PSD da elevação da trilha direita do pavimento

4.1.3.2 – Asfalto Áspero

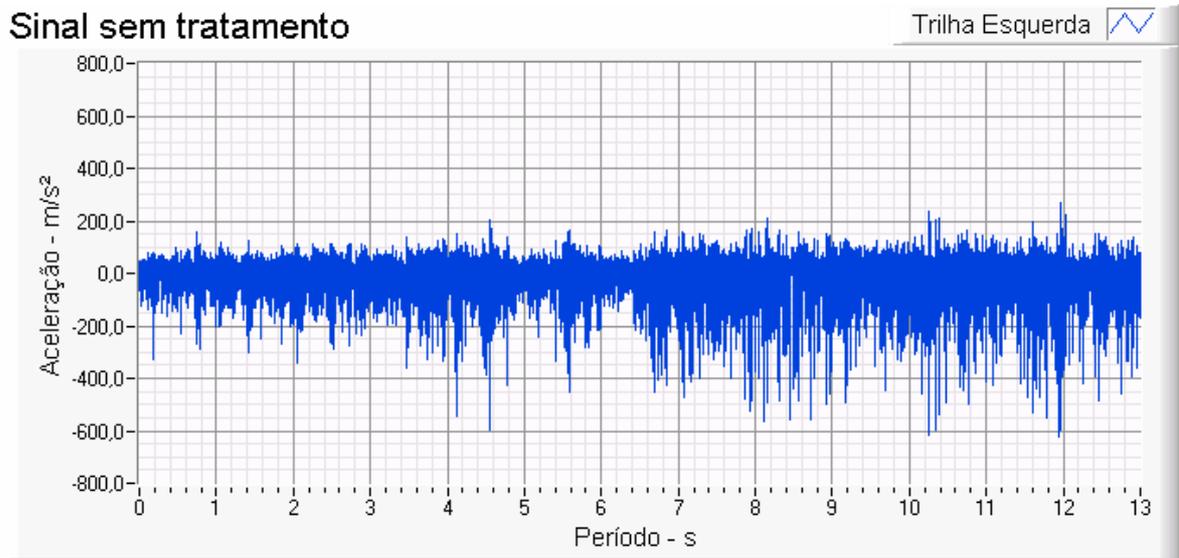


Figura 4.56 – Sinal do acelerômetro da trilha esquerda sem tratamento

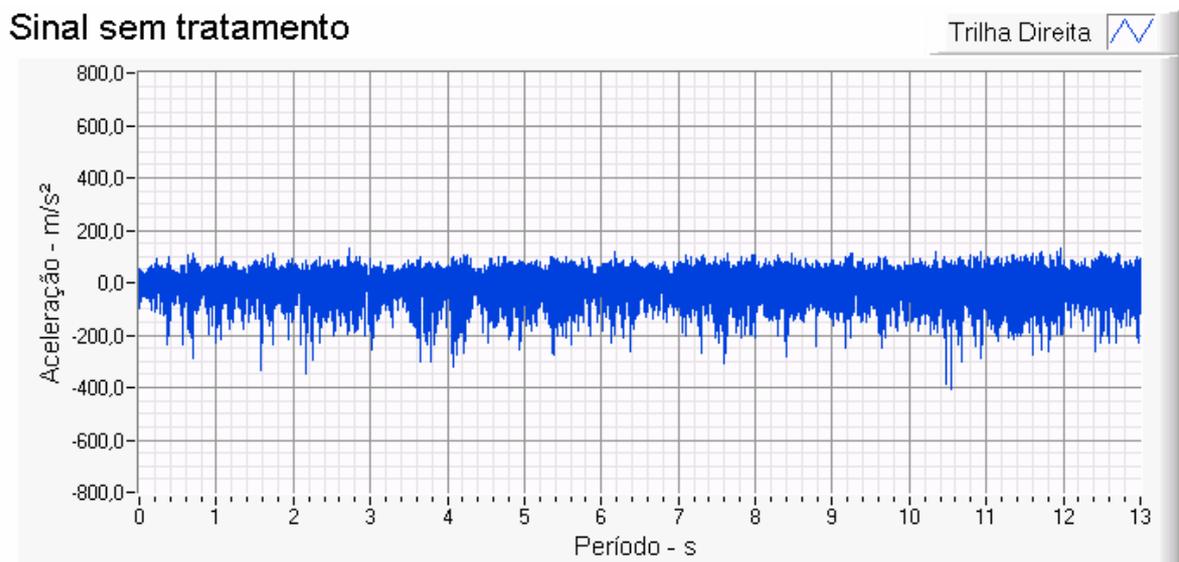


Figura 4.57 – Sinal do acelerômetro da trilha direita sem tratamento

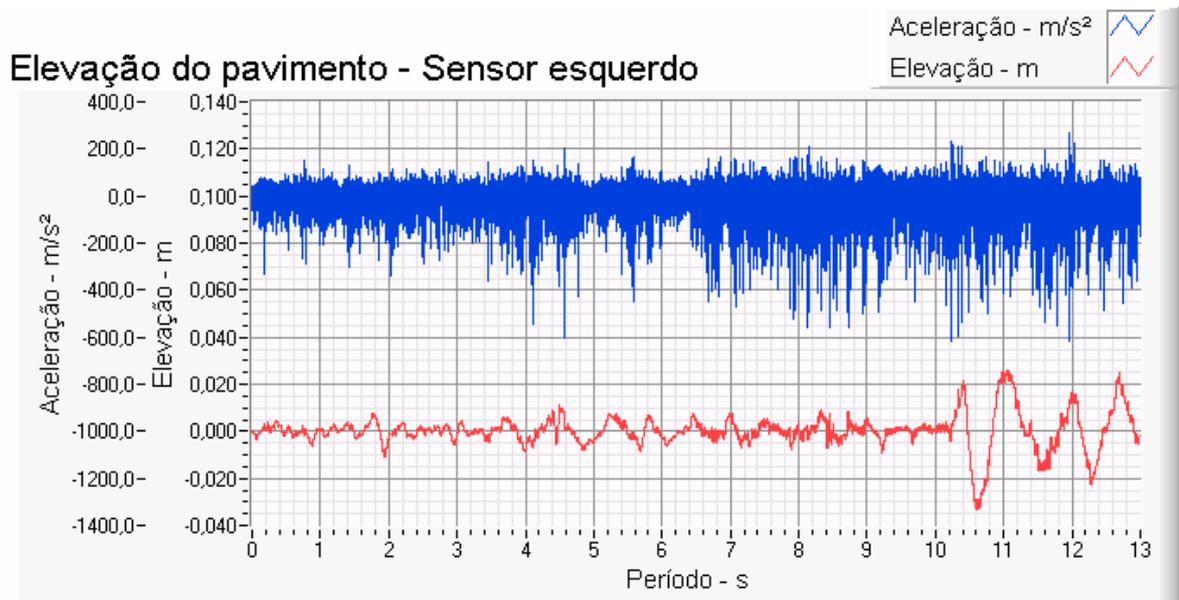


Figura 4.58 – Sinal da integração dupla da aceleração com o sinal da aceleração – Trilha esquerda

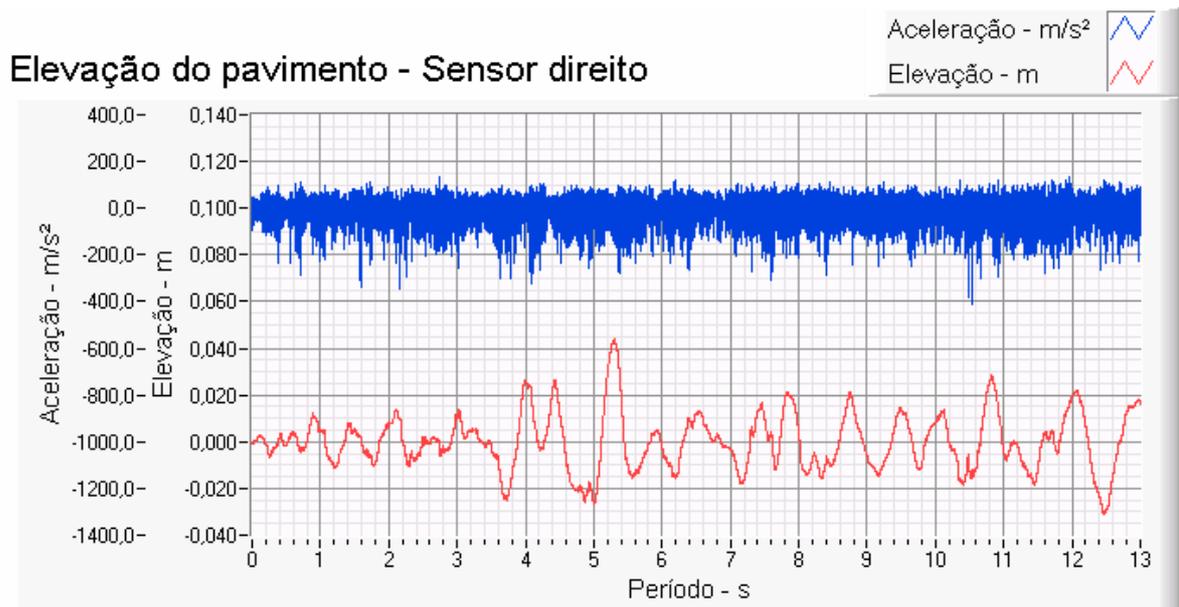


Figura 4.59 – Sinal da integração dupla da aceleração com o sinal da aceleração – Trilha direita

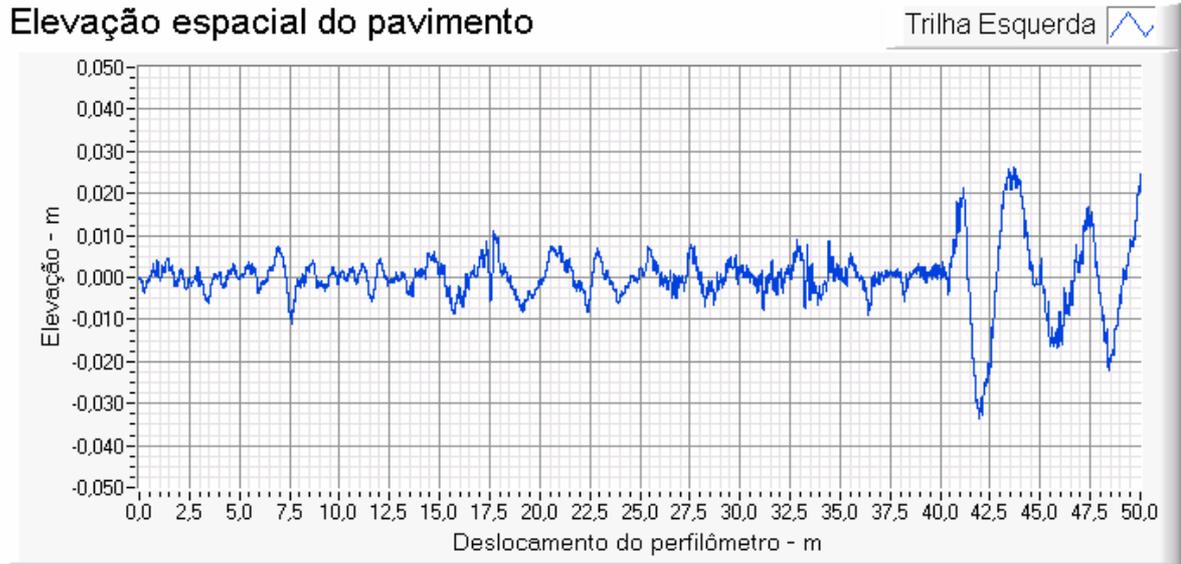


Figura 4.60 – Perfil do pavimento medido – Trilha esquerda

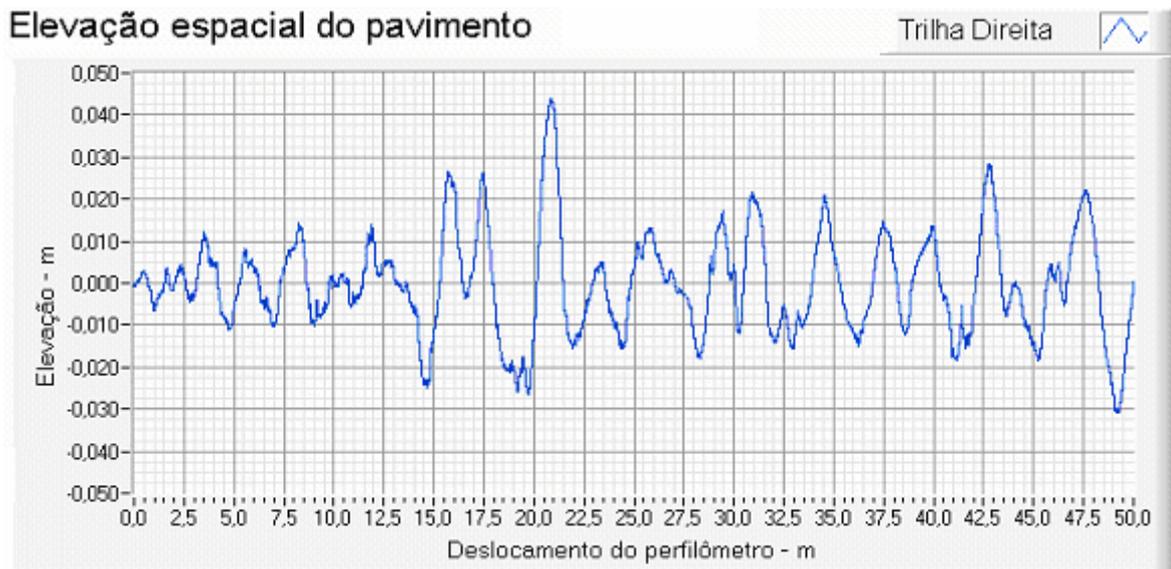


Figura 4.61 – Perfil do pavimento medido – Trilha direita

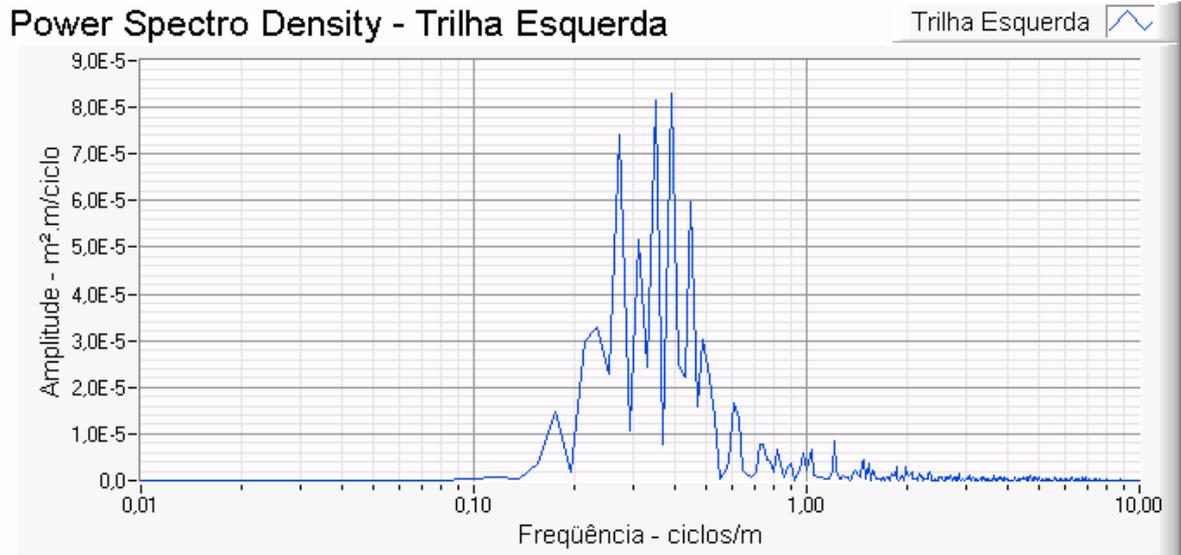


Figura 4.62 – PSD da elevação da trilha esquerda do pavimento

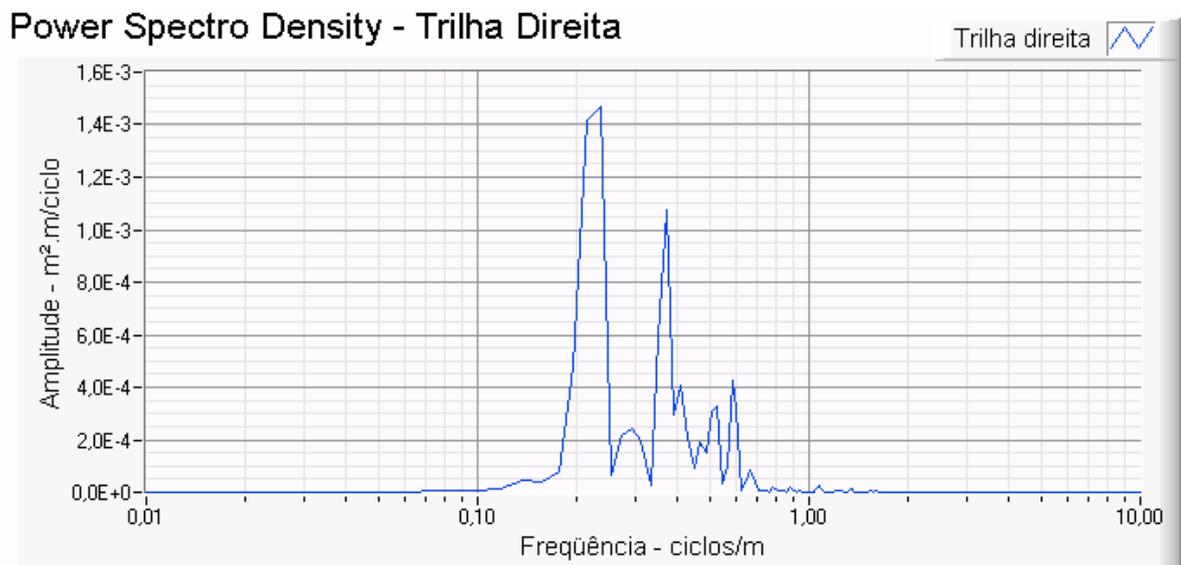


Figura 4.63 – PSD da elevação da trilha direita do pavimento

Neste capítulo foram mostrados os dados coletados de quatro pavimentos diferentes sendo eles: granito polido com emendas, seqüência de ondulações tipo “quebra

molhas”, asfalto liso e asfalto áspero. Foram também mostradas as análises dos dados do granito polido com emendas e da seqüência de ondulações do tipo “quebra molhas” que foram escolhidos devido à facilidade de visualização gráfica dos mesmos.

O resultado das análises para o pavimento de granito polido com emendas mostrou que o perfilômetro respondeu com fidelidade o perfil do pavimento e que seria suficiente para iniciar os trabalhos de desenvolvimento virtual das suspensões. Porém para um desenvolvimento completo é necessário perfilar outros tipos de pavimento para obter os dados dos locais onde se efetuam as provas subjetivas.

Já para o segundo pavimento que é a seqüência de ondulações tipo “quebra molhas” o perfilômetro não foi fiel, podendo concluir que para perfilar este tipo de pavimento é necessária a reavaliação no projeto do perfilômetro, variando o diâmetro da roda e o peso do mesmo para obter o melhor resultado. Como foi dito anteriormente este pavimento não é de interesse durante o desenvolvimento e foi utilizado como sendo uma extrapolação das incertezas embutidas nas medições. Pode-se concluir com as análises deste pavimento que o diâmetro da roda do perfilômetro é de fundamental importância em função das eventuais irregularidades encontradas durante as medições.

Os dados coletados dos outros dois pisos, asfalto liso e asfalto áspero não foram analisados em função da falta de dados para correlação entre o real e o medido. Este trabalho será possível quando já estiver disponível um modelo de veículo virtual que represente com fidelidade o veículo real e assim poderá ser feita a correlação

medindo sobre a pista real e comparando sobre a pista virtual que será os dados coletados através do perfilômetro.

As Figuras 4.48 a 4.63 foram incluídas neste trabalho com o intuito de consultas futuras a análise e interpretação dos gráficos e a validação do sinal coletado será possível através de correlação com modelos virtuais que ainda não estão disponíveis.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

5.1 - Perfilômetro

Um perfilômetro instrumentado com acelerômetros sobre os eixos de duas rodas “rígidas” a contato com o pavimento, sendo uma alinhada à roda esquerda e outra à roda direita do veículo, foi utilizado para caracterizar o perfil de pavimento. Este perfilômetro mostrou ter um bom desempenho nos testes a que foi submetido.

Um item a ser definido antes de iniciar o projeto do perfilômetro é o tipo de pavimento em que o mesmo será utilizado já que as dimensões das rodas e o peso definem as limitações do mesmo.

Foi observado durante as análises que a roda do perfilômetro funciona como um filtro. As irregularidades filtradas estão relacionadas com o diâmetro das rodas e o tamanho das irregularidades chegando a ser impossível efetuar as medições em determinados tipos de pavimento como exemplo a seqüência de ondulações tipo “quebra molas”.

Já com relação ao peso observou-se que a massa não suspensa do perfilômetro tem que ser a menor possível para possibilitar maior velocidade de passagem sobre o pavimento e conseqüentemente a leitura de freqüências mais baixas. O peso da massa não suspensa do perfilômetro é inversamente proporcional à velocidade de passagem sobre o pavimento uma vez que quanto maior o peso maior a inércia e maior será a força de contenção desta massa. Quando esta força de contenção atinge um valor tão alto que não seja suportado pela própria roda a saída é diminuir

a velocidade de passagem sobre o pavimento. Diminuindo a velocidade de passagem sobre o pavimento é o mesmo que limitar o perfilômetro para baixas frequências o que não é ideal.

Quando se perfila um determinado tipo de pavimento a velocidade de passagem determina quais as frequências serão registradas, para altas frequências (aspereza) requer velocidades mais baixas em torno de 5 km/h e para baixas frequências (ondulações longitudinais) as velocidades já são mais altas acima de 60 km/h.

Com isto conclui-se que um perfilômetro ideal tem que ter a menor massa não suspensa possível com o menor diâmetro de roda possível levando a crer que o melhor seria um sensor laser sem contato porém, neste caso, não é possível já que o princípio de funcionamento deste perfilômetro é através do contato e que foi o que permitiu reproduzir o perfil do pavimento.

A metodologia aplicada mostrou ser confiável desde que sejam respeitados os parâmetros do teste e que seja bem definido o tipo de pavimento a ser medido. Nos pavimentos analisados é possível verificar que se fosse o interesse reproduzir com mais exatidão as emendas do granito as rodas do perfilômetro deveriam ser menores de tal forma a entrar dentro das emendas e a velocidade de passagem deveria ser a menor possível e que para reproduzir as ondulações tipo “quebra molas” o perfilômetro deveria ser re-projetado.

A coleta dos dados de aceleração nas baixas velocidade é conseguida através de acelerômetros capacitivos com frequência de corte alta como o utilizado neste trabalho.

5.2 – Ferramentas de análise dos dados

Foram utilizados para interpretação e análise dos dados funções disponíveis no *software* LabVIEW7.0 dentre elas a PSD (Densidade Espectral de Potência). Dentre as funções disponíveis no LabVIEW7.0 foi encontrada uma função Integral Dupla que permitiu transformar o sinal de aceleração no domínio do tempo para o deslocamento vertical no domínio do tempo. Com as duas funções principais, a Integral Dupla, que permitiu chegar no perfil do pavimento, e a PSD, que validou este perfil, foi criado um programa de análise onde se chegou ao perfil do pavimento que é o deslocamento vertical em função da posição espacial validado.

Os resultados obtidos das análises efetuadas pelo programa criado foram bastante satisfatórios tendo em vista a reprodução do perfil da pista de granito com emendas.

A função PSD mostrou ser adequada para este tipo de análise tendo descrito com fidelidade o que se esperava do pavimento perfilado experimentalmente.

O LabVIEW7.0 mostrou ser uma ferramenta adequada para este tipo de análise com disponibilidade de funções que possibilitou interpretar e analisar os dados coletados.

5.3 – Ambiente analisado

Dentre os quatro pavimentos perfilados foram escolhidos dois para análise sendo eles a pista de granito polido com emendas e a seqüência de ondulações tipo “quebra molas”.

O objetivo da escolha de analisar os dados da pista de granito polido com emendas foi à facilidade de visualização do perfil final. Para a análise dos dados dos pavimentos de asfalto deve ser feita à correlação entre o virtual e o real com o

objetivo de validação dos dados coletados e neste momento isto não é possível devido à indisponibilidade de modelos virtuais validados para este tipo de prova.

Já o objetivo de analisar os dados da seqüência de ondulações tipo “quebra molas” foi de tentar definir os limites do equipamento. O que pôde-se verificar que para este tipo de pavimento é necessário um perfilômetro específico. Pôde-se também verificar com os dados deste pavimento como funciona o filtro provocado pela roda do perfilômetro.

Concluiu-se também que para este tipo de pavimento deve-se utilizar outra metodologia que não tenha o mesmo princípio de funcionamento do perfilômetro utilizado.

5.4 – Proposta para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros propõe-se caracterizar pisos na faixa de freqüência de 0 a 100Hz e, após, introduzi-los nos *softwares* de simulação efetuar confrontos da resposta do sinal no veículo real e no modelo do veículo virtual quando estes são submetidos às mesmas condições de pavimento.

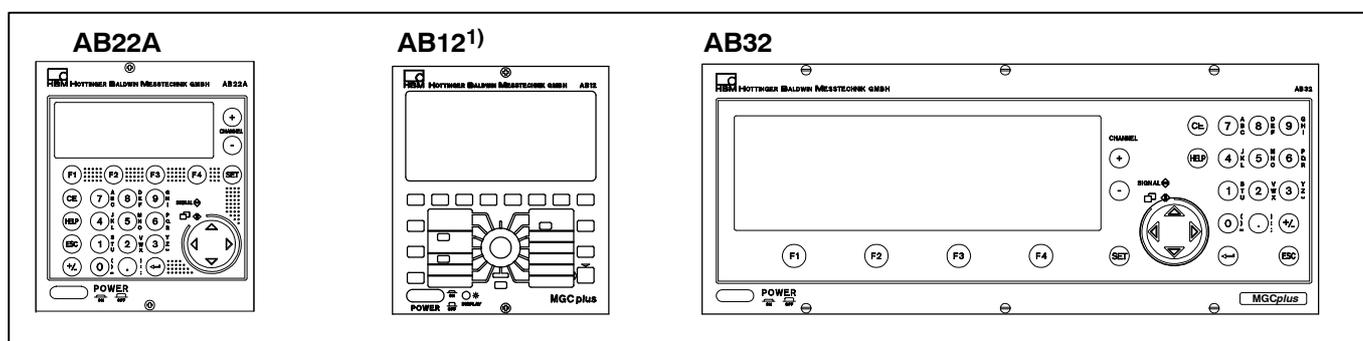
Ainda para trabalhos futuros propõe-se redimensionar o perfilômetro de forma a fazê-lo o mais leve possível e com o diâmetro da roda menor. Neste caso, o desafio é desenvolver um perfilômetro que consiga o melhor compromisso entre baixas e altas freqüências.

AB22A/AB32 Display and Control Panel

Width	111.8 mm (22 divs)
Display AB22A	Backlit LCD display, resolution 192x64 pixels
AB32	Vacuum-fluorescent display (VFD), resolution 192x64 pixels
Key panel	Keypad (alphanumeric), 4 function keys, cursor keys and dialog keys. All keys are touch-sensitive
Password	There is a facility for protecting certain operating levels with a password
Dialog	Menu languages: German/English/French/Spanish
Display formats	1, 3, 6 values; ty graph, xy graph; limit value status
Weight	approx. 0.5kg

ABX0200 Portable Display and Control Unit

Illuminated display		no
Front width	mm	111.8 (22 divs)
Current consumption (8V)	mA	20
Length of cable (6-wire)	m	1.5
Receptacle type		Binder coupler receptacle, in accordance with DIN 45326, Series 723, 8-pin, No. 09-0171-15-08



1) With single-channel amplifiers ML01B/10B/30B/35B/38/50B/55B/60B only.

CP32B Communication processor

Width	mm	60.9 (12 divs)
Interfaces		1 x RS232C 1 x RS485 (full-duplex) 1 x parallel port
PC-Card (PCMCIA) Slots		2 x (1 x type II; 1 x type III)
Measured value memory	values	5000000 (2byte format)
Sampling rate	1/s	1 ... 19200
Expansions (optional)		PC hard disk card 504MB, ATA Ethernet (order no. 1-PCMCIA-ETHERNET)
Maximum data transfer rate with storage on hard disk	values/s	153600
Data transfer rate		
IEEE-488-78 interface	values/s	90 000
Ethernet interface	values/s	125 000
Weight	kg	0.8

PC-Card (PCMCIA) Ethernet card for CP32B

Transfer rate	Mbps	10
Protocol		TCP/IP
Slot type		Type II
Maximum data transfer rate	values/s	125 000
Weight	kg	0.3

ML801 multi-channel amplifier

ML801 + connection board		AP801 AP801S6	AP809 ¹⁾	AP409 ²⁾	AP835
Accuracy class		0.05		0.1	0.05
Number of measuring points		8		4	8
Transducers		± 10V symmetrical	Thermo- couples Type K, J, T, E, N, S, B, R	Thermo- couples Type K, J, T, E, N, S, B, R, Individual in- puts electrically isolated	Pt100 4-wire circuit
Width	mm	20.3 (4divs)			
Maximum sampling rate per channel	values/s	2400			
Measuring frequency range	Hz	0 ... 500 Hz			
Effective resolution	Bit	20			
Maximum permissible input voltage and common-mode voltage	V	50	10	50	–
Absolute calibration deviation	%	0.05			
with cold junction	K	–	0.5		–
Filter		Nom. val. f_c	–1dB	–3dB	
Butterworth low pass		(Hz)	(Hz)	(Hz)	
		5.00	4.44	6.13	
		10.00	9.27	12.51	
		20.00	19.94	25.96	
		40.00	38.77	50.55	
		80.00	79.85	98.15	
		200.00	200.02	238.56	
		250.00	249.75	289.99	
		500.00	501.81	585.57	
Bessel low pass		Nom. val. f_c	–1dB	–3dB	
		(Hz)	(Hz)	(Hz)	
		0.05	0.04	0.08	
		0.10	0.09	0.15	
		0.20	0.18	0.30	
		0.50	0.72	1.20	
		1.25	1.43	2.41	
		2.50	2.87	4.83	
		5.00 ³⁾	5.74	9.66	
		10.00	11.40	19.20	
		20.00	22.38	37.42	
		40.00	41.71	66.95	
		100.00	126.35	205.68	
		200.00	231.58	413.32	
Input for voltage measurement					
Input signal range	V mV	–10.5...+10.5	–80...+80	–80...+80	–
Zero offset	V mV	–10.5...+10.5	–80...+80	–80...+80	–
Internal resistance of the signal voltage source	kOhm		< 1.0		–
Input resistance symmetrical/asymmetrical	kOhm	500/250	2000/1000	1000	–
Noise rel. to input with filter setting 1.25Hz	µV _{pp}	< 50	< 0.5	< 2	–
Long-term drift over 48 hours (Autocalibration on/off)	mV	0.8/1.5	0.01/0.02	0.02/0.05	–
Linearity deviation	%	<0.03; typ. 0.01	<0.03; typ. 0.01	<0.06; typ. 0.03	–
Transducer supply²⁾ (AP801S6 only)					
Transducer supply voltage (must in each case be selected for all channels collectively)	V	8/16	–	–	–
Max. output current for external transducers	mA	50	–	–	–

1) No line break recognition

2) Two AP409 can be operated with one ML801

3) Factory setting

2) With MGCplus, a maximum of 2A may be drawn for transducer supply.

ML60B single-channel amplifier module

Accuracy class		0.01					
Input signals Frequency F1 Signal of the direction of rotation F2 Zero index Transducer error (only with AP01)		Input level 0.1 ... 30 V _p (with control amplifier) or CMOS-level 0.1 ... 30 V _p (with control amplifier) or CMOS-level CMOS-level CMOS-level					
Transducers that can be connected HBM torque transducers with AP07 with AP17 Frequency signal sources with square wave or sinusoidal voltage, incremental transducers		T3...FN/FNA, T10F-KF1 T10F-SF1, T10F-SU2					
Permissible cable length between transducer and amplifier	kHz	0.0001 ... 1000					
Input level 5V adjusted 100mV adjusted (automatic gain control)	m	70					
Input impedance	V _p V _p	5...30 0.1...30					
Detection of the direction of rotation	kOhm	typ. 20					
Measuring ranges Frequency measurement		via additional frequency signal (phase-shifted by 90°)					
	Hz	100...2000 1 000 ... 20 000 10 000... 200 000 100 000 ... 1 000 000 100 ... 1 000 000					
Pulse counting	Pulses	1 000 000					
Maximum pulse rate with pulse counting	Pulses/s	1 000 000					
Zero-point balancing range Measuring ranges up to 2kHz	Hz	-2000 ...+2000					
Measuring ranges up to 20kHz	Hz	-20 000... +20 000					
Measuring ranges up to 200kHz	Hz	-200 000 ... +200 000					
Measuring ranges up to 1MHz	Hz	-1 000 000 ... +1 000 000					
Noise (10 kHz input signal) Filter Off	Hz	± 3					
1 kHz LP-Filter, Butterworth	Hz	± 1					
100 Hz LP-Filter, Bessel	Hz	± 0.2					
Input filter		Glitch filter, can be switched on					
Measuring frequency range		Nom. val. fc (Hz)	-1dB (Hz)	-3dB (Hz)	Phase del. (ms)	Rise time (ms)	Over-shoot %
Without filter		—	2500	3100	0.4	0.12	8
Butterworth low pass		2000	2000	2400	0.5	0.18	10
		1000	1000	1200	0.8	0.35	8
		500	470	570	0.9	0.70	11
		250	246	291	1.45	1.3	10
		80	79	99	3.65	3.8	9
		40	37.5	49.5	6	7	7
		20	19	25.5	11	13.3	6
		10	8.9	12.4	20	26	5
		5	4.5	6.2	42	50	4
Bessel low pass		Nom. val. fc (Hz)	-1dB (Hz)	-3dB (Hz)	Phase del. (ms)	Rise time (ms)	Over-shoot %
		900	900	1800	0.6	0.35	0
		400	400	800	0.8	0.52	1.0
		200	235	410	1.1	0.86	1.3
		100 ^{a)}	117	210	1.8	1.7	1.3
		40	38.5	68	4.3	5.1	1
		20	22	37.5	7.4	9.4	1
		10	10.5	19	12	19	0
		5	5.1	9.6	22	35.5	0
		2.5	2.6	4.8	50	70	0
		1.25	1.35	2.4	100	135	0
		0.5	0.7	1.2	200	280	0
		0.2	0.17	0.3	650	1100	0
		0.1	0.08	0.15	1400	2200	0
		0.05	0.043	0.075	3000	4600	0
High-pass from 0.2Hz Be; 5Hz Bu	Hz	0.1					
from 2.5Hz Be; 5Hz Bu	Hz	1.0					
from 20Hz Be; 40Hz Bu	Hz	10					
Absolute calibration accuracy	%	0.005					
Long-term drift over 90 d	%	<0.005					
Effect of a 10K-change of the ambient temperature on the digital signals S1 (gross) and S2 (net):	%	0.005					
Analog outputs V_{o1} and V_{o2}							
Residual carrier voltage (38.4kHz)	mV _{pp}	< 5					
Long-term drift (over 48h)	mV	< 3					

* Factory setting

Variable Capacitance Accelerometer

**ENDEVCO
MODEL
7290A**

Model 7290A

- Rugged
- 2 to 100 g Full Scale
- Overrange Stops
- Gas Damping
- ± 2 V Full Scale Output



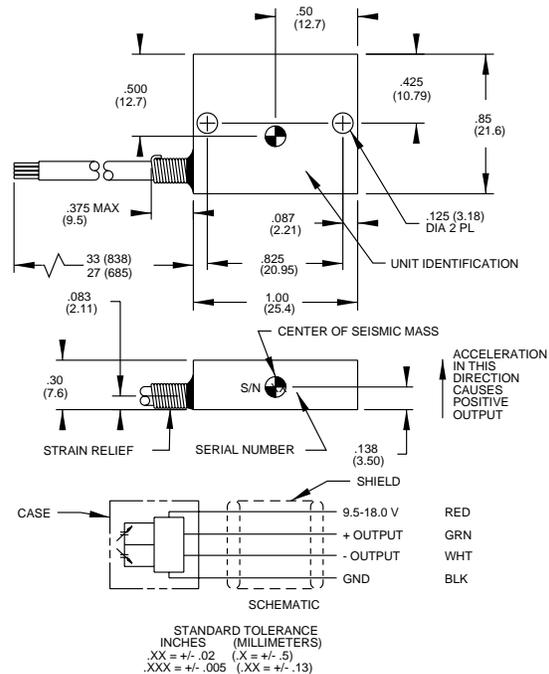
DESCRIPTION

The ENDEVCO® Model 7290A MICROTRON® accelerometer family utilizes unique variable capacitance microsensors. The accelerometers are designed for measurement of relatively low level accelerations in aerospace and automotive environments. Typical applications require measurement of whole body motion immediately after the accelerometer is subjected to a shock motion, and in the presence of severe vibrational inputs.

Gas damping and internal overrange stops enable the anisotropically-etched silicon microsensors to withstand high shock and acceleration loads.

The Model 7290A can operate from 9.5V to 18.0V and provide a high level, low impedance output. The ± 2 volt differential output is dc coupled at a dc bias of approximately 3.6V. Frequency response is controlled by the near-critically damped sensors. The use of gas damping results in very small thermally-induced changes of frequency response.

ENDEVCO Model 136 Three-Channel System, Model 4430A or Model 68207 BCAS™ Computer Controlled System are recommended as signal conditioner and power supply.



U.S. Patents 4,574,327, 4,609,968 and 4,999,735

SPECIFICATIONS

PERFORMANCE CHARACTERISTICS: All values are typical at +75°F (+24°C) and 15 Vdc excitation unless otherwise stated. Calibration data, traceable to the National Institute of Standards, (NIST), is supplied.

	Units	7290A-2	-10	-30	-100
RANGE [1]	g pk	± 2	± 10	± 30	± 100
SENSITIVITY (at 100 Hz) [2] [3]	mV/g	1000 \pm 50	200 \pm 10	66 \pm 4	20 \pm 1.0
FREQUENCY RESPONSE ($\pm 5\%$) [4]	Hz	0 to 35	0 to 500	0 to 800	0 to 1000
MOUNTED RESONANCE FREQUENCY	Hz	1300	3000	5500	5500
NON-LINEARITY AND HYSTERESIS [5]	% FSO Typ	± 0.20	± 0.20	± 0.20	± 1
	% FSO (Max)	± 0.50	± 0.50	± 0.50	± 2
TRANSVERSE SENSITIVITY [6]	% Max	2	2	2	2
ZERO MEASURAND OUTPUT [3]	mV Max	± 50	± 50	± 50	± 50
DAMPING RATIO		4.5	0.7	0.7	0.6
DAMPING RATIO CHANGE	%/°F	+0.04	+0.04	+0.04	+0.04
From -65°F to +250°F (-55°C to +121°C)	%/°C	+0.08	+0.08	+0.08	+0.08

Variable Capacitance Accelerometer

SPECIFICATIONS—continued

PERFORMANCE CHARACTERISTICS—continued

	Units	7290A-2	-10	-30	-100
THERMAL ZERO SHIFT					
From 32°F to 122°F (0°C to 50°C)	% FSO Max	±1.0	±1.0	±1.0	±1.0
From -13°F to +167°F (-25°C to +75°C)	% FSO Max	±2.0	±2.0	±2.0	±2.0
THERMAL SENSITIVITY SHIFT					
From 32°F to 122°F (0°C to +50°C)	% Max	±2.0	±2.0	±2.0	±2.0
From -13°F to +167°F (-25°C to +75°C)	% Max	±3.0	±3.0	±3.0	±3.0
THERMAL TRANSIENT ERROR	Equiv. g/°F	< 0.0006	< 0.0006	< 0.0006	< 0.0006
PER ISA RP 37.2	Equiv. g/°C	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
OVERRANGE (Determined by Electrical clipping or Mechanical stops, whichever is smaller.)					
Electrical clipping	g	-3.5/+3.8	-18/+19	-53/+57	-175/+190
Mechanical stops, typical/minimum	g	±4/±3	±30/±15	±90±45	±170±150
Recovery Time	µs	< 10	< 10	< 10	< 10
THRESHOLD (RESOLUTION) [7]	Equiv. g's	0.0005	0.0025	0.008	0.025
BASE STRAIN SENSITIVITY, MAX [8]	Equiv. g	0.01	0.01	0.01	0.01
MAGNETIC SUSCEPTIBILITY [9]	Equiv. g	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
WARM-UP TIME (to within 1%)	ms	1	1	1	1

ELECTRICAL

EXCITATION [3]	9.5 to 18.0 Vdc, 20 Vdc maximum without damage; excitation voltage can be applied to any lead without damage
CURRENT DRAIN [10]	7.5 mA Typ, 10 mA Max at 15 Vdc
OUTPUT IMPEDANCE/LOAD	500 ohms max/10K ohms resistance minimum, 0.1 µF capacitance maximum
RESIDUAL NOISE	100 µV rms typ, 500 µVrms max; 0.5 to 100 Hz. 500 µV rms typ, 1mV max; 0.5 Hz to 10 KHz

PHYSICAL

CASE, MATERIAL	Anodized aluminum alloy
ELECTRICAL, CONNECTIONS	Integral cable, four conductor No. 32 AWG, Teflon® insulated leads, braided shield, silicone jacket
IDENTIFICATION	Manufacturer's logo, model number and serial number
MOUNTING/TORQUE	Holes for two 4-40 or M3 mounting screws/6 lbf-in (0.7 Nm)
WEIGHT	10 grams (cable weighs 9 grams/meter)

ENVIRONMENTAL

ACCELERATION LIMITS (in any direction)	
Static	20 000 g
Sinusoidal/Random Vibration	100 g pk, 20 - 2000 Hz/40 g rms, 20 - 2000 Hz
Shock (half-sine pulse)	5000 g, 150 µsec or longer for the -2 and -10; 10 000 g, 80 µsec or longer for the -30 and -100
Zero Shift	0.1% FSO typical at 5000 g
TEMPERATURE	
Operating	-65°F to +250°F (-55°C to +121°C)
Storage	-100°F to +300°F (-73°C to +150°C)
HUMIDITY/ALTITUDE	Unaffected. Unit is epoxy sealed. Hybrid and sensor are hermetically sealed/Unaffected
ESD SENSITIVITY	Unit meets Class 3 requirements of MIL-STD-883

CALIBRATION DATA SUPPLIED

SENSITIVITY (at 100 Hz and 10 g pk, 7290A-2 at 1 g)	mV/g with 15 Vdc excitation
FREQUENCY RESPONSE	20 Hz to 2000 Hz for 7290A-2, to 5000 Hz for all other ranges, % deviation reference 100 Hz
ZERO MEASURAND OUTPUT	mV
MAXIMUM TRANSVERSE SENSITIVITY	% of sensitivity

ACCESSORIES

EHW265	(2) SIZE 4, FLAT WASHERS
EH409	(2) 4-40 X 3/8 INCH CAP SCREWS
EHM464	(1) HEX WRENCH

OPTIONAL ACCESSORIES

24328	4 CONDUCTOR SHIELDED CABLE
7990	TRIAxIAL MOUNTING BLOCK

NOTES

- Customized range, 7290A-XX, available on special order. FSO is nominally 4 volts. Combined non-linearity and hysteresis is typically ±1% FSO and ±2% FSO, maximum.
- Reference frequency is 20 Hz on the 2 g range.
- Over the excitation range 9.5 to 18.0 Vdc. Sensitivity changes +0.1%/V typical and zero measurand output changes -0.5 mV/V typical.
- Extended frequency response available on special order to extend to 0-900 Hz for 7290A-10, 0-1500 Hz for 7290A-30, and 0-2000 Hz for 7290A-100.
- Full scale output (FSO) is nominally 4 volts.
- 1% is typical. 1% maximum available on special order.
- THRESHOLD = MAX. RESIDUAL NOISE/0.5 TO 100 Hz SENSITIVITY
- Per ISA 37.2 at 250 Microstrain.
- At 100 Gauss, 60 Hz.
- Current drain increases slightly with increasing excitation; typical change is +.06 mA per volt from 9.5 to 18.0 Vdc.

NOTE: Tighter specifications available on special order.

Continued product improvement necessitates that Endevco reserve the right to modify these specifications without notice. Endevco maintains a program of constant surveillance over all products to ensure a high level of reliability. This program includes attention to reliability factors during product design, the support of stringent Quality Control requirements, and compulsory corrective action procedures. These measures, together with conservative specifications have made the name Endevco synonymous with reliability.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Croney, David e Croney, Paul. *Design and Performance of Road Pavements*.
- [2] Gillespie, T.D., *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, SAE, Warrendalle, 1992.
- [3] Sayers, M.W., Karamihas S.M., *The Little Book of Profiling, The Little Book Of Profile*.
- [4] Rosa, E., Curso de Dinâmica Veicular, Fiat R&V UFSC, 2001.
- [5] McGhee, K.K., *Quality Assurance Of Road Roughness Measurement, Charlottesville, Virginia*, 2000.
- [6] Neto, A.R., Implementação de um Modelo Numérico para Estudos de Conforto Vibracional em Automóveis, PUC Minas, Belo Horizonte, 2000.
- [7] www.umtri.umich.edu/erd/roughness/rr_home.html, 1998.
- [8] Duarte, M.A.V., Introdução à Análise de Sinais, UFU FEMEC, Junho/2002
- [9] Harris, F.J., IEE *Proceedings*, Agosto/1976.
- [10] Dodds, C.J. e Robson, J.D., *The Description Of Road Surface Roughness, University of Glasgow*, março/1973.

- [11] McGhee K.K., *Quality Assurance of Road Roughness Measurement VTRC*,
Maio/2000.
- [12] Corbin, J.C. e Kaufman, W.M., *Classifying Track By Power Spectral Density*,
ASME/1975.
- [13] Clough, R.W. e Penzien, J., *Dynamics Of Structures, Mc Graw Hill /1977*.