



Fundamentos de Dinâmica Veicular

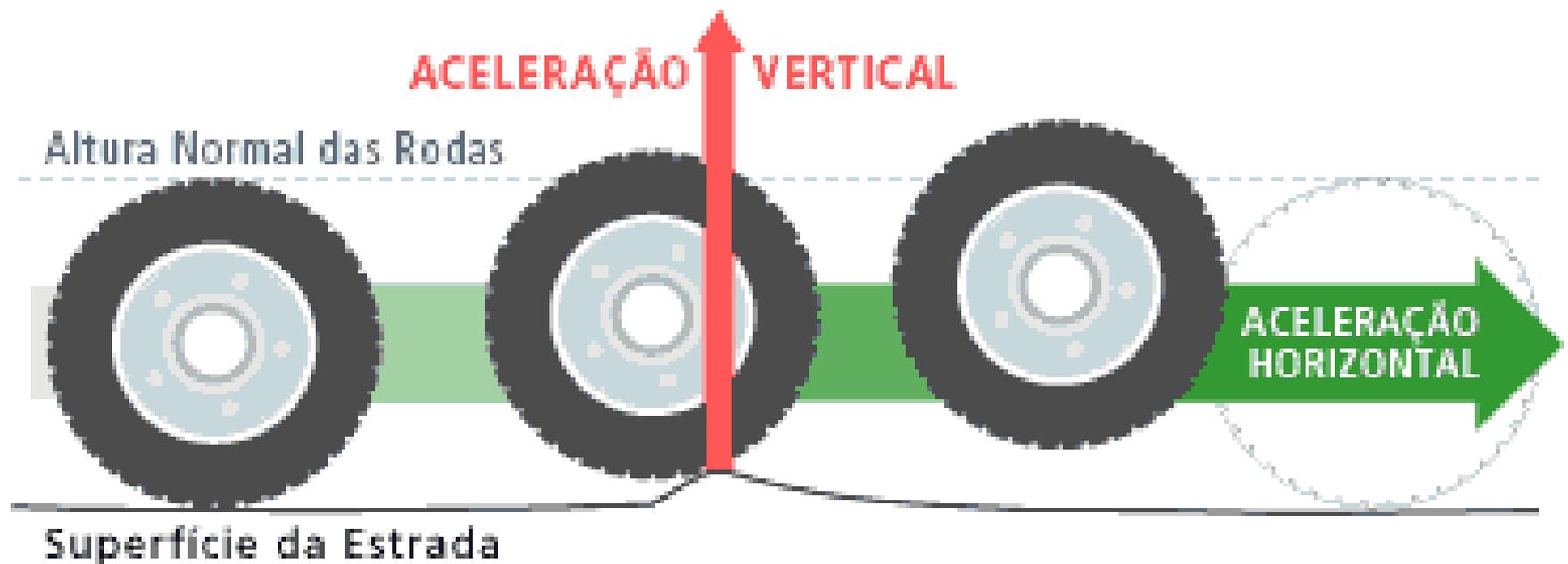
Dinâmica Vertical (*Ride*)





COMO FUNCIONAM AS SUSPENSÕES DOS CARROS

ACELERAÇÃO VERTICAL/HORIZONTAL



Mola



$$F = K \cdot \Delta x$$

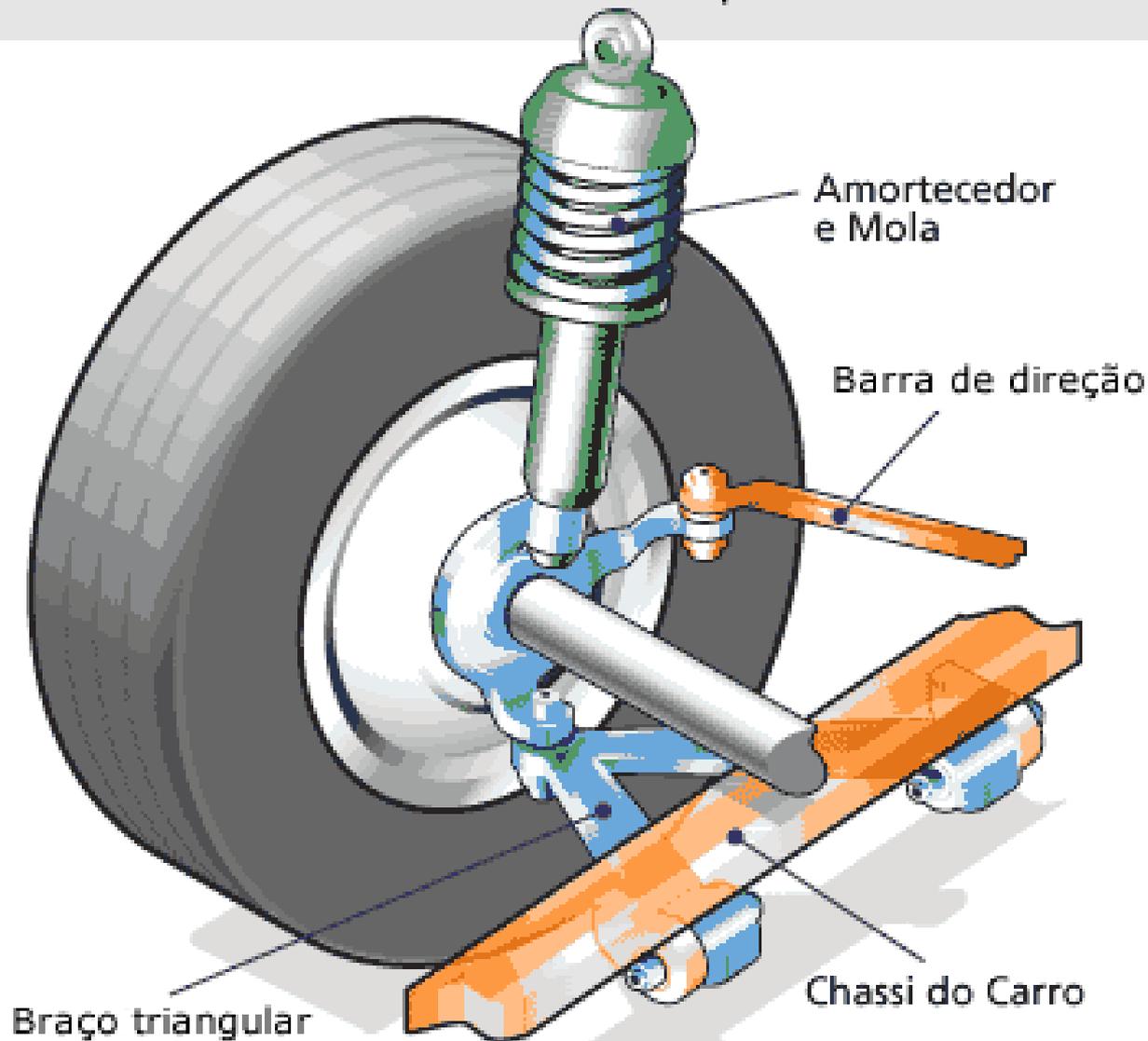
$$K = \frac{G \cdot d^4}{N_a \cdot 8 \cdot D^3}$$

Amortecedor



$$F = C \cdot \dot{x}$$

Desenho básico da
suspensão MacPherson





Nesta aula

- Fontes de excitação
- Propriedades da resposta do veículo
 - Isolamento
 - Rigidez e
 - Amortecimento
- Palestra: "Escolha do amortecedor"

Sala de Videoconferência

Nesta aula

- **Fontes de excitação**
- Propriedades da resposta do veículo
 - Isolamento
 - Rigidez e
 - Amortecimento

Fontes de excitação

1. Rugosidade da pista
2. Montagem pneu/roda
3. Excitação na transmissão
4. Motor

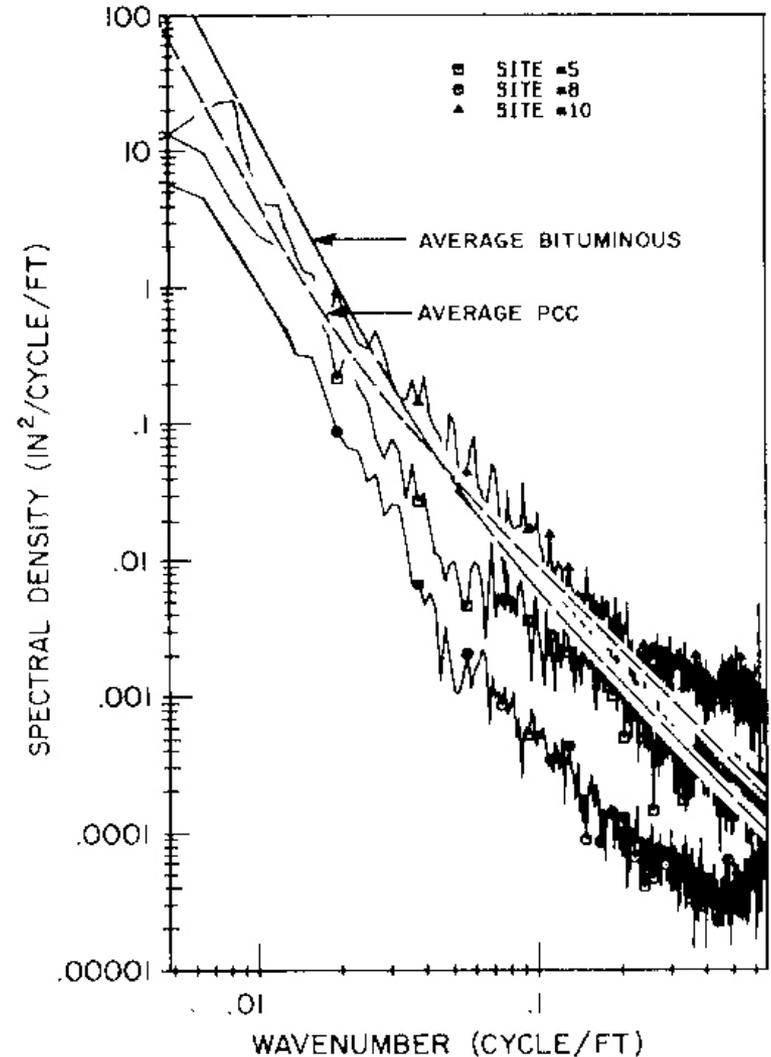
Afetam o conforto e/ou o desempenho

Fontes de excitação

1. **Rugosidade da pista**
2. Montagem pneu/roda
3. Excitação na transmissão
4. Motor

1. Rugosidade da Pista

Densidade espectral típica de perfis de elevação da pista.



Fontes de excitação

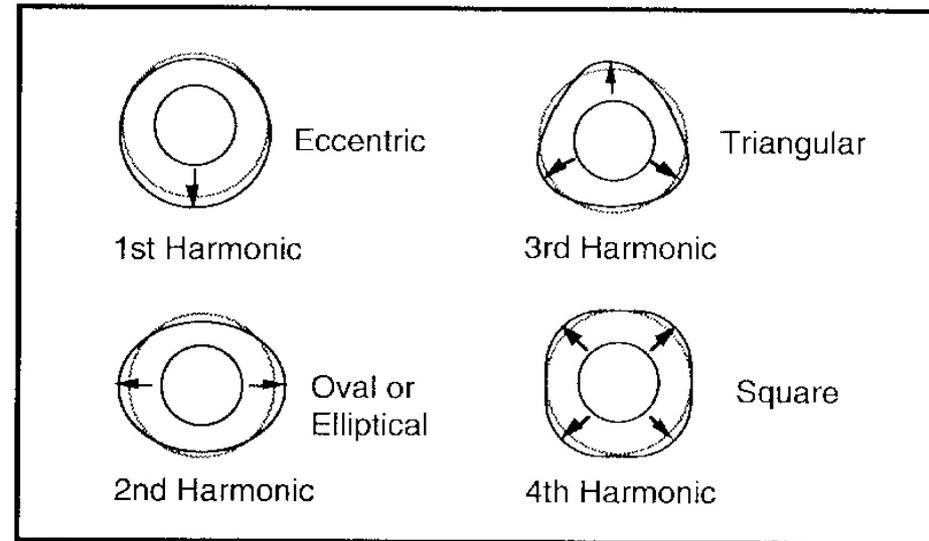
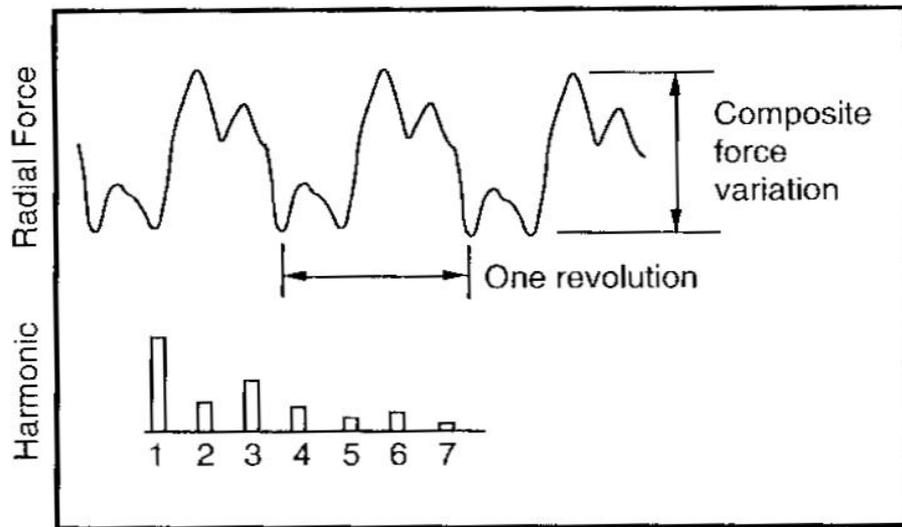
1. Rugosidade da pista
2. **Montagem pneu/roda**
3. Excitação na transmissão
4. Motor

2. Montagem pneu e roda

- a) Desbalanceamento de massa
- b) Variações dimensionais
- c) Variações na rigidez

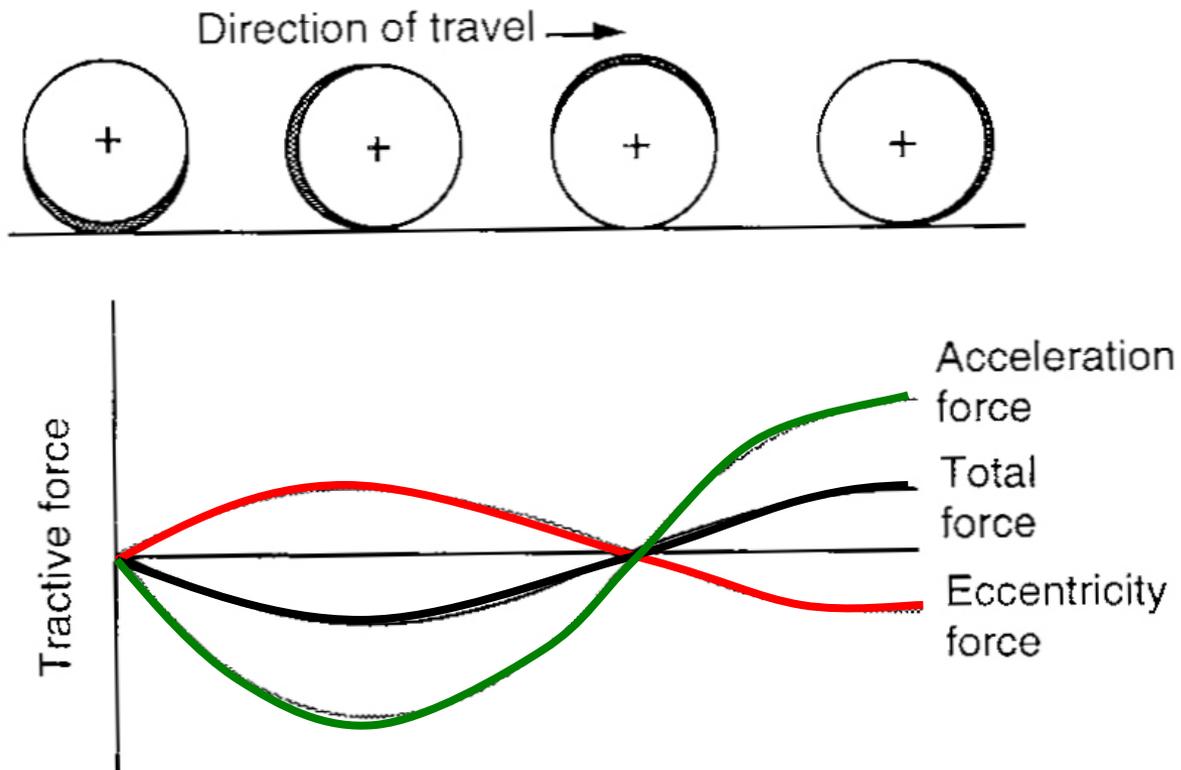
2. Montagem pneu e roda

Desbalanceamento de massa



Variação da força radial Equivalência com defeitos

2. Montagem pneu e roda



Variação da força trativa devido à excentricidade da roda.

Fontes de excitação

1. Rugosidade da pista
2. Montagem pneu/roda
3. **Excitação na transmissão**
4. Motor

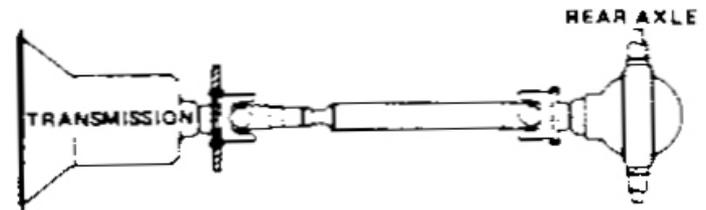
3. Excitação na transmissão

Transmissão da caixa para o diferencial

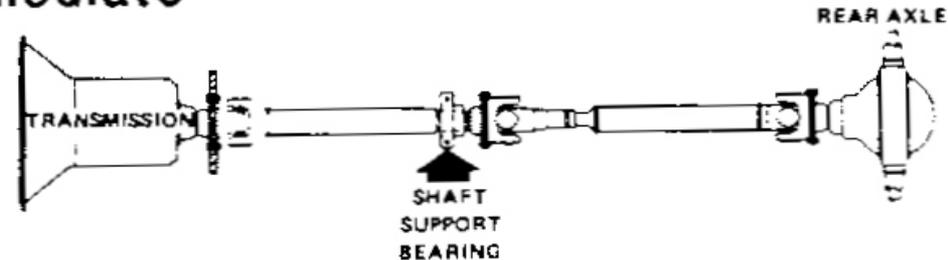
- Assimetria das peças rotativas
- Excentricidade dos mancais
- Retilidade
- Folgas
- Deflexões

WHEELBASE

Short

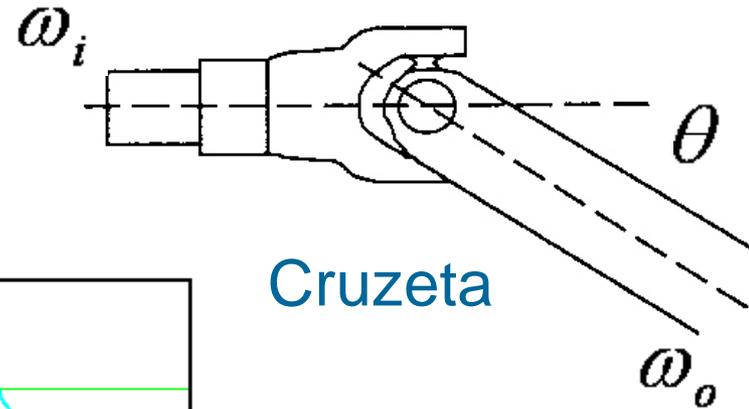


Intermediate

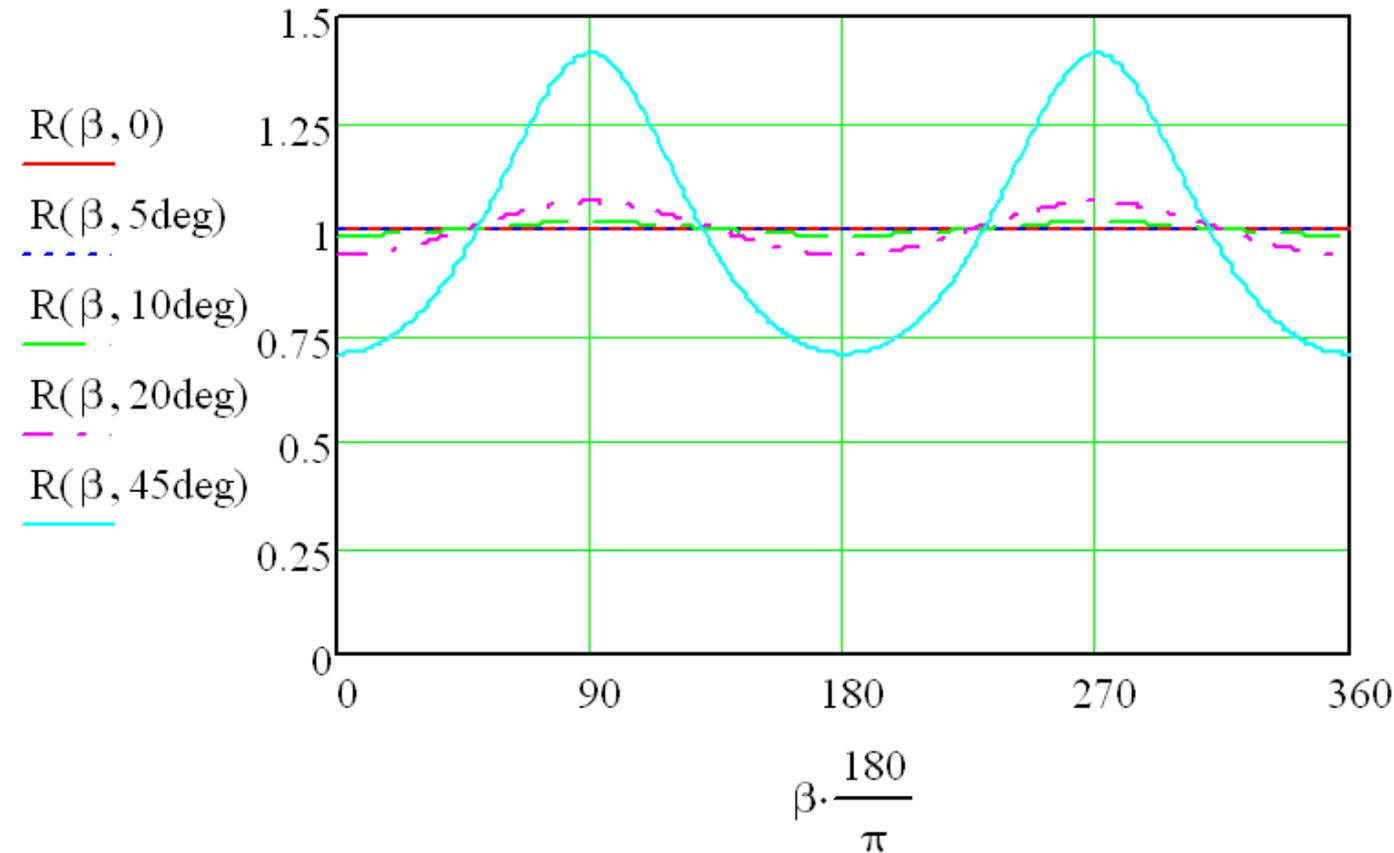


3. Excitação na transmissão

$$\frac{\omega_o}{\omega_i} = \frac{\cos(\theta)}{1 - \sin^2(\beta) \cdot \sin^2(\theta)}$$

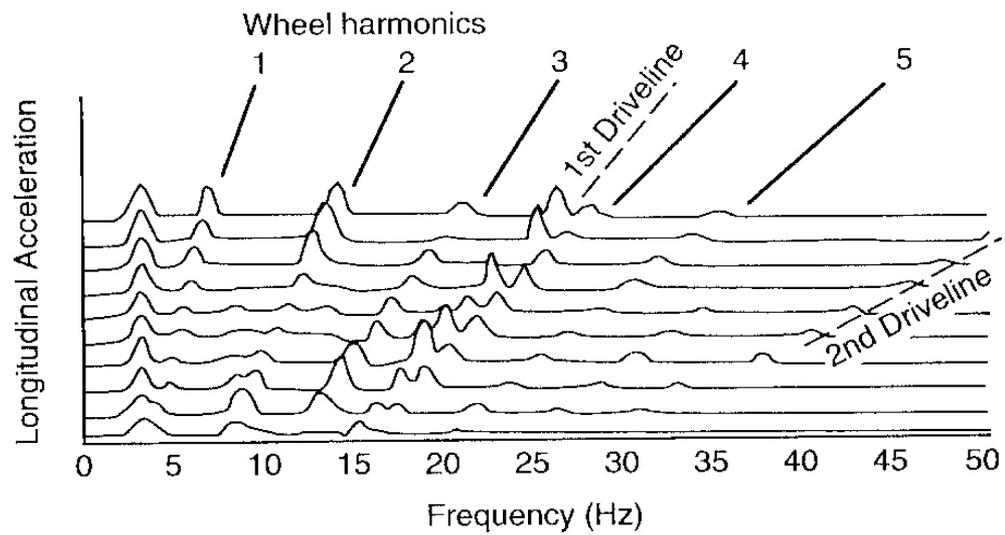
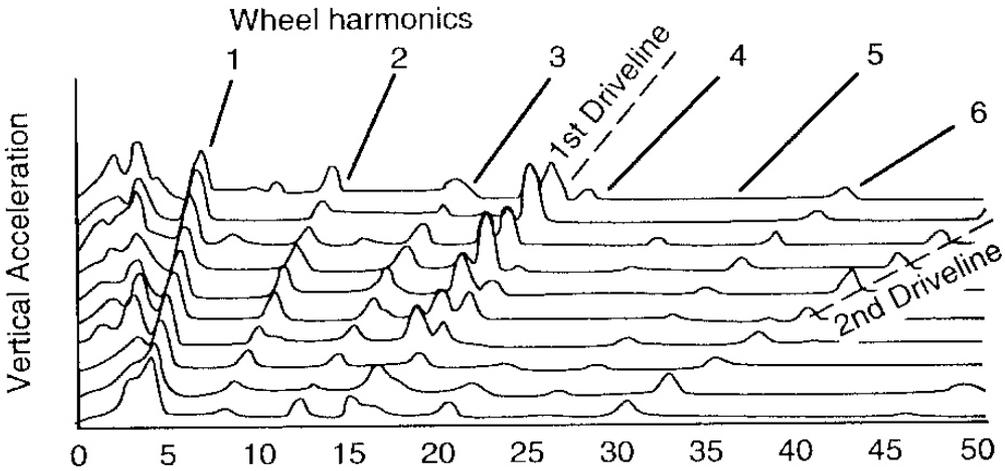


Cruzeta



3. Excitação na transmissão

Mapeamento espectral das vibrações provenientes das irregularidades na transmissão e nas rodas.

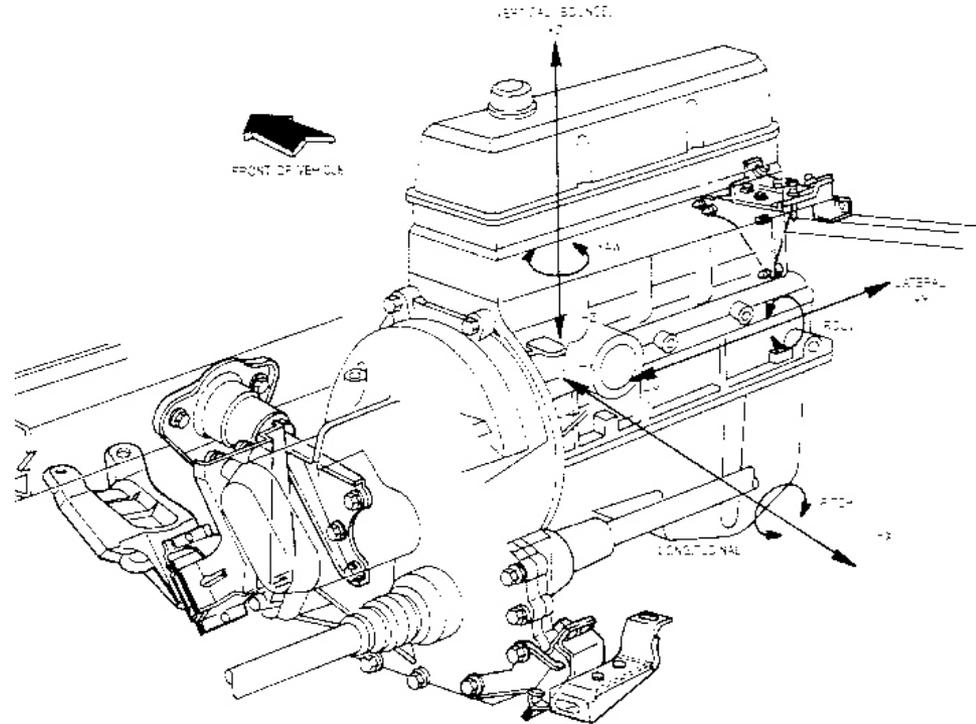


Fontes de excitação

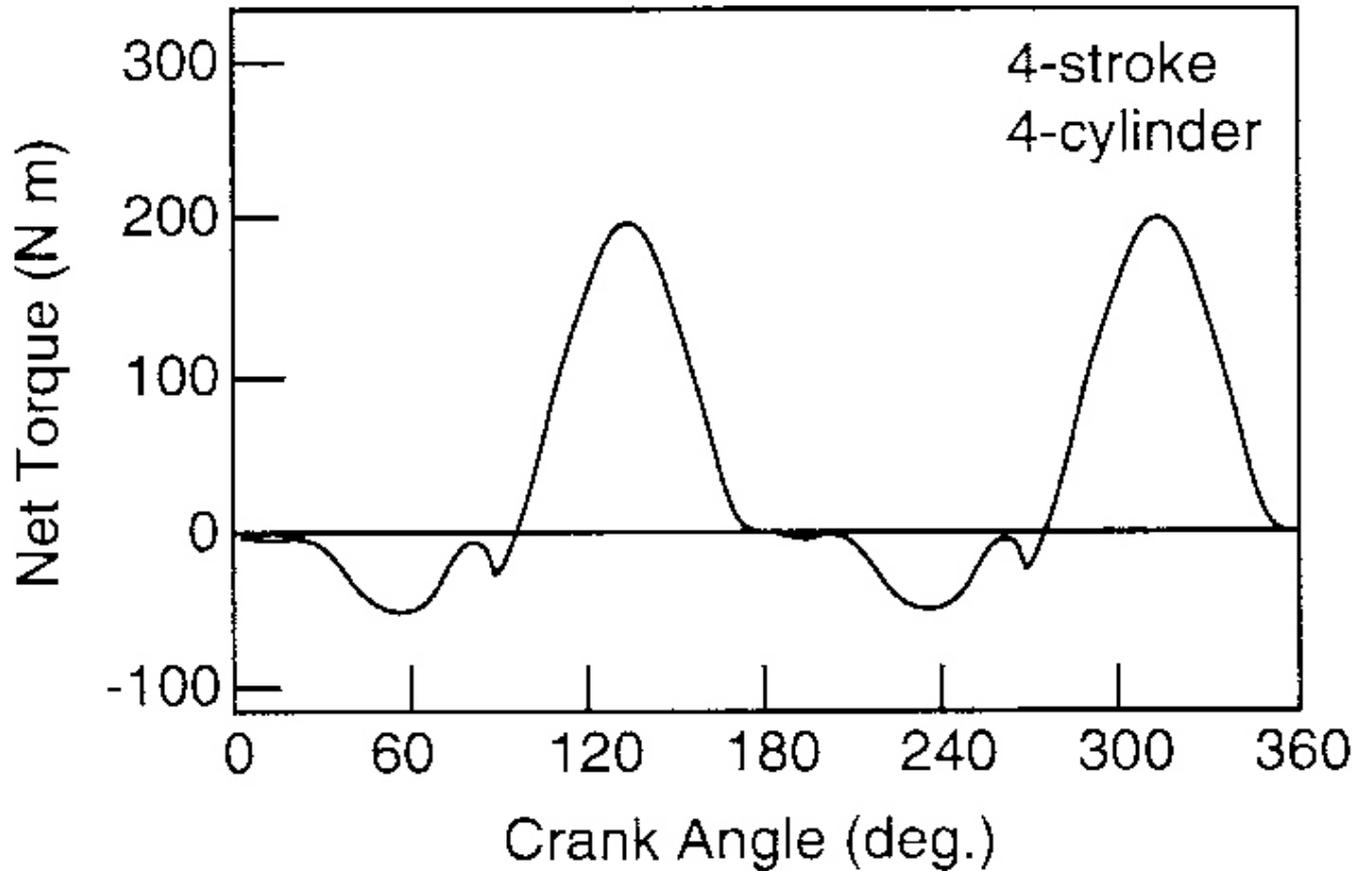
1. Rugosidade da pista
2. Montagem pneu/roda
3. Excitação na transmissão
4. **Motor**

4. Motor

- Processo cíclico
- Torque variável
- Massas em movimento
- Vibrações em 6 direções
 - 3 translações
 - 3 rotações
- As excitações variam com a configuração e número de cilindros



4. Motor

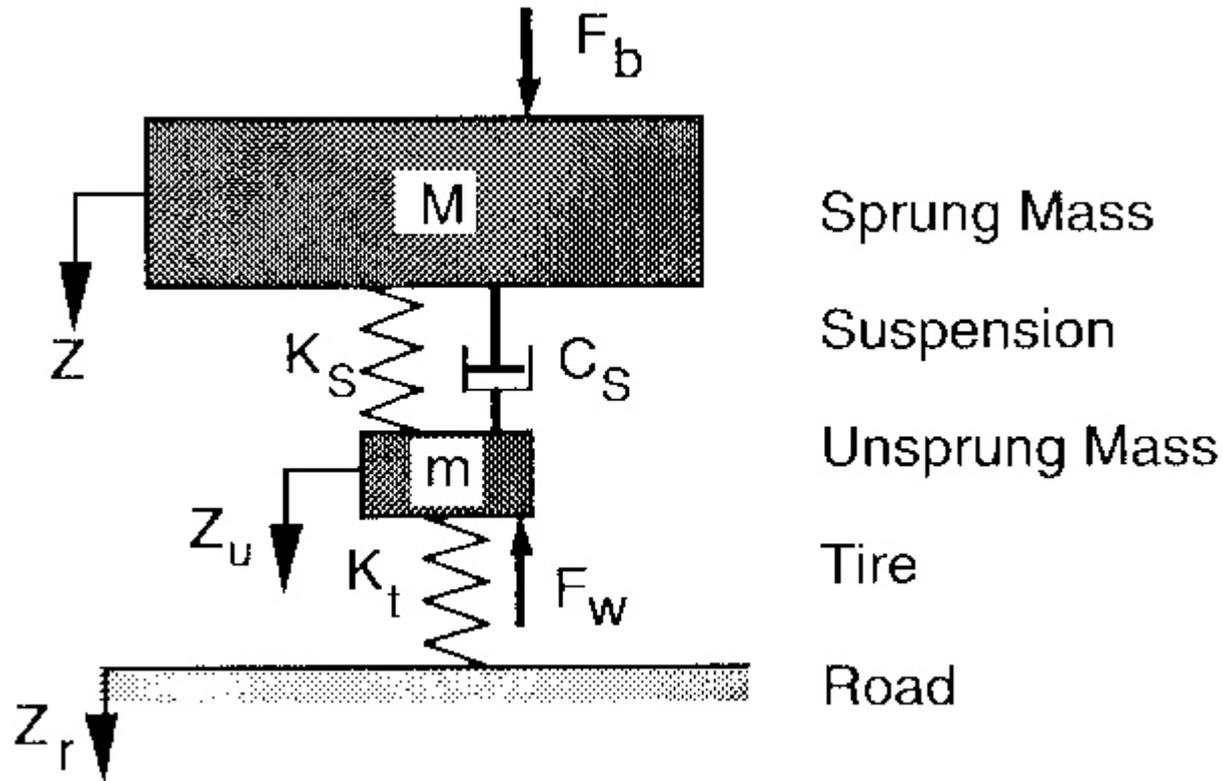


Variação de torque na saída de um motor de 4 cilindros e 4 tempos.

Nesta aula

- Fontes de excitação
- **Propriedades da resposta do veículo**
 - Isolamento
 - Rigidez e
 - Amortecimento

Isolamento da Suspensão



Modelo 1/4 de carro

Rigidez equivalente (ride rate)

$$RR = \frac{K_s \cdot K_t}{K_s + K_t}$$

K_s = rigidez da suspensão

K_t = rigidez do pneu

Frequência natural

$$\omega_n = \sqrt{\frac{RR}{M}}$$

M = massa

Frequência natural amortecida

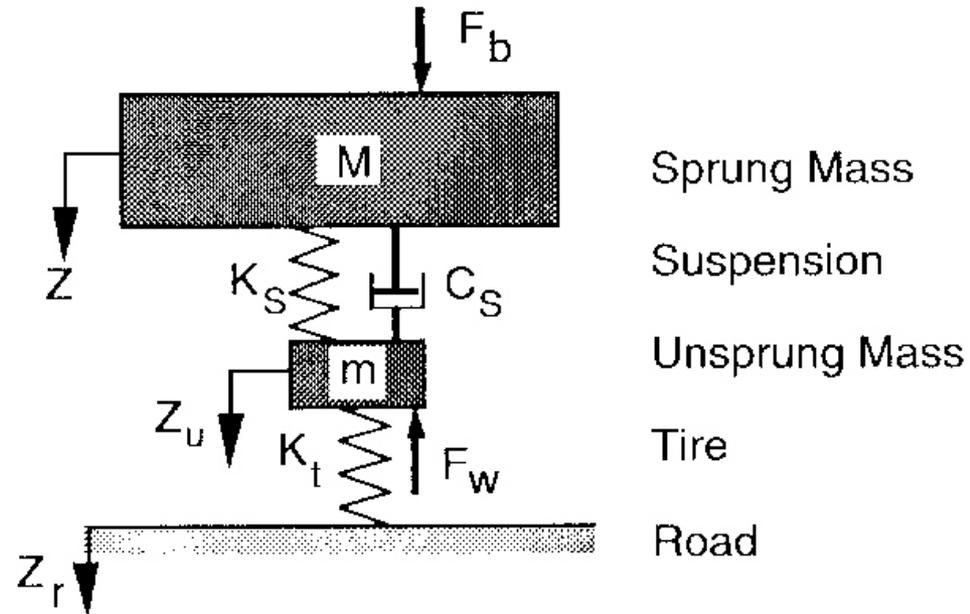
$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta_s^2}$$

ζ_s = razão de amortecimento

$$\zeta_s = \frac{C_s}{\sqrt{4 \cdot K_s \cdot M}}$$

ζ_s = coeficiente de amortecimento da suspensão (0,2 a 0,4)

Isolamento da Suspensão



Isolamento da Suspensão

Deflexão estática

$$SD = \frac{W}{K} = \frac{M \cdot g}{K} = \frac{M \cdot g}{\omega^2 \cdot M}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad K = \omega^2 \cdot M$$

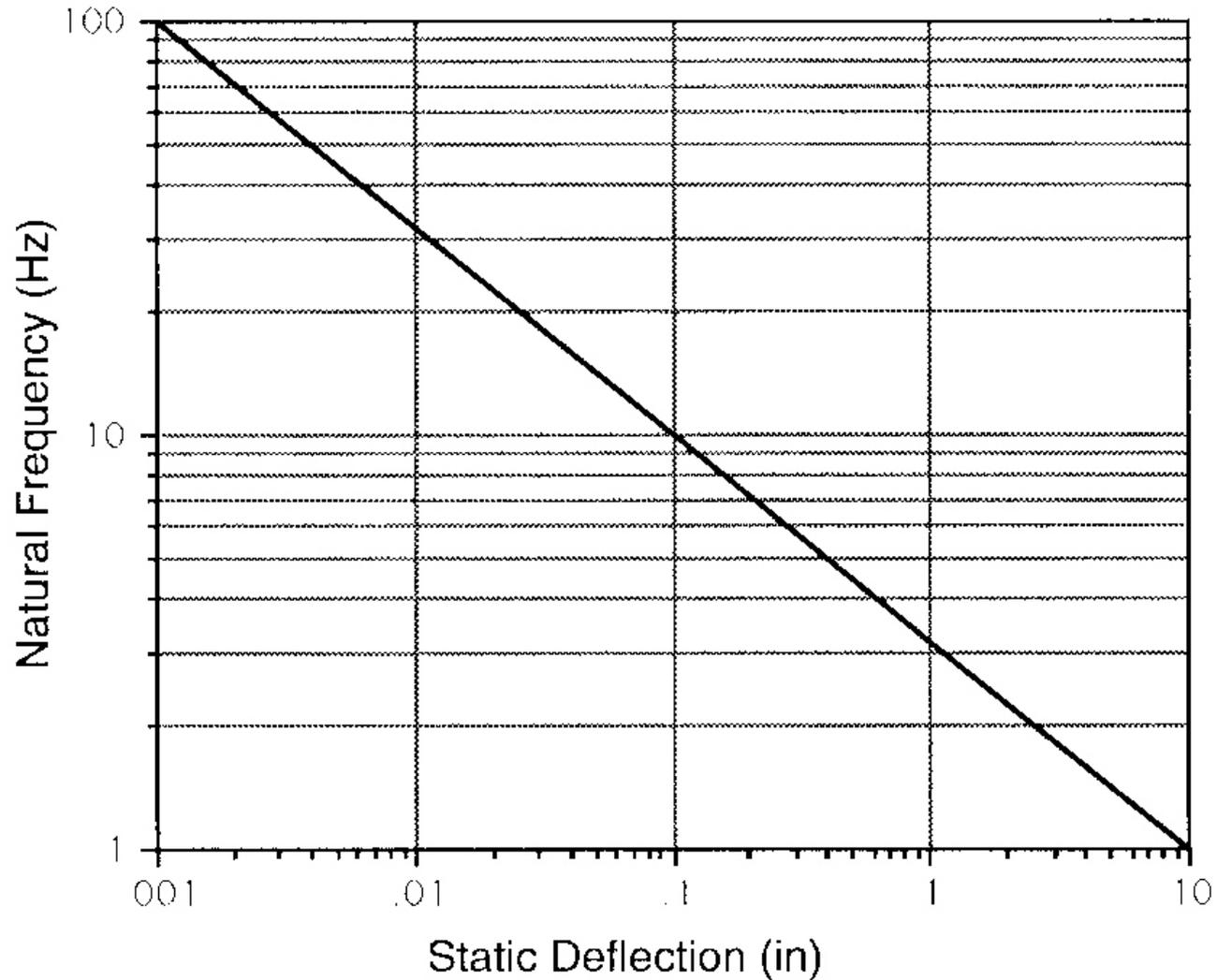
$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$SD = \frac{M \cdot g}{(2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot M}$$

$$SD = \frac{g}{(2 \cdot \pi \cdot f)^2}$$

Indicativo do limite inferior do isolamento de um sistema

Isolamento da Suspensão



Isolamento da Suspensão

$$M.\ddot{Z} + C_s.\dot{Z} + K_s.Z = C_s.\dot{Z}_u + K_s.Z_u + F_b$$

$$m.\ddot{Z}_u + C_s.\dot{Z}_u + (K_s + K_t).Z_u = C_s.\dot{Z} + K_s.Z + K_t.Z_r + F_w$$

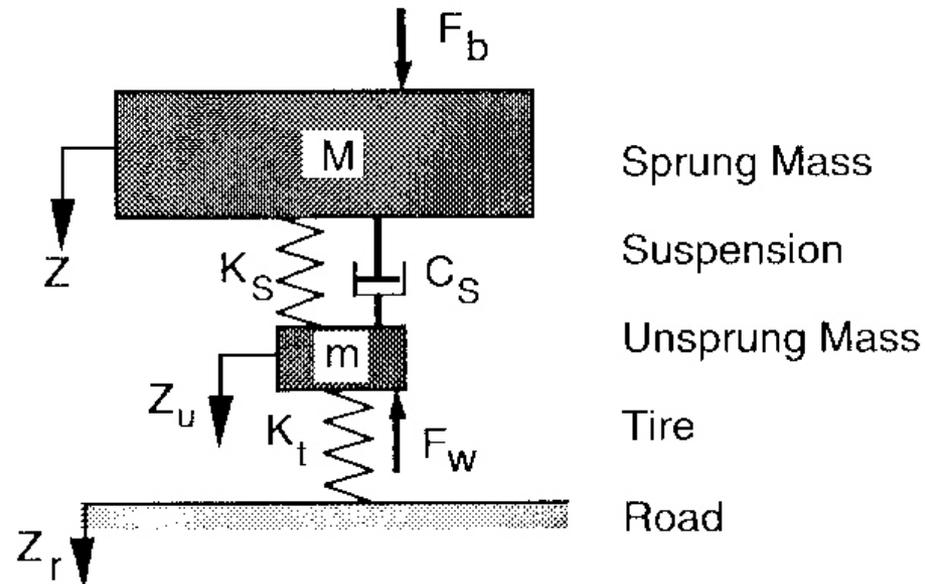
Z = deslocamento da massa suspensa

Z_u = deslocamento da massa não - suspensa

Z_r = deslocamento da pista

F_b = força sobre a massa suspensa

F_w = força sobre a massa não - suspensa



Isolamento da Suspensão

$$\frac{\ddot{Z}}{\ddot{Z}_r} = \frac{K_1 \cdot K_2 + j[K_1 \cdot C \cdot \omega]}{[\chi \cdot \omega^4 - (K_1 + K_2 \cdot \chi + K_2) \cdot \omega^2 + K_1 \cdot K_2] + j[K_1 \cdot C \cdot \omega - (1 + \chi) \cdot C \cdot \omega^3]}$$

$$\frac{\ddot{Z}}{F_w / M} = \frac{K_2 \cdot \omega^2 + j[C \cdot \omega^3]}{[\chi \cdot \omega^4 - (K_1 + K_2 \cdot \chi + K_2) \cdot \omega^2 + K_1 \cdot K_2] + j[K_1 \cdot C \cdot \omega - (1 + \chi) \cdot C \cdot \omega^3]}$$

$$\frac{\ddot{Z}}{F_b / M} = \frac{[\chi \cdot \omega^4 - (K_1 + K_2) \cdot \omega^2] + j[C \cdot \omega^3]}{[\chi \cdot \omega^4 - (K_1 + K_2 \cdot \chi + K_2) \cdot \omega^2 + K_1 \cdot K_2] + j[K_1 \cdot C \cdot \omega - (1 + \chi) \cdot C \cdot \omega^3]}$$

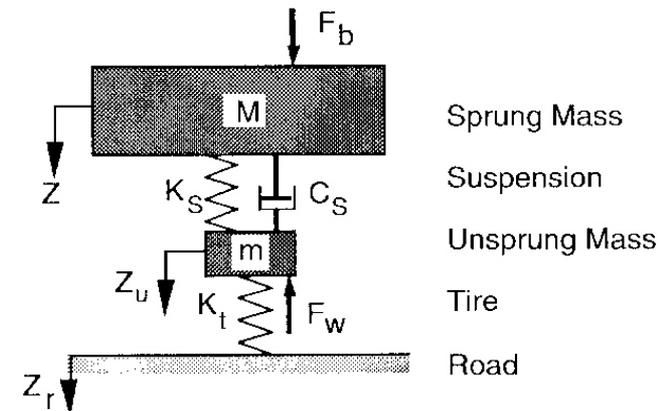
$\chi = m / M$ = razão entre as massas não - suspensa e suspensa

$$C = C_s / M$$

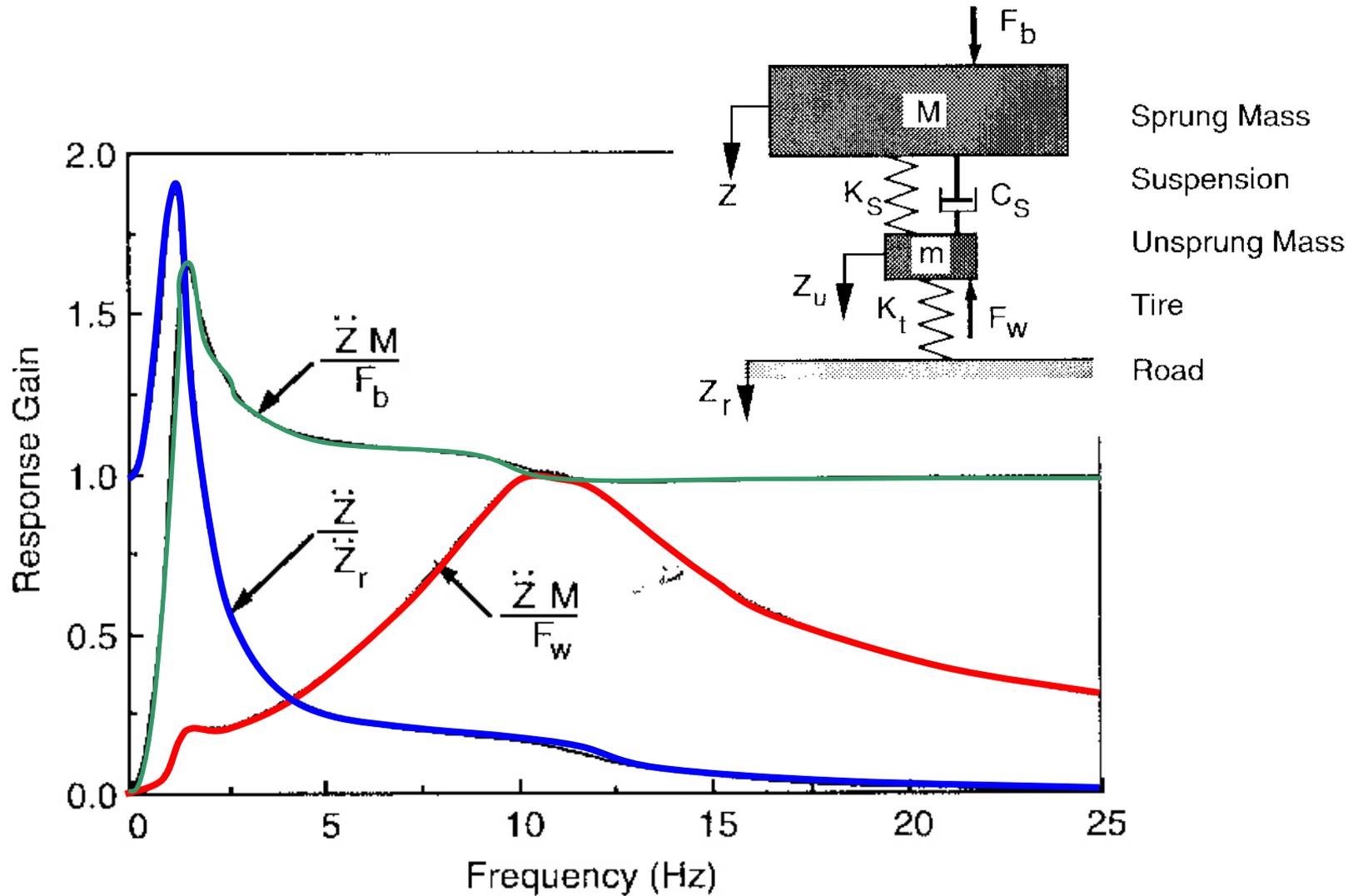
$$K_1 = K_t / M$$

$$K_2 = K_s / M$$

j = operador complexo



Isolamento da Suspensão



Resposta do modelo 1/4 de carro para as cargas da pista, da roda e da carroceria

Isolamento da Suspensão

Exemplo

Determinar a rigidez equivalente da suspensão dianteira e traseira de um Mustang 5.0 sabendo-se que a rigidez do pneu é de 1198 lbf/in.

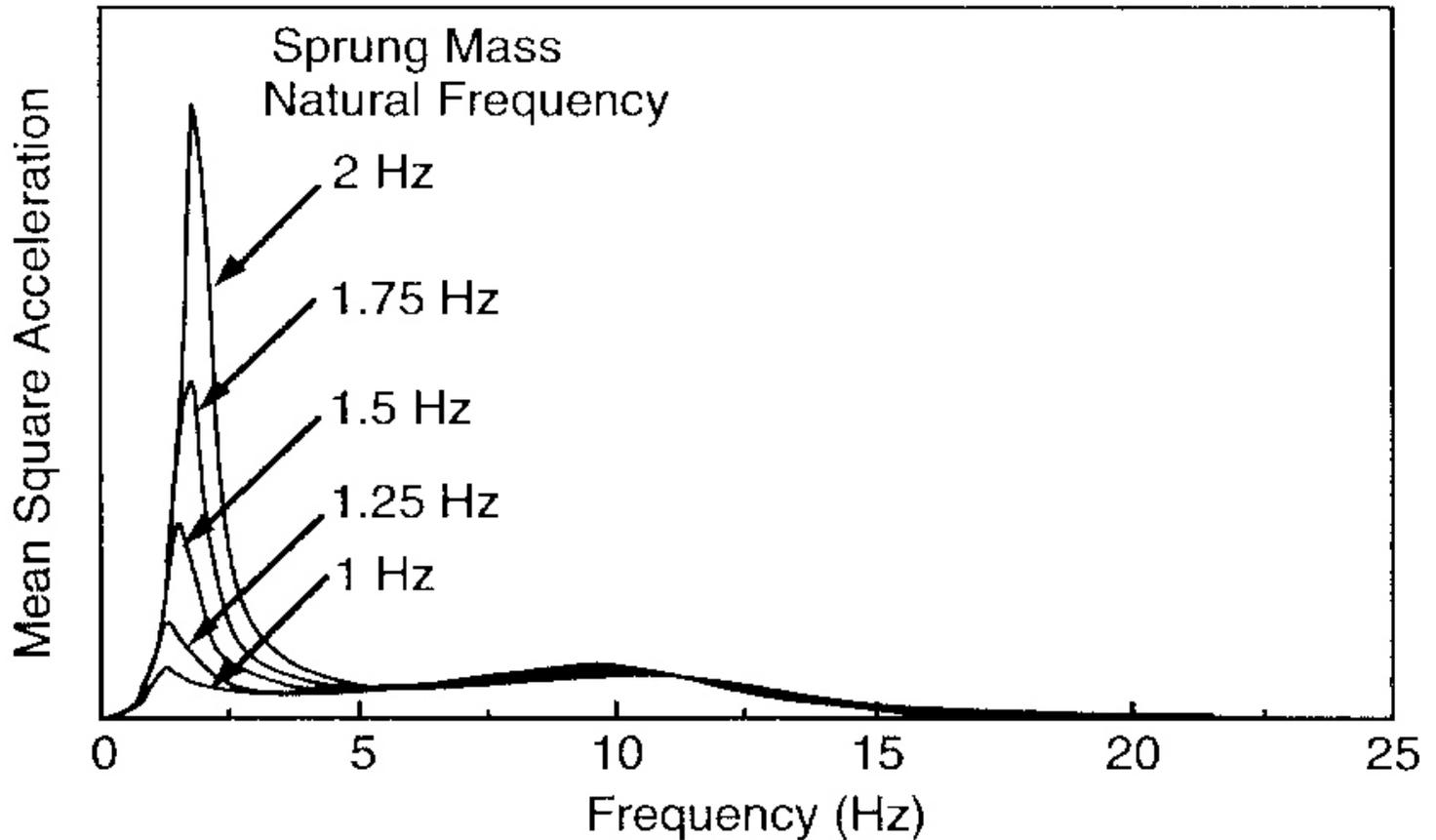
A rigidez da suspensão dianteira vale 143 lbf/in e a traseira, 100 lbf/in.

Estimar, também, as frequências naturais das duas suspensões quando os pneus dianteiros são carregados com 957 lbf e os traseiros com 730 lbf, cada um.

Resp.:

$$RR_f = 127 \text{ lbf/in}; RR_r = 92,3 \text{ lbf/in}; f_{nf} = 1,14 \text{ Hz}; f_{nr} = 1,11 \text{ Hz}$$

Rigidez da suspensão

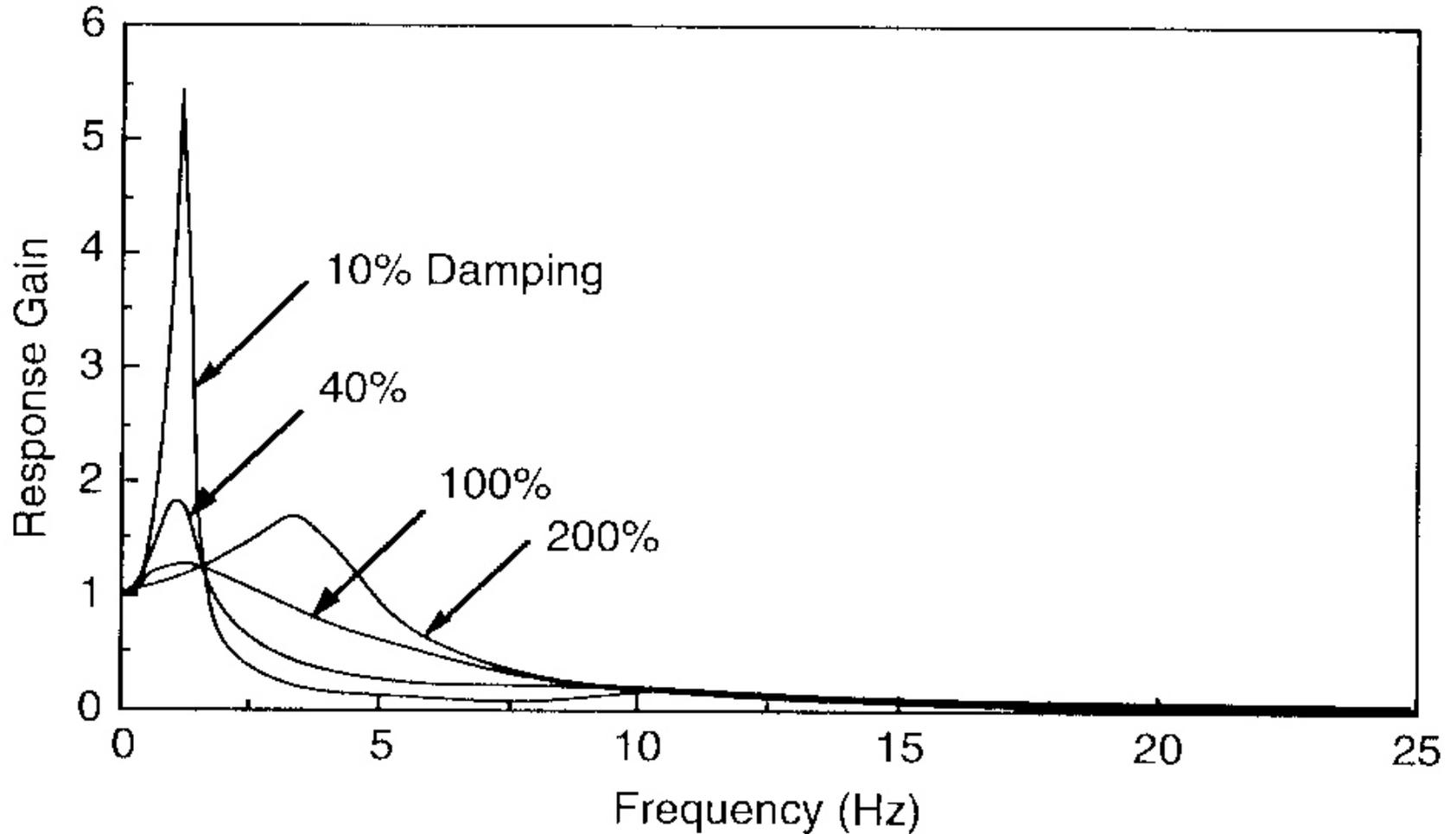


Variação da aceleração em função da frequência natural da mola

Veículos urbanos: 1 a 1,5 Hz

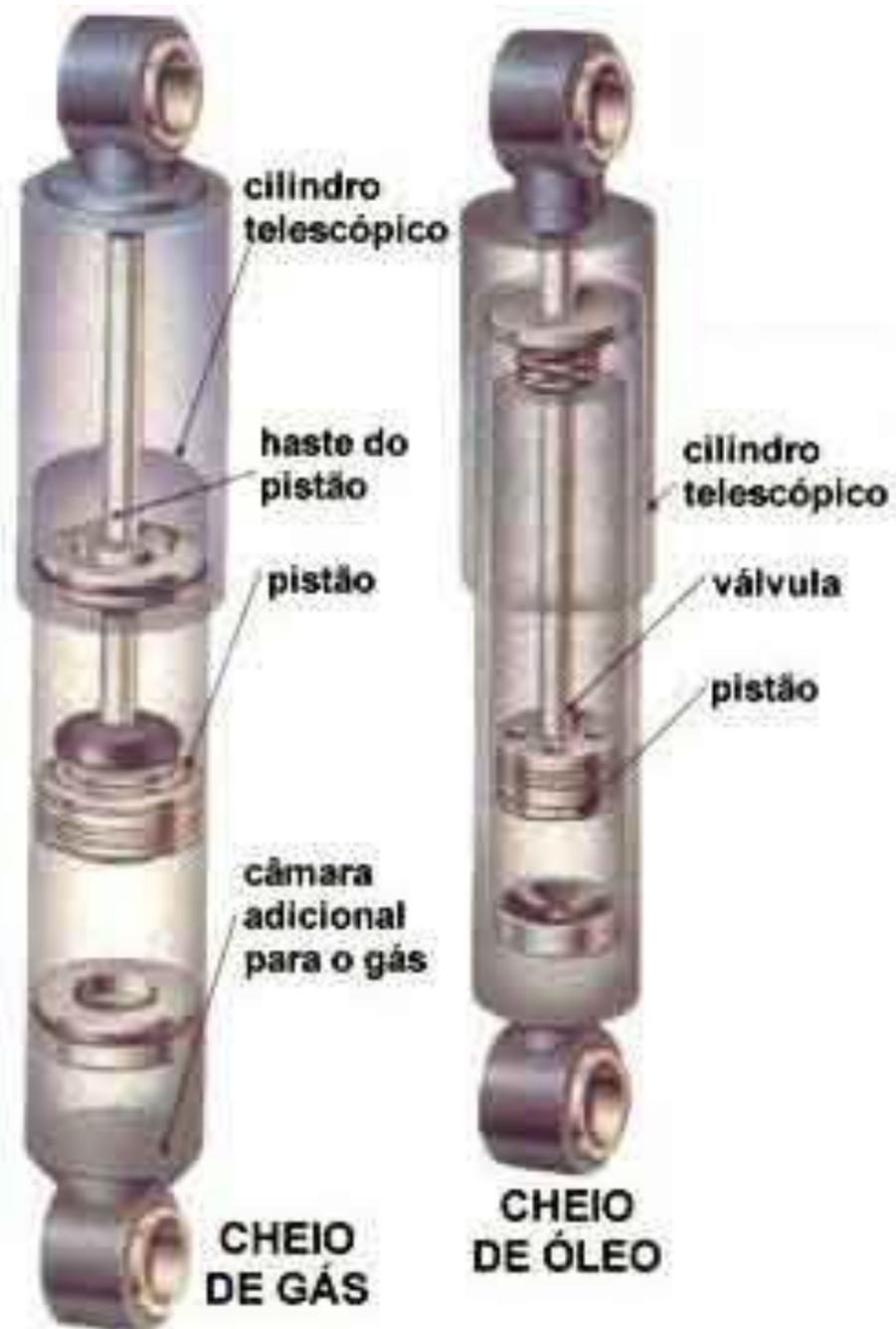
Veículos esportivos: 2 a 2,5 Hz

Amortecimento

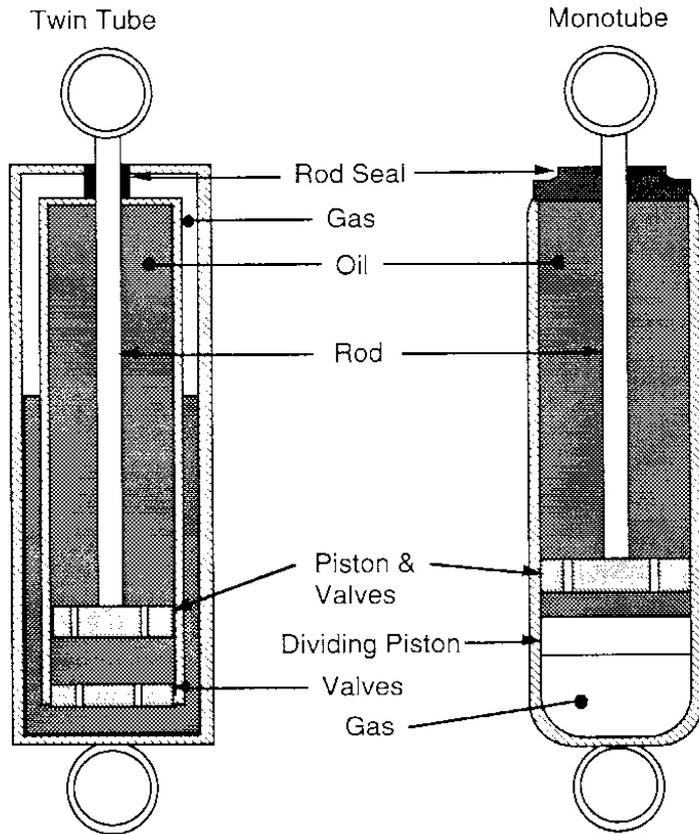


Efeito do amortecimento no comportamento de isolamento da suspensão.

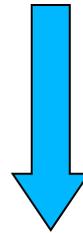
Dissipação da energia inserida no sistema.



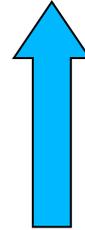
Amortecimento



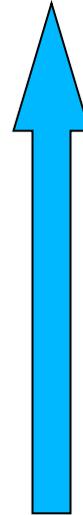
F_c



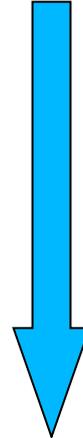
Compressão
(*jounce, bump*)



F_e

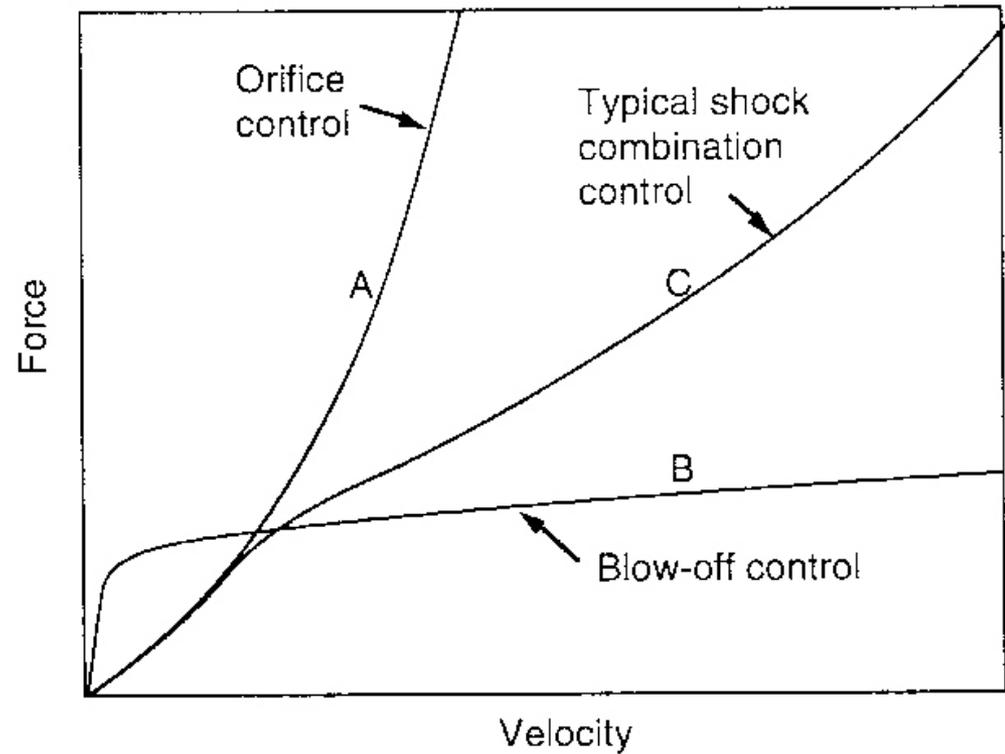
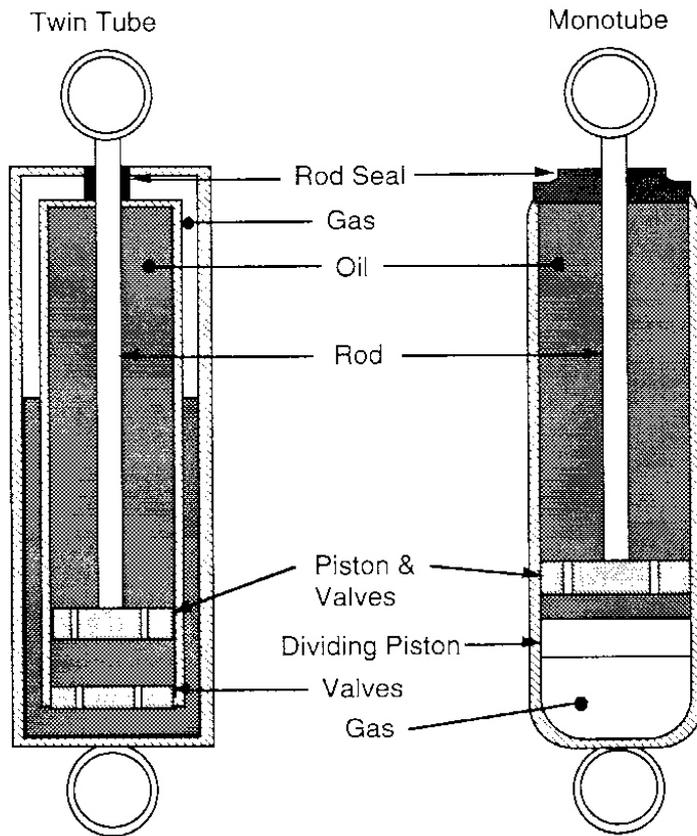


Extensão
(*rebound*)



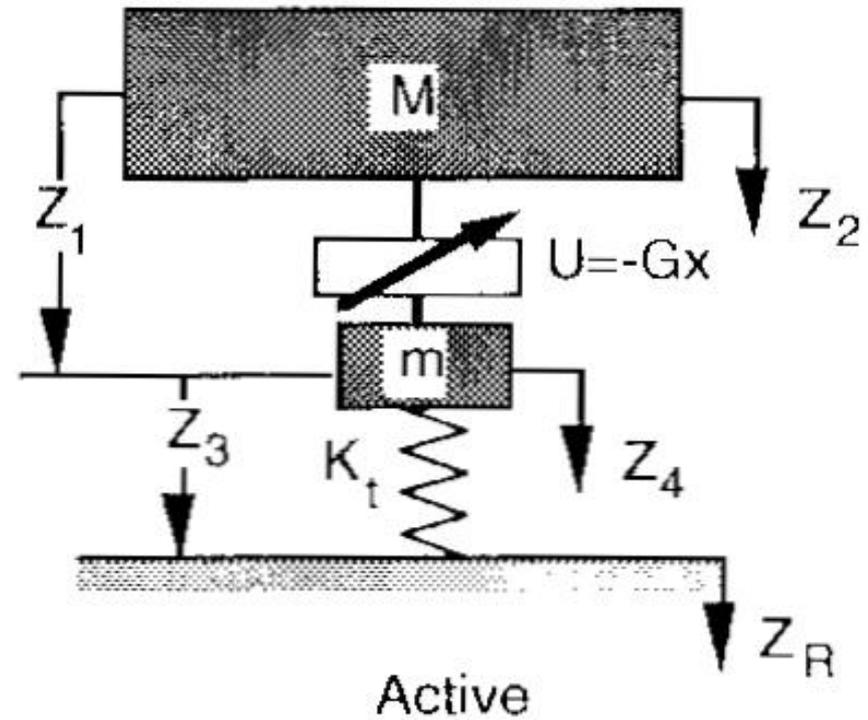
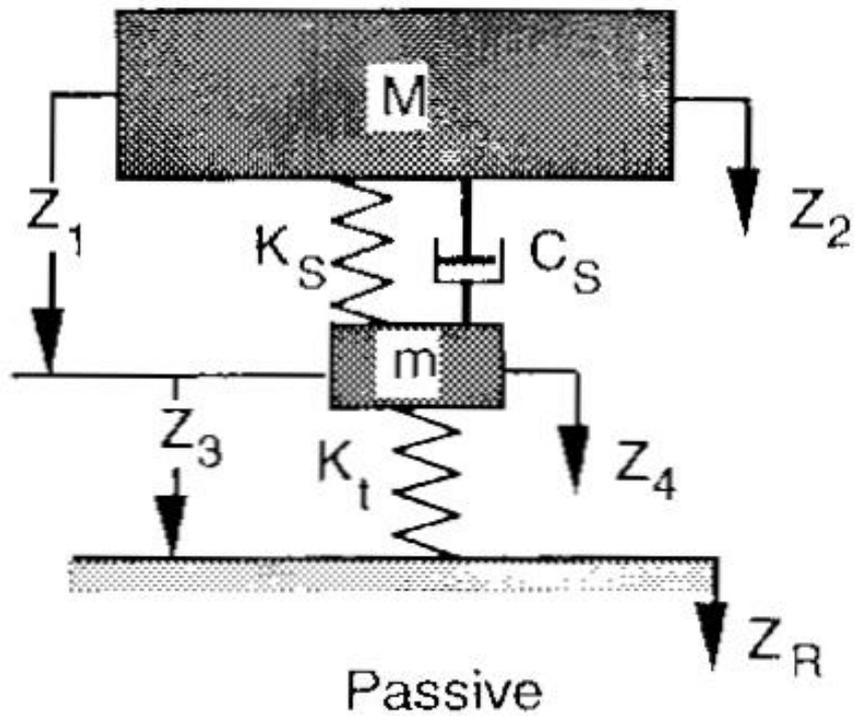
$$F_e \approx 3.F_c$$

Amortecimento



Comportamento das válvulas

Amortecimento



Controle ativo do amortecimento

Referência utilizada nesta aula

Gillespie, Thomas D.. FUNDAMENTALS OF
VEHICLE DYNAMICS. Warrendale: SAE, 1992.
Capítulo 5.