

Resumo

Esse trabalho fornece uma descrição detalhada sobre os fenômenos da dinâmica veicular que influenciam no *ride*, desde os modos de massa suspensa até modos com presença de flexibilidade do chassi. Alguns itens desta descrição servem como esclarecimento de alguns aspectos raramente encontrados na literatura. O potencial de representação dos modelos simplificados, com poucos graus de liberdade, foi explorado exaustivamente. O entendimento obtido com esses modelos, em conjunto com os procedimentos atuais de avaliação de conforto, possibilitou a análise das métricas atuais relativas ao *ride* e a definição de novas métricas mais adequadas para esse tipo de avaliação. A teoria apresentada nesse trabalho foi ilustrada através de exemplos reais com medições experimentais e simulações computacionais de veículos de produção da *Ford Motor Company*.

Abstract

Using simplified mathematical models this work presents a detailed description of vehicle characteristics that significantly influence ride evaluation. These simple modes were used in order to describe basic vehicle modes of vibration, such as bounce, pitch and unsprung mass ones. The influence of modes of vibration with frame flexibility was also presented by means of a full vehicle model. These models were used in order to evaluate current ride metrics and to propose new ones. These new metrics seemed to better correlate with subjective evaluation and with the standards used for comfort evaluation. The theory described in this work was illustrated by experimental results of *Ford Motor Company* vehicles.

Lista de Símbolos

CG	centro de gravidade
a	distância longitudinal (eixo x do veículo) entre o eixo dianteiro e o CG da massa suspensa [m]
b	distância longitudinal (eixo x do veículo) entre o eixo traseiro e o CG da massa suspensa [m]
k	raio de giração para o momento de inércia de massa da massa em torno do eixo y para a massa suspensa [m]
Ae	amplitude de excitação senoidal
ω_n	frequência natural não amortecida [Hz]
ω_d	frequência natural amortecida [Hz]
ω	frequência de excitação [Hz]
ω_b	frequência natural do modo com movimento puro vertical (<i>bounce</i>) da massa suspensa [Hz]
ω_p	frequência natural do modo com movimento puro de <i>pitch</i> da massa suspensa [Hz]
ms	valor da massa suspensa [kg]
mu	valor da massa não suspensa [kg]
ma	valor da massa não suspensa dianteira [kg]
mb	valor da massa não suspensa traseira [kg]
me	valor da massa do conjunto motor câmbio ou da cabina no sistema de 3 GL [kg]

I_s	momento de inércia de massa em torno do eixo y para a massa suspensa [kg.m ²]
c_s	coeficiente de amortecimento do elemento amortecedor da suspensão [N.s/m]
c_a	coeficiente de amortecimento do amortecedor da suspensão dianteira [N.s/m]
c_b	coeficiente de amortecimento do amortecedor da suspensão traseira [N.s/m]
c_p	coeficiente de amortecimento do pneu [N.s/m]
c_1	coeficiente de amortecimento dos pneus dianteiros [N.s/m]
c_2	coeficiente de amortecimento dos pneus traseiros [N.s/m]
c_e	coeficiente de amortecimento da suspensão do motor ou da cabina [N.s/m]
k_s	rigidez vertical nominal da mola da suspensão [N/m]
k_a	rigidez vertical da mola dianteira [N/m]
k_b	rigidez vertical da mola traseira [N/m]
k_p	rigidez vertical do pneu [N/m]
k_1	rigidez vertical dos pneus dianteiros [N/m]
k_2	rigidez vertical dos pneus traseiros [N/m]
k_e	rigidez vertical da suspensão do motor ou da cabina [N/m]
Z_p	deslocamento vertical imposto pela pista [m]
$\dot{Z}_p$	velocidade vertical imposta pela pista [m/s]
$\ddot{Z}_p$	aceleração vertical imposta pela pista [m/s ²]
DZ_p	deslocamento vertical imposto pela pista, no domínio da frequência [m]
VZ_p	velocidade vertical imposta pela pista, no domínio da frequência [m/s]
AZ_p	aceleração vertical imposta pela pista, no domínio da frequência [m/s ²]
Z_s	deslocamento vertical da massa suspensa [m]
$\dot{Z}_s$	velocidade vertical da massa suspensa [m/s]

$Z\ddot{s}$	aceleração vertical da massa suspensa [m/s ²]
DZs	deslocamento vertical da massa suspensa, no domínio da frequência [m]
VZs	velocidade vertical da massa suspensa, no domínio da frequência [m/s]
AZs	aceleração vertical da massa suspensa, no domínio da frequência [m/s ²]
Zu	deslocamento vertical da massa não suspensa [m]
$Z\dot{u}$	velocidade vertical da massa não suspensa [m/s]
$Z\ddot{u}$	aceleração vertical da massa não suspensa [m/s ²]
DZu	deslocamento vertical da massa não suspensa, no domínio da frequência [m]
VZu	velocidade vertical da massa não suspensa, no domínio da frequência [m/s]
AZu	aceleração vertical da massa não suspensa, no domínio da frequência [m/s ²]
Ze	deslocamento vertical do motor ou cabina [m]
$Z\dot{e}$	velocidade vertical do motor ou cabina [m/s]
$Z\ddot{e}$	aceleração vertical do motor ou cabina [m/s ²]
DZe	deslocamento vertical do motor ou da cabina, no domínio da frequência [m]
VZe	velocidade vertical do motor ou da cabina, no domínio da frequência [m/s]
AZe	aceleração vertical do motor ou da cabina, no domínio da frequência [m/s ²]
$Z1$	deslocamento vertical imposto pela pista na região do eixo dianteiro [m]
$Z\dot{1}$	velocidade vertical imposta pela pista na região do eixo dianteiro [m/s]
$Z\ddot{1}$	aceleração vertical imposta pela pista na região do eixo dianteiro [m/s ²]
$DZ1$	deslocamento vertical imposto pela pista na região do eixo dianteiro, no domínio da frequência [m]
$VZ1$	velocidade vertical imposta pela pista na região do eixo dianteiro, no domínio da frequência [m/s]
$AZ1$	aceleração vertical imposta pela pista na região do eixo dianteiro, no domínio da frequência [m/s ²]

$Z2$	deslocamento vertical imposto pela pista na região do eixo traseiro [m]
$\dot{Z}2$	velocidade vertical imposta pela pista na região do eixo traseiro [m/s]
$\ddot{Z}2$	aceleração vertical imposta pela pista na região do eixo traseiro [m/s ²]
$DZ2$	deslocamento vertical imposto pela pista na região do eixo traseiro, no domínio da frequência [m]
$VZ2$	velocidade vertical imposta pela pista na região do eixo traseiro, no domínio da frequência [m/s]
$AZ2$	aceleração vertical imposta pela pista na região do eixo traseiro, no domínio da frequência [m/s ²]
θ_s	deslocamento angular da massa suspensa em torno do eixo y [rad]
$\dot{\theta}_s$	velocidade angular da massa suspensa em torno do eixo y [rad/s]
$\ddot{\theta}_s$	aceleração angular da massa suspensa em torno do eixo y [rad/s ²]
$D\theta_s$	deslocamento angular da massa suspensa em torno do eixo y, no domínio da frequência [rad]
$V\theta_s$	velocidade angular da massa suspensa em torno do eixo y, no domínio da frequência [rad/s]
$A\theta_s$	aceleração angular da massa suspensa em torno do eixo y, no domínio da frequência [rad/s ²]
θ_e	deslocamento angular do motor ou da cabina em torno do eixo y [rad]
$\dot{\theta}_e$	velocidade angular do motor ou da cabina em torno do eixo y [rad/s]
$\ddot{\theta}_e$	aceleração angular do motor ou da cabina em torno do eixo y [rad/s ²]
$D\theta_e$	deslocamento angular do motor ou da cabina em torno do eixo y, no domínio da frequência [rad]
$V\theta_e$	velocidade angular do motor ou da cabina em torno do eixo y, no domínio da frequência [rad/s]
$A\theta_e$	aceleração angular do motor ou da cabina em torno do eixo y, no domínio da frequência [rad/s ²]

Afs	ângulo de fase da coordenada Zs no modo de vibrar [°]
Afu	ângulo de fase da coordenada Zu no modo de vibrar [°]
$A_1\theta_\omega$	amplitude da função de transferência com entrada VZ1 e saída $A\theta_e$ [1/s]
$A_2\theta_\omega$	amplitude da função de transferência com entrada VZ2 e saída $A\theta_e$ [1/s]
$F_1\theta_\omega$	ângulo de fase da função de transferência com entrada VZ1 e saída $A\theta_e$ [°]
$F_2\theta_\omega$	ângulo de fase da função de transferência com entrada VZ2 e saída $A\theta_e$ [°]
GL	grau de liberdade
ξ	fator de amortecimento [%]
A	matriz de estado
M	matriz de massa
K	matriz de rigidez
Fu	amplitude da força de desbalanceamento dos conjuntos de rodas e pneus [N]
$F_{u_{pond}}$	amplitude da força de desbalanceamento dos conjuntos de rodas e pneus ponderada pela frequência de rotação das rodas ao quadrado [N]
MS	média quadrada de um sinal
RMS	raiz quadrada da média quadrada
PSD	distribuição da média quadrada na frequência (<i>power spectral density</i>)
Zpe	amplitude de excentricidade dos conjuntos de rodas e pneus
t	tempo [s]
mb	valor da massa desbalanceada [kg]
rb	raio de atuação da massa desbalanceada [m]
S	operador de Laplace
k_{susp}	rigidez vertical da suspensão [N/m]
m_{eq}	massa equivalente suportada por uma suspensão [kg]

f_{eq}	valor de frequência natural de um sistema massa mola de um grau de liberdade com massa m_{eq} e rigidez k_{susp} [Hz]
r	razão entre frequências básicas traseira e dianteira
Z_a	deslocamento vertical da massa não suspensa dianteira [m]
Z_b	deslocamento vertical da massa não suspensa traseira [m]
WB	entre eixos do veículo [m]
V_1	velocidade longitudinal do veículo [m/s]
ϕ_a	frequência espacial [ciclos/m]
N	número inteiro

Lista de Figuras

Número	Nome	Página
1.1	O sistema <i>ride</i>	1
3.1	Modelo de 1 GL representando a massa suspensa e o elemento de rigidez da suspensão	43
3.2	Passagem do conjunto massa mola por um obstáculo	44
3.3	Passagem do conjunto massa mola por um obstáculo	45
3.4	Passagem do conjunto massa mola por um obstáculo	46
3.5	Influência da frequência natural do sistema	46
3.6	Influência da frequência natural do sistema	47
3.7	Esforços na mola para obstáculo de curta duração nas condições vazio e carregado	48
3.8	Aceleração da massa suspensa para obstáculo de curta duração nas condições vazio e carregado	48
3.9	Deslocamento vertical da massa suspensa para um obstáculo de duração próxima ao período natural do sistema	49
3.10	Diferenças entre sinal da pista e sinal de resposta da massa suspensa para obstáculo de longa e de curta duração	49
3.11	Oscilação da massa suspensa de um sistema de 1 GL sem amortecimento para excitações de curta e longa duração	50
3.12	Resposta da massa suspensa nas condições com e sem os amortecedores	51
3.13	Modelo 1 GL representando a massa suspensa e os elementos de rigidez e amortecimento da suspensão	52
3.14	Comparativo entre os esforços na mola e no amortecedor durante uma excitação transiente de curta duração	52
3.15	Comparativo entre a resposta de aceleração vertical da massa suspensa nas condições com e sem o amortecedor, durante uma excitação transiente de curta duração	52
3.16	Valores de velocidade relativa entre as extremidades do amortecedor para obstáculos de curta e de longa duração	53
3.17	Gráfico de força por velocidade de um amortecedor	53

3.18	Valores de aceleração vertical da massa suspensa para amortecedores linear e não linear, durante a passagem por um obstáculo de curta duração	54
3.19	Valores de aceleração vertical da massa suspensa para amortecedores linear e não linear, durante a passagem por um obstáculo de longa duração	55
3.20	Valores quadráticos da magnitude da função de transferência $AZ_s/VZ_p(S)$ para vários valores de frequência natural	57
3.21	Valores quadráticos da magnitude da função de transferência $AZ_s/VZ_p(S)$ para vários valores de fator de amortecimento	58
3.22	Valores quadráticos da magnitude da função de transferência $AZ_s/VZ_p(S)$ para vários valores de fator de amortecimento	58
3.23	Valores quadráticos da magnitude da função de transferência $AZ_s/VZ_p(S)$ com e sem a participação dos amortecedores	59
3.24	Modelo de 2 GL com massas suspensa e não suspensa	60
3.25	Obstáculo utilizado para excitação do modelo de 2 GL	61
3.26	Valores de aceleração da massa suspensa para modelos de 1 e 2 GL durante a passagem por a diferentes velocidades	62
3.27	Valores quadráticos da magnitude da função de transferência $AZ_s/VZ_p(S)$	63
3.28	Magnitude da função de transferência $AZ_s/AZ_p(S)$	64
3.29	Valores quadráticos da magnitude da função de transferência $AZ_s/VZ_p(S)$ para diversos fatores de amortecimento do modo de vibrar com movimento predominante de massa suspensa	64
3.30	Valores quadráticos da magnitude da função de transferência $AZ_s/VZ_p(S)$ para diversos fatores de amortecimento do modo de vibrar com movimento predominante de massa suspensa	65
3.31	Valores de frequência do modo de vibrar com movimento predominante da massa suspensa em função do coeficiente de amortecimento ζ_s	67
3.32	Componentes do modo de vibrar com movimento predominante de massa suspensa em função do coeficiente de amortecimento ζ_s	68
3.33	Fator de amortecimento do modo de vibrar de massa suspensa em função do coeficiente de amortecimento ζ_s	68
3.34	Valores de frequência do modo de vibrar com movimento predominante da massa não suspensa em função do coeficiente de amortecimento ζ_s	69

3.35	Componentes do modo de vibrar com movimento predominante de massa não suspensa em função do coeficiente de amortecimento cs	69
3.36	Fator de amortecimento do modo de vibrar de massa não suspensa em função do coeficiente de amortecimento cs	70
3.37	Valores quadráticos da magnitude da função de transferência $AZ_s / VZ_p(S)$ e valores RMS de $Z\ddot{s}$	70
3.38	Valores RMS de $Z\ddot{s}$ em função do coeficiente de amortecimento cs e do valor da frequência natural do modo de vibrar de massa suspensa	71
3.39	Valores de frequência natural amortecida e não amortecida para o modo de vibrar de massa não suspensa em função da rigidez vertical dos pneus kp	72
3.40	Participação da massa suspensa no modo de vibrar do eixo em função da rigidez vertical dos pneus kp	73
3.41	Valores do fator de amortecimento do modo de vibrar de massa não suspensa em função da rigidez vertical dos pneus kp	73
3.42	Valores de frequência natural amortecida e não amortecida para o modo de vibrar de massa suspensa em função da rigidez vertical dos pneus kp	74
3.43	Participação da massa não suspensa no modo de vibrar de massa suspensa em função da rigidez vertical dos pneus kp	74
3.44	Fator de amortecimento do modo de vibrar de massa suspensa em função da rigidez vertical dos pneus kp	75
3.45	Valores RMS de $Z\ddot{s}$ em função do coeficiente de amortecimento cs	76
3.46	Aceleração da massa suspensa em função da rigidez vertical dos pneus, durante a passagem por excitação transiente	77
3.47	Aceleração da massa suspensa em função da rigidez vertical dos pneus, durante a passagem por excitação transiente	78
3.48	Influência da rigidez efetiva dos feixes de molas na resposta de aceleração da massa suspensa	80
3.49	Valores de magnitude da função de transferência $(DZ_u - DZ_p) / Z_p$	82
3.50	Valores de magnitude da função de transferência (DZ_u / Z_p)	82
3.51	Valores de magnitude da função de transferência $(DZ_u - DZ_p) / VZ_p$	83
3.52	Valores quadráticos de magnitude da função de transferência $(DZ_u - DZ_p) / VZ_p$	84

3.53	Valores quadráticos de magnitude da função de transferência $(DZ_u - DZ_p)/VZ_p$	84
3.54	Valores quadráticos da magnitude da função de transferência $kp \cdot (DZ_u - DZ_p)/VZ_p$	85
3.55	Deformação dos pneus durante a passagem por uma excitação transiente	86
3.56	Força de contato entre pneu e pavimento durante a passagem por uma excitação transiente	87
3.57	Valores quadráticos da magnitude da função de transferência $kp \cdot (DZ_u - DZ_p)/VZ_p$ para diversos valores de $\mathbf{cs}$	88
3.58	Valores RMS de $kp \cdot (Z_u - Z_p)$	89
3.59	Valores RMS de $kp \cdot (Z_u - Z_p)$ calculados entre 5 e 20 Hz	90
3.60	Valores quadráticos da magnitude da função de transferência $kp \cdot (DZ_u - DZ_p)/VZ_p$	91
3.61	Valores quadráticos da magnitude da função de transferência $kp \cdot (DZ_u - DZ_p)/VZ_p$	93
3.62	Valores quadráticos da magnitude da função de transferência $kp \cdot (DZ_u - DZ_p)/VZ_p$ e valores RMS de $kp \cdot (Z_u - Z_p)$ para diversos valores de $\mathbf{cs}$	93
3.63	Valores de força de contato durante a passagem por excitação transiente	94
3.64	Modelo de 2 GL com a representação das fontes de excitação de desbalanceamento e excentricidade dos conjuntos de rodas e pneus	95
3.65	Magnitude da função de transferência $(ms \cdot AZ_s)/Fu$	95
3.66	Magnitude da função de transferência AZ_s/Fu_{pond} (ponderada)	96
3.67	Magnitude da função de transferência DZ_s/Fu_{pond} (ponderada)	97
3.68	Valores de magnitude das funções de transferência AZ_s/Fu_{pond} e DZ_s/Fu_{pond} (ponderadas)	98
3.69	Deslocamento vertical da massa suspensa no tempo, variando-se a frequência de excitação	99
3.70	Valores de magnitude das funções de transferência AZ_s/Fu_{pond} e DZ_s/Fu_{pond} (ponderadas)	99
3.71	Magnitude da função de transferência AZ_s/Fu_p (ponderada)	100
3.72	Valores de magnitude das funções de transferência AZ_s/Fu_{pond} e DZ_s/Fu_{pond} (ponderadas)	100

3.73	Modelo de 2 GL representando os movimentos de <i>bounce</i> e <i>pitch</i> da massa suspensa	101
3.74	Valores da frequências dos modos de vibrar de <i>bounce</i> e <i>pitch</i> em função do índice dinâmico	104
3.75	Centros de oscilação dos modos de vibrar de <i>bounce</i> e <i>pitch</i> em função do índice dinâmico	105
3.76	Razão entre as frequências reais e as frequências básicas em função do índice dinâmico	106
3.77	Centros de oscilação dos modos de vibrar de <i>bounce</i> e <i>pitch</i> em função do índice dinâmico	107
3.78	Valores da frequências reais dos modos de vibrar de <i>bounce</i> e <i>pitch</i> em função da frequência básica traseira ($k^2/(a \cdot b) = 0.68$)	108
3.79	Valores da frequências reais dos modos de vibrar de <i>bounce</i> e <i>pitch</i> em função da frequência básica traseira ($k^2/(a \cdot b) = 0.97$)	109
3.80	Razão entre as frequências de <i>pitch</i> e <i>bounce</i> para índice dinâmico de 0.68	110
3.81	Centros de oscilação dos modos de vibrar de <i>bounce</i> e <i>pitch</i> para índice dinâmico de 0.68 variando-se a razão r	110
3.82	Centros de oscilação dos modos de vibrar de <i>bounce</i> e <i>pitch</i> para índice dinâmico de 0.97 variando-se a razão r	111
3.83	Modelo de 4 GL: <i>bounce</i> e <i>pitch</i> da massa suspensa e vertical dos eixos	112
3.84	Excitação da pista para o modelo plano de veículo	113
3.85	Amplitude ao quadrado da "função de transferência" " $A\theta_s/(VZ1eVZ2)$ "	115
3.86	Amplitude ao quadrado da "função de transferência" " $AZ_s/(VZ1eVZ2)$ "	116
3.87	Amplitude ao quadrado da "função de transferência" " $AZ_s/(VZ1eVZ2)$ " para vários valores de velocidade do veículo entre 10 e 25 m/s	116
3.88	Amplitude ao quadrado de AZ_s ao longo do entre eixos	118
3.89	Amplitude ao quadrado de AZ_s ao longo do entre eixos	118
3.90	Valores RMS de $Z\ddot{s}$ ao longo do eixo longitudinal do veículo	119
3.91	Valores RMS de $Z\ddot{s}$ ao longo do eixo longitudinal do veículo para diferentes razões de frequências básicas	120
3.92	Valores de magnitude das funções de transferência $D\theta_s/VZp$ e $A\theta_s/VZp$ para valores da razão r entre 0.8 e 1.2	121

3.93	Valores de magnitude das funções de transferência AZ_s/VZ_p e para valores da razão r entre 0.8 e 1.2	122
3.94	Valores de magnitude da função de transferência AZ_s/VZ_p	122
3.95	Valores de magnitude da função de transferência $A\theta_s/VZ_p$ para diversos valores da razão r	123
3.96	Máximos das magnitudes de $A\theta_s/VZ_p$ em função dos valores de r , para velocidades de 10, 20 e 30 m/s	123
3.97	Valores RMS de $\dot{\theta}_s$ em função de r para as velocidades de 10, 20 e 30 m/s	124
3.98	Valores RMS de $\dot{Z}_s$ em função de r para as velocidades de 10, 20 e 30 m/s	125
3.99	Ângulo de rolamento em função da aceleração lateral	128
3.100	Variação do ângulo de rolamento em função do valor de rigidez da barra estabilizadora	129
3.101	Valores RMS de aceleração lateral na altura da cabeça do motorista	129
3.102	Valores quadráticos da magnitude da função de transferência de aceleração lateral na altura da cabeça do motorista para diversos valores de rigidez da barra estabilizadora	130
3.103	Valores RMS de aceleração lateral na altura da cabeça do motorista calculados entre 0.5 e 4.0 Hz	131
3.104	Frequência natural e fator de amortecimento do modo de vibrar de roll da massa suspensa em função da rigidez vertical da barra estabilizadora	131
3.105	Configuração dos amortecedores (vista traseira do veículo)	133
3.106	Variação lateral na região de contato em função da excitação vertical do lado oposto	134
4.1	Modelo computacional da suspensão traseira da <i>pickup</i>	141
4.2	Modelo computacional da suspensão dianteira da <i>pickup</i>	141
4.3	Modelo computacional da cabina sobre seus coxins	142
4.4	Modelo computacional do conjunto motor câmbio sobre seus coxins	142
4.5	Modelo computacional do chassi flexível no ADAMS	143
4.6	Modelo computacional do veículo no ADAMS	143
4.7	Modelo computacional ADAMS do conjunto cavalo carreta	144
4.8	Localização dos canais de medição ao longo do chassi e da cabina	146

4.9	Localização dos canais de medição no cavalo	146
4.10	Aceleração vertical na região dianteira do chassi	147
4.11	Aceleração vertical na região traseira do chassi	149
4.12	Aceleração vertical na região traseira do chassi com amortecedores	151
4.13	Aceleração vertical na região traseira do chassi sem amortecedores	151
4.14	PSD da aceleração vertical na região traseira do chassi com amortecedores	152
4.15	PSD da aceleração vertical na região traseira do chassi sem amortecedores	152
4.16	Rampas utilizadas para representar excitações singulares de asfalto	154
4.17	FFT e PSD do sinal de excitação de deslocamento imposto pelas rampas	154
4.18	Valores de aceleração vertical na região dianteira do chassi durante a passagem pelas rampas em fase	154
4.19	Veículo com amortecedores trafegando sobre trecho irregular	156
4.20	Veículo sem amortecedores trafegando sobre trecho irregular	157
4.21	Veículo trafegando sobre trecho de terra com amortecedores	157
4.22	Veículo trafegando sobre trecho de terra sem amortecedores	158
4.23	Amplitudes de aceleração para o modo de vibrar de massa suspensa traseira (<i>pitch</i>)	158
4.24	Centro de oscilação do modo de vibrar de <i>pitch</i>	160
4.25	Modo de vibrar de <i>pitch</i> da massa suspensa	161
4.26	Centro de oscilação do modo de vibrar de <i>bounce</i>	161
4.27	Modo de vibrar de <i>bounce</i> da massa suspensa	161
4.28	Valores de aceleração vertical no ponto HC e respectiva PSD para configuração 01 de suspensão primária	163
4.29	Valores de aceleração vertical no ponto HC e respectiva PSD para configuração 02 de suspensão primária	163
4.30	PSDs de aceleração vertical no ponto HC para as duas configurações de suspensão primária a 90 km/h	164
4.31	Valores de aceleração vertical nas regiões dianteira e traseira do chassi	165

4.32	Valores de aceleração vertical nas regiões dianteira e traseira do chassi com a aplicação de um filtro passa baixa	166
4.33	Medições realizadas na região dianteira do veículo	167
4.34	Medições realizadas na região traseira do veículo	168
4.35	Modo de vibrar com movimento de " <i>pitch</i> " do cavalo durante o travamento dos feixes traseiros (2.95 Hz)	168
4.36	Modo de vibrar com movimento de " <i>pitch</i> " do cavalo para a condição sem carreta e com travamento dos feixes traseiros (6.0 Hz)	168
4.37	Valores de aceleração vertical na primeira travessa do cavalo e na região da quinta-rodã durante a passagem por pista de boa qualidade, na condição sem carreta	169
4.38	PSD do sinal de aceleração longitudinal no teto da cabina	169
4.39	PSD do sinal de aceleração vertical na altura da cabeça do motorista para passagem a 50 km/h por uma pista de boa qualidade	171
4.40	PSD do sinal de aceleração vertical na altura da cabeça do motorista para passagem a 60 km/h por uma pista de boa qualidade	172
4.41	PSD do sinal de aceleração vertical na altura da cabeça do motorista para passagem a 70 km/h por uma pista de boa qualidade	172
4.42	PSD do sinal de aceleração longitudinal no ponto HC para passagem a 40 km/h por uma pista de boa qualidade	173
4.43	PSD do sinal de aceleração longitudinal no ponto HC para passagem a 50 km/h por uma pista de boa qualidade	174
4.44	PSD do sinal de aceleração longitudinal no ponto HC para passagem a 60 km/h por uma pista de boa qualidade	174
4.45	PSDs dos sinais de aceleração vertical ao longo do chassi	175
4.46	PSDs dos sinais de aceleração vertical ao longo do chassi	175
4.47	PSDs dos sinais de aceleração vertical ao longo do chassi	176
4.48	Redução do diâmetro da barra estabilizadora	177
4.49	Aceleração lateral no ponto HC durante a passagem por uma lombada apenas no lado esquerdo a 25 km/h	177
4.50	Aceleração lateral no ponto HC durante a passagem por uma lombada apenas no lado esquerdo a 25 km/h	178
4.51	Passagem do lado esquerdo do veículo por uma lombada, com as barras estabilizadoras dianteira e traseira	178

4.52	Passagem do lado esquerdo do veículo por uma lombada, sem as barras estabilizadoras dianteira e traseira	179
4.53	Passagem por pista de média qualidade a 30 km/h com as barras estabilizadoras	180
4.54	Passagem por pista de média qualidade a 30 km/h sem as barras estabilizadoras	180
4.55	Valores de aceleração vertical no local de medição da bandeja inferior direita (suspensão dianteira) durante varredura em frequência em fase	181
4.56	Valores de aceleração vertical nas bandejas inferiores esquerda e direita (suspensão dianteira) durante varredura em frequência em fase	181
4.57	Valores de aceleração vertical no local de medição da bandeja inferior direita (suspensão dianteira) durante varredura em frequência fora de fase	182
4.58	Valores de aceleração vertical nas bandejas inferiores esquerda e direita (suspensão dianteira) durante varredura em frequência fora de fase	182
4.59	Valores de aceleração vertical nos lados esquerdo e direito do eixo traseiro durante a passagem pelas rampinhas na condição sem amortecedores	183
4.60	Valores de aceleração vertical no lado direito do eixo traseiro durante a varredura em frequência fora de fase	184
4.61	Valores de aceleração vertical nos lados esquerdo e direito do eixo traseiro durante a varredura em frequência fora de fase	184
4.62	Aceleração em trecho com pedregulhos com amortecedores	185
4.63	Aceleração em trecho com pedregulhos sem amortecedores	185
4.64	Valores de aceleração vertical nos lados esquerdo e direito do eixo traseiro	186
4.65	Valores de aceleração lateral no eixo traseiro e no chassi	187
4.66	Modo de vibrar com flexão vertical do chassi em conjunto com movimento vertical da traseira da cabina em oposição de fase (8.1 Hz 5 %)	188
4.67	Passagem por rodovia irregular a 90 km/h	189
4.68	Passagem por rodovia irregular a 90 km/h	190
4.69	Passagem por emendas de rodovia a 110 km/h	190
4.70	Passagem por emendas de rodovia a 110 km/h	191
4.71	Passagem por emendas de rodovia a 110 km/h	191

4.72	Medições do fenômenos de <i>aftershake</i> durante passagem por "rampinhas"	192
4.73	Medições do fenômeno de aftershake durante passagem por "rampinhas"	193
4.74	Passagem sobre as rampinhas com pneus de diferentes valores de rigidez vertical	194
6.1	Modelo de 3 GL representando os movimentos verticais de massa suspensa, não suspensa e do motor	199
6.2	Amplitude ao quadrado da função de transferência AZ_s/VZ_p para os modelos de 2 e de 3 GL	200
6.3	Amplitude ao quadrado de AZ_s/VZ_p para vários valores de frequência básica do conjunto motor câmbio sobre seus coxins	201
6.4	Amplitude ao quadrado da função de transferência AZ_e/VZ_p para os modelos de 2 e de 3 GL	201
6.5	Amplitude ao quadrado de AZ_e/VZ_p para vários valores de frequência básica do conjunto motor câmbio sobre seus coxins	202
6.6	Modelo de 4 GL representando os movimentos verticais e de <i>pitch</i> do chassi e da cabina	204
A1	PSD de velocidade do perfil de pista para velocidade V_A do veículo	213
A2	Representação do obstáculo utilizado no item 3.2.1 para excitação dos modelos de 1 GL	217
A3	Representação do obstáculo utilizado no item 3.2.2 para excitação dos modelos de 1 GL	217
A4	Modelo de 2 GL para movimentos de <i>bounce</i> e <i>pitch</i> da massa suspensa	218

Lista de Tabelas

Número	Nome	Página
2.1	Valores de frequência para os modos de vibrar de massa suspensa de um ônibus com a utilização de suspensões com elementos de borracha	23
3.1	Valores de força em função da velocidade	53
3.2	Descrição dos modos de vibrar do modelo de 2 GL	65
3.3	Resumo da influência da rigidez vertical do pneu nos modos de vibrar de massa suspensa e não suspensa	76
3.4	Propriedades do modo de vibrar de massa suspensa	85
3.5	Propriedades do modo de vibrar de massa não suspensa	86
3.6	Propriedades dos modos de vibrar	92
3.7	Propriedades do modo de vibrar de massa não suspensa	97
3.8	Valores de frequência de redução de θ	115
3.9	Valores de frequência de redução de $Z\ddot{s}$	115
3.10	Descrição dos modos de vibrar de massa suspensa com a inversão dos valores de frequência básica entre dianteira e traseira	120
3.11	Informações sobre os dois principais modos de vibrar da massa não suspensa	132
3.12	Ensaio das configurações de amortecedores do eixo rígido	133
4.1	Descrição dos canais de medição da <i>pickup</i>	145
4.2	Descrição dos canais de medição do conjunto cavalo carreta	146
4.3	Fator de amortecimento para o modo de vibrar de <i>bounce</i> em função da amplitude de oscilação (veículo sem os amortecedores)	148
4.4	Fator de amortecimento para o modo de vibrar de <i>pitch</i> em função da amplitude de oscilação (veículo sem os amortecedores)	149
4.5	Frequências básicas de massa suspensa para as regiões dianteira e traseira	159
4.6	Descrição das alterações obtidas nos modos de vibrar de massa suspensa	162

4.7	Valores de frequência para os quais ocorre redução da amplitude do sinal de aceleração vertical na região central do veículo	170
4.8	Valores de frequência para os quais ocorre redução da amplitude da resposta do veículo em <i>pitch</i>	173

Índice

1. Introdução	1
1.1 Introdução ao <i>ride</i>	1
1.2 Resumo das contribuições desse trabalho	2
1.3 Descrição do conteúdo	3
2. Revisão bibliográfica	5
2.1 Introdução	5
2.2 Trabalhos entre 1901 e 1920	5
2.3 Trabalhos entre 1921 e 1930	8
2.4 Trabalhos entre 1931 e 1940	12
2.5 Trabalhos entre 1941 e 1960	16
2.6 Trabalhos entre 1961 e 1980	31
2.7 Trabalhos posteriores a 1980	34
2.8 Conclusões	40
3. Teoria sobre a dinâmica veicular relativa ao ride e métricas para sua avaliação	42
3.1 Introdução	42
3.2 Massa suspensa	42

3.2.1	Função da mola no ride	43
3.2.2	Função do amortecedor no ride	50
3.2.3	Resposta na frequência	55
3.3	Massa não suspensa	59
3.3.1	Função do pneu no ride	60
3.3.2	Resposta na frequência	62
3.3.3	Modos de vibrar	65
3.3.4	Influência do coeficiente de amortecimento, c_s	66
3.3.5	Influência da rigidez vertical do pneu, k_p	72
3.3.6	Feixes de molas	78
3.3.7	Contato pneu pavimento	80
3.3.8	Desbalanceamento dos conjuntos de rodas e pneus	94
3.4	Modos de bounce e pitch da massa suspensa	101
3.4.1	Índice dinâmico ($k^2/(a.b)$)	103
3.4.2	Influência do entre eixos	112
3.4.3	Relação entre frequências traseira e dianteira	119
3.5	Suspensão independente	125
3.6	Roll da massa suspensa	126
3.6.1	Barra estabilizadora	127
3.6.2	Rigidez ao rolamento	127

3.7	Roll da massa não suspensa	132
3.7.1	Modo de <i>tramp</i>	132
3.7.2	<i>Side thrust</i>	133
3.8	Flexibilidade do quadro	134
3.9	Conclusões	135
4.	Estudo de casos relativos ao ride de veículos	137
4.1	Introdução	137
4.2	Avaliações subjetivas realizadas com os veículos	139
4.3	Descrição dos modelos computacionais	140
4.4	Descrição das medições	144
4.5	Modos de massa suspensa e elementos de dissipação de energia	147
4.6	Contribuição dos amortecedores	150
4.6.1	Pista de boa qualidade	151
4.6.2	Excitação transiente	153
4.6.3	Pista de cascalhos	155
4.6.4	Pista de terra	157
4.7	Parcela de massa não suspensa no modo de massa suspensa	158
4.8	Modos de <i>bounce</i> e <i>pitch</i>	159
4.8.1	Centros de oscilação	159
4.8.2	Relação de frequências e fatores de amortecimento	161

4.9	<i>Boulevard jerk</i>	164
4.10	Filtro de entre eixos	170
4.11	Influência da barra estabilizadora	176
4.12	Modos de massa não suspensa	180
4.13	Contato pneu pavimento	184
4.14	<i>Side thrust</i>	186
4.15	Flexibilidade do chassi	187
4.16	<i>Aftershake</i>	187
4.17	Conclusões	194
5.	Conclusões	196
5.1	Conclusões principais	196
5.2	Comentários pessoais	197
6.	Propostas de trabalhos futuros	198
6.1	Influência do conjunto motor câmbio sobre seus coxins	198
6.2	Outras avaliações	202
7.	Referências bibliográficas	206
8.	Apêndice	213
A.1	Excitação de pista	213

A.2	Descrição dos obstáculos	216
A.3	Índice dinâmico igual à unidade ($k^2/(a \cdot b) = 1$)	217
A.4	Parâmetros dos modelos do capítulo 3	220