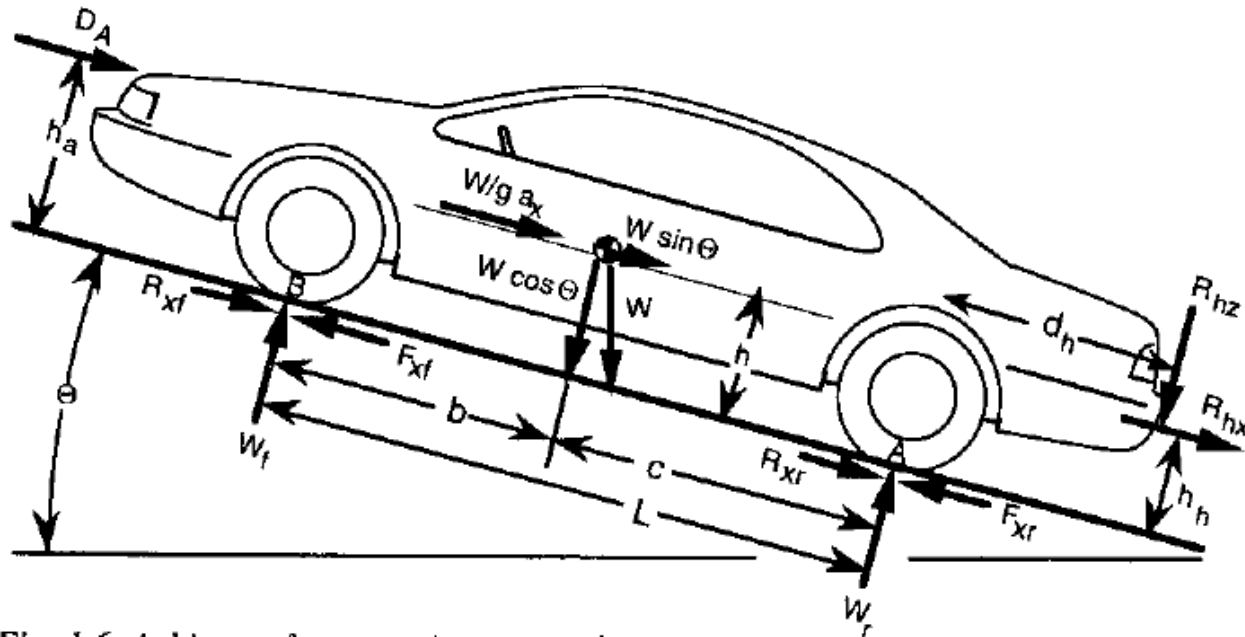


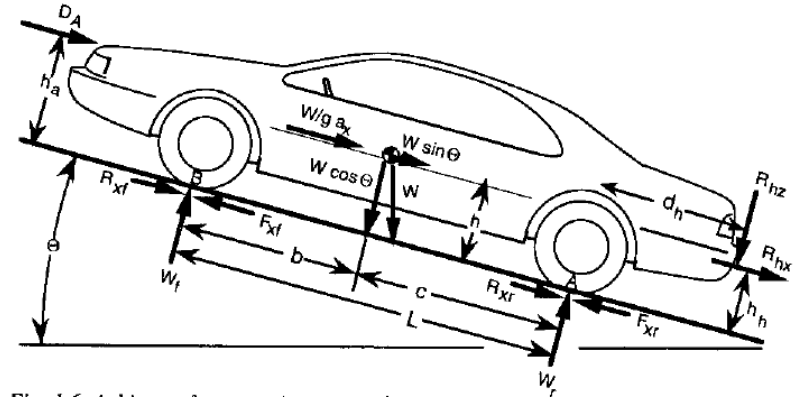
# Desempenho em Aceleração



$$M a_x = \frac{W}{g} a_x = F_x - R_x - D_A - R_{hx} - W \sin \theta$$

# Desempenho em Aceleração (Aceleração Máxima)

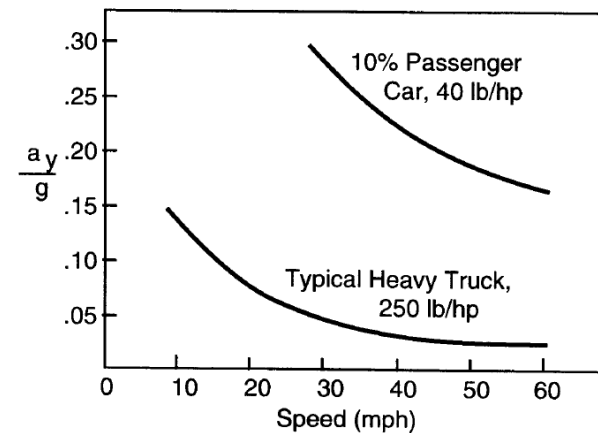
$$M a_x = \frac{W}{g} a_x = F_x - R_x - D_A - R_{hx} - W \sin \Theta$$



Considerando apenas a força trativa

$$M a_x = F_x$$

$$a_{x,m\acute{a}x} = \frac{F_{x,m\acute{a}x}}{M} = \frac{F_{x,m\acute{a}x} v}{M v} = \frac{P_{x,m\acute{a}x}}{M v}$$



# Atrito de Resistência ao Rolamento

$$R_x = R_{xf} + R_{xr} = f_r W$$

onde:

- $R_x$  – força de resistência ao rolamento
- $R_{xf}$  – força de resistência ao rolamento no pneu dianteiro
- $R_{xr}$  – força de resistência ao rolamento no pneu traseiro
- $f_r$  – coeficiente de resistência ao rolamento (típico: aprox. 0,01 - 0,02)
- $W$  – peso do veículo

Fatores que influenciam o coeficiente de atrito de rolamento:

- temperatura
- pressão de inflação
- aspectos construtivos do pneu
- complacência do pavimento
- Velocidade (praticamente constante até aprox. 80-100 km/h)

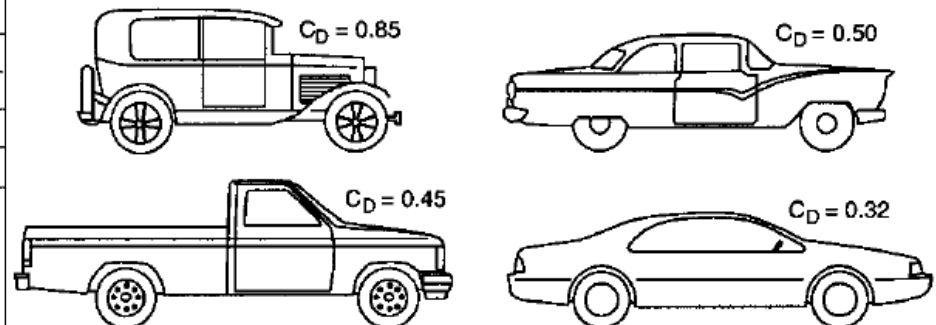
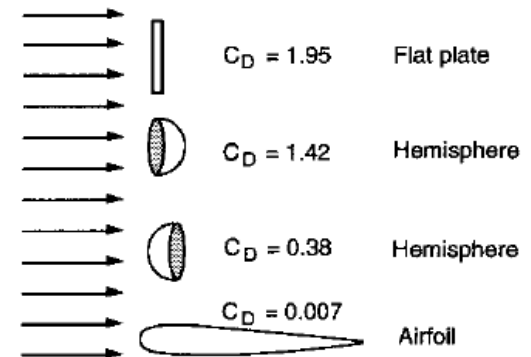
# Arrasto Aerodinâmico

$$D_A = 1/2 \rho V^2 C_D A$$

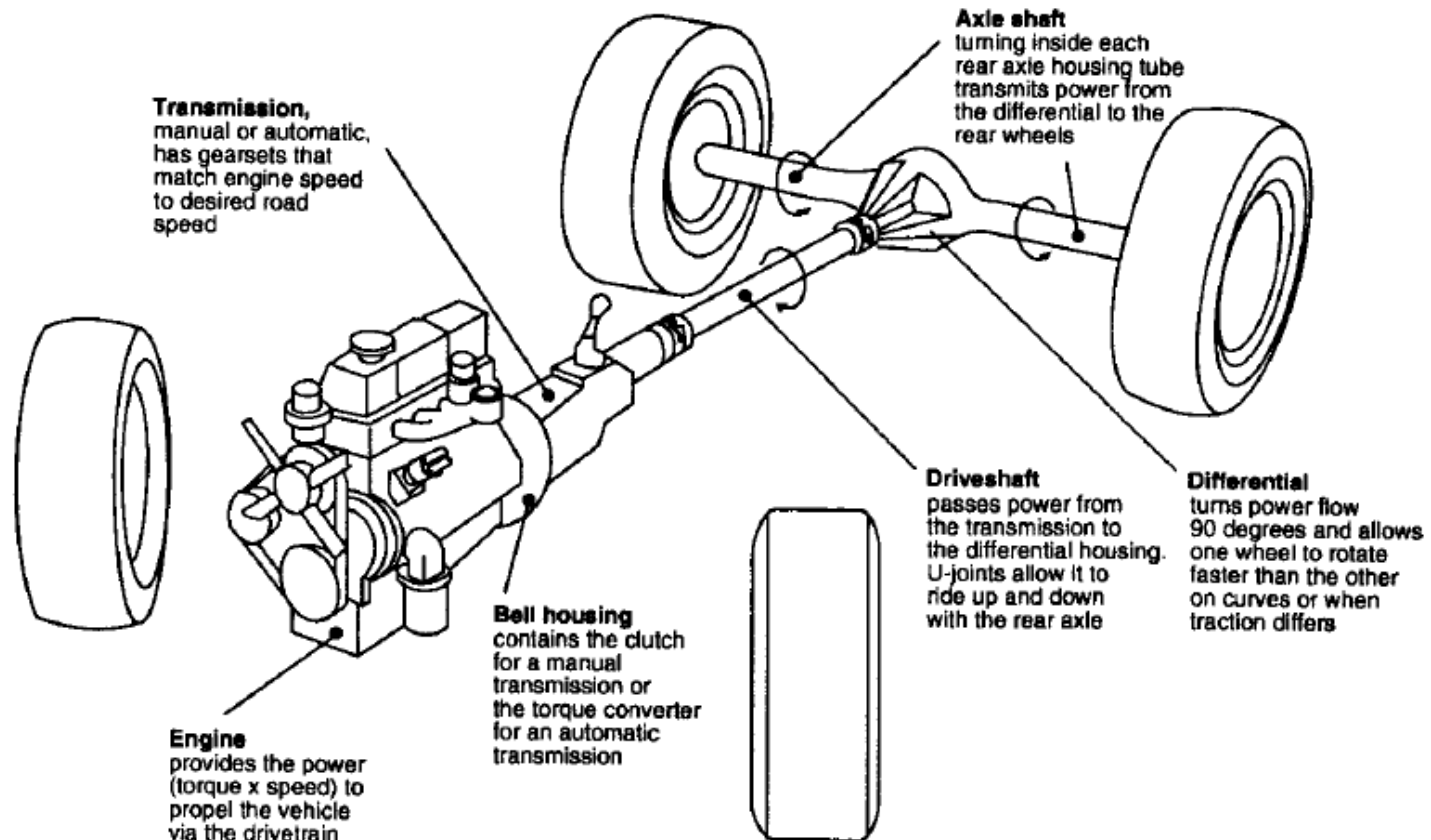
onde:

- $D_A$  – arrasto aerodinâmico
- $\rho$  – densidade do ar
- $C_D$  – coeficiente de arrasto aerodinâmico
- $A$  – área frontal

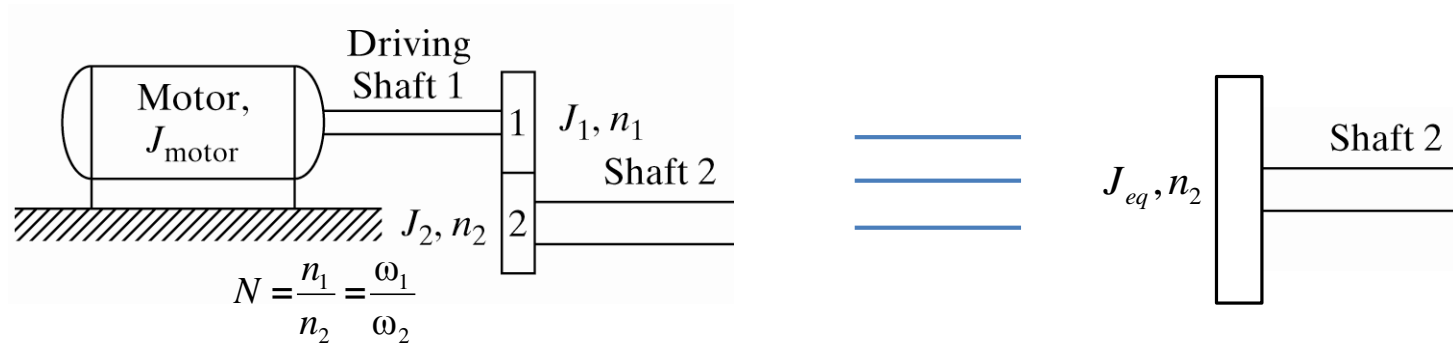
DRAG COEFFICIENT COMPONENT	TYPICAL VALUE
Forebody	0.05
Afterbody	0.14
Underbody	0.06
Skin Friction	0.025
Total Body Drag	0.275
Wheels and wheel wells	0.09
Drip rails	0.01
Window recesses	0.01
External mirrors	0.01
Total Protuberance Drag	0.12
Cooling system	0.025
Total Internal Drag	0.025
Overall Total Drag	0.42 <sup>1</sup>
VEHICLE OF THE 1980s	
Cars	0.30 - 0.35
Vans	0.33 - 0.35
Pickup trucks	0.42 - 0.46



# Powertrain (Trem de Força)



# Powertrain



## Balanço de Energia Cinética

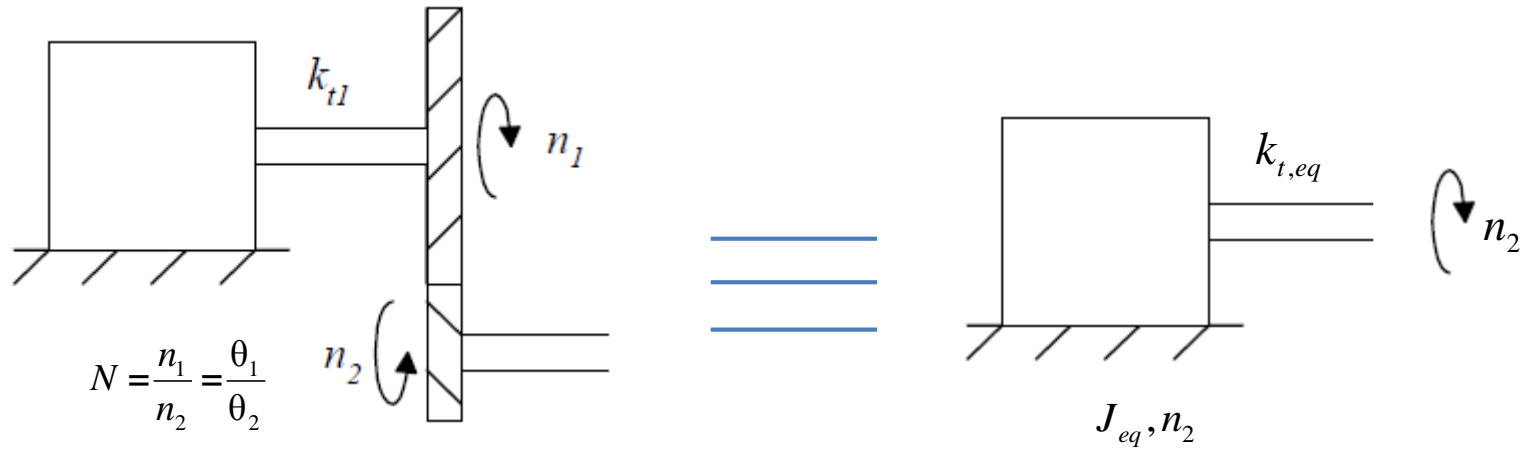
$$E_c = \frac{J_2 \omega_2^2}{2} + \frac{J_1 \omega_1^2}{2} + \frac{J_{\text{motor}} \omega_1^2}{2} \quad E_c = \frac{J_{eq} \omega_2^2}{2}$$

$$J_{eq} = J_2 + N^2 (J_1 + J_{\text{motor}})$$

$$J_{1,eq} = N^2 J_1$$

$$J_{\text{motor},eq} = N^2 J_{\text{motor}}$$

# Powertrain



## Balanço de Energia Potencial

$$\underbrace{E_p = \frac{k_{t1}\theta_1^2}{2} \quad E_p = \frac{k_{t,eq}\theta_2^2}{2}}_{k_{t,eq} = N^2 k_{t1}}$$

# Powertrain

Engine -> clutch

$$T_c = T_e - I_e \alpha_e$$

Clutch -> driveshaft

$$T_d = (T_c - I_t \alpha_e) N_t$$

Driveshaft -> axles -> wheels

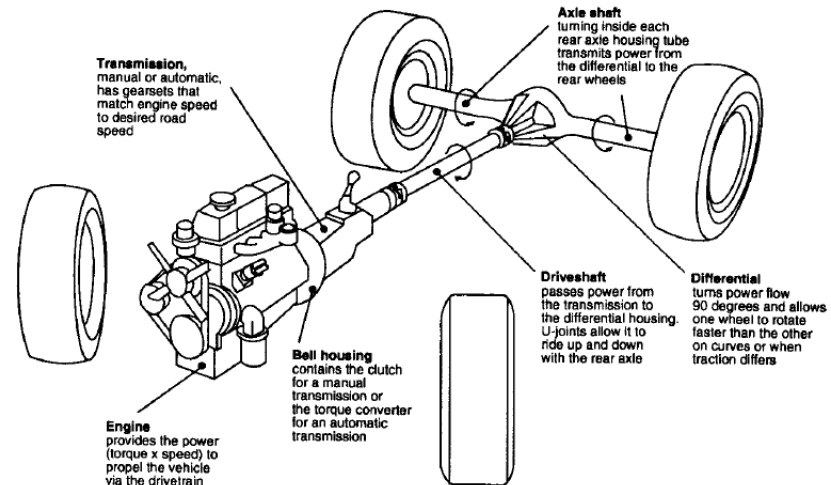
$$T_a = F_x r + I_w \alpha_w = (T_d - I_d \alpha_d) N_f$$

Reduções (transmissão e diferencial)

$$\alpha_d = N_f \alpha_w \quad \text{and} \quad \alpha_e = N_t \alpha_d = N_t N_f \alpha_w$$

Força trativa em função do torque do motor e aceleração longitudinal

$$F_x = \frac{T_e N_{tf}}{r} - \{ (I_e + I_t) N_{tf}^2 + I_d N_f^2 + I_w \} \frac{a_x}{r^2}$$





# Powertrain

Força trativa considerando eficiência na transmissão e diferencial

$$F_x = \frac{T_e N_{tf} \eta_{tf}}{r} - \{(I_e + I_t) N_{tf}^2 + I_d N_f^2 + I_w\} \frac{a_x}{r^2}$$

Aceleração longitudinal

$$M a_x = \frac{W}{g} a_x = F_x - R_x - D_A - R_{hx} - W \sin \Theta$$

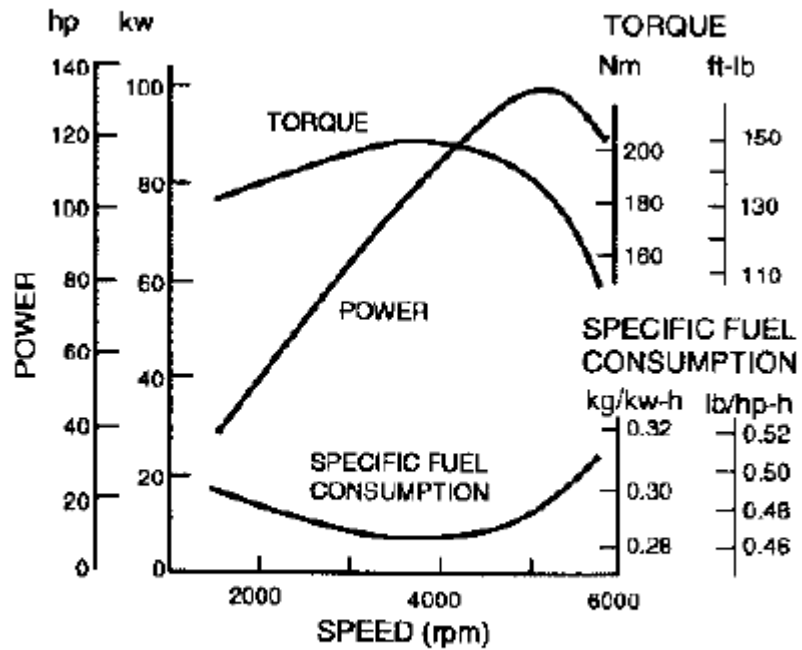
Massa equivalente dos elementos rotativos do powertrain

$$(M + M_r) a_x = \frac{W + W_r}{g} a_x = \frac{T_e N_{tf} \eta_{tf}}{r} - R_x - D_A - R_{hx} - W \sin \Theta$$

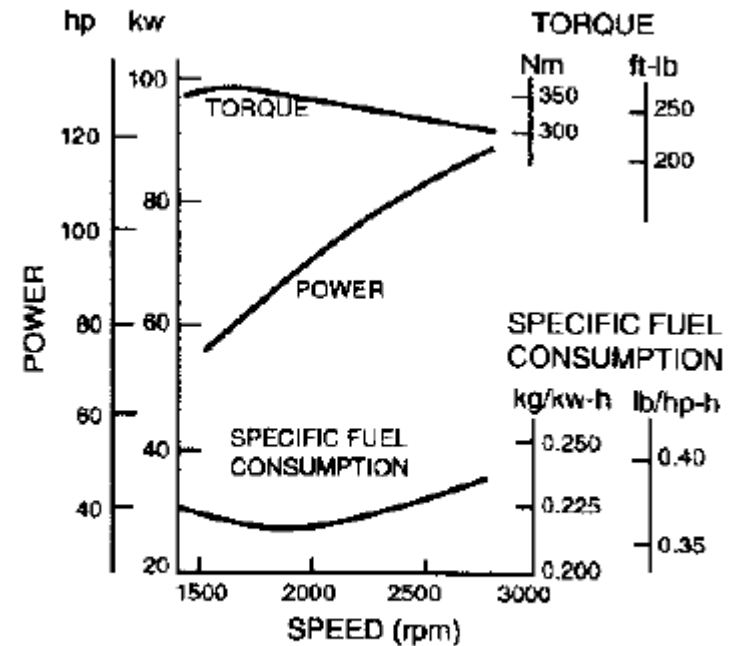
Fator de massa  $(M + M_r)/M$

<u>Vehicle</u>	Gear:	Mass Factor			
		<u>High</u>	<u>Second</u>	<u>First</u>	<u>Low</u>
Small Car		1.11	1.20	1.50	2.4
Large Car		1.09	1.14	1.30	—
Truck		1.09	1.20	1.60	2.5

# Curvas do Motor

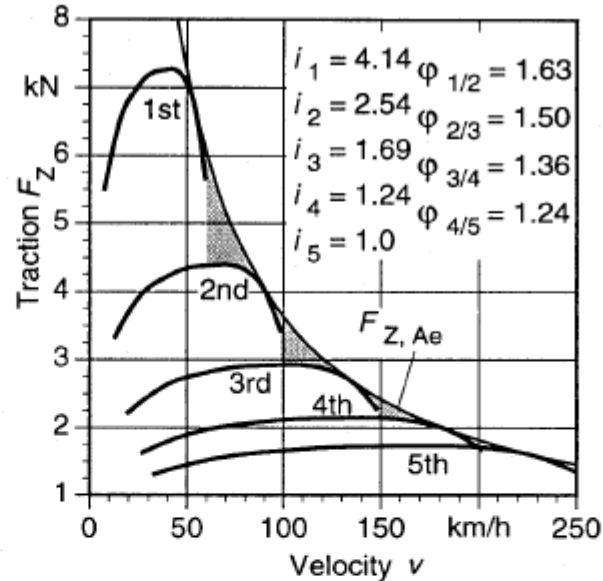
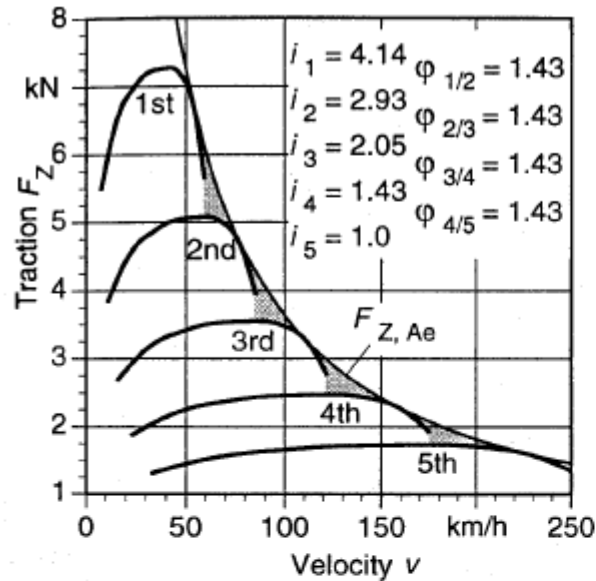


Gasoline

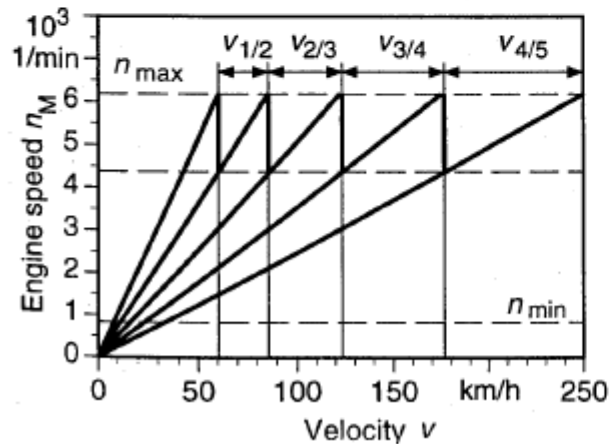


Diesel

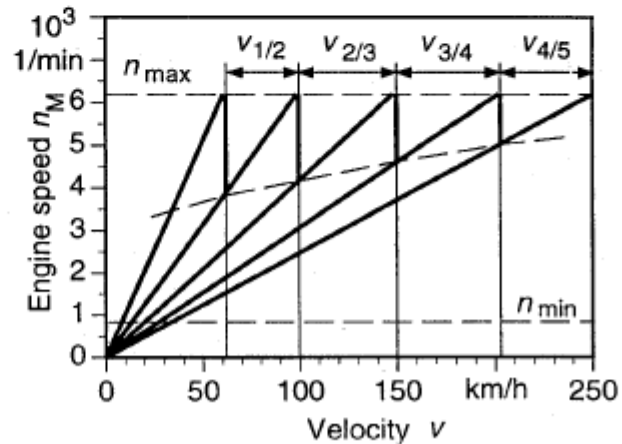
# Curvas do Motor



$$\varphi = \frac{i_{n-1}}{i_n}$$



a) Geometrical gear steps



b) Progressive gear steps

# Exercício (aceleração longitudinal)

## EXAMPLE PROBLEMS

1) We are given the following information about the engine and drivetrain components for a passenger car:

Engine inertia	0.8 in-lb-sec <sup>2</sup>					
RPM/Torque (ft-lb)	800	120	2400	175	4000	200
	1200	132	2800	181	4400	201
	1600	145	3200	190	4800	198
	2000	160	3600	198	5200	180
<hr/>						
Transmission Data - Gear	1	2	3	4	5	
Inertias	1.3	0.9	0.7	0.5	0.3 in-lb-sec <sup>2</sup>	
Ratios	4.28	2.79	1.83	1.36	1.00	
Efficiencies	0.966	0.967	0.972	0.973	0.970	
<hr/>						
Final drive - Inertia	1.2 in-lb-sec <sup>2</sup>					
Ratio	2.92					
Efficiency	0.99					
<hr/>						
Wheel inertias	Drive 11.0 in-lb-sec <sup>2</sup>			Non-drive 11.0 in-lb-sec <sup>2</sup>		
Wheel size	801 rev/mile ⇒ 6.59 ft circumference ⇒ 12.59 inch radius					

Pede-se:

- Entender código de referência, [aceleracao.m](http://aceleracao.m)
- Incorporar perdas por arrasto (pág. 97, Gillespie, utilizar Eq. 4-2 e adotar  $C_d$  e  $A$  razoáveis).
- Incorporar perdas por atrito de rolamento (pág. 110-..., Gillespie, utilizar valores na tabela da pág. 117 ou Eq. 4-15).
- Determinar influência destas perdas sobre o desempenho em aceleração do veículo (em particular, sobre tempo para aceleração de 0 a 100 km/h). Plotar curvas de velocidade em função do tempo para cada caso.
- Agora considere a força trativa máxima para que não haja derrapagem das rodas trativas. Qual seria a influência disto no tempo de aceleração de 0-100km/h?
- Encontrar velocidade máxima atingida pelo automóvel considerando as perdas adicionadas acima.

# Limite de Aceleração (Tração Máxima)

**Atrito de Coulomb**

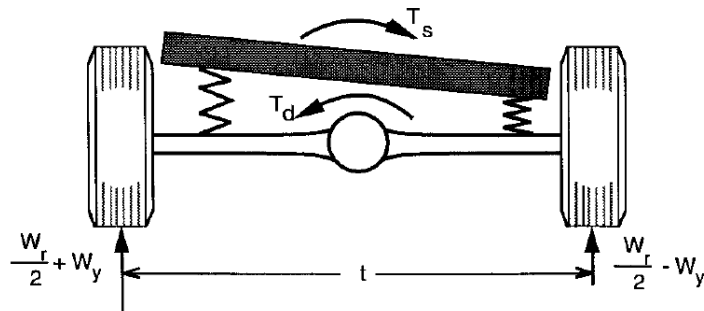
$$F_x = \mu F_z$$

**Transferência de carga longitudinal (aceleração longitudinal)**

$$W_f = W \left( \frac{c}{L} - \frac{a_x}{g} \frac{h}{L} \right) = W_{fs} - W \frac{a_x}{g} \frac{h}{L}$$

$$W_r = W \left( \frac{b}{L} + \frac{a_x}{g} \frac{h}{L} \right) = W_{rs} + W \frac{a_x}{g} \frac{h}{L}$$

**Transferência de carga lateral (diferencial)**



# Transferência Lateral de Carga

## Eixo traseiro sólido com diferencial “destravado”

$$\Sigma T_o = (W_r/2 + W_y - W_r/2 + W_y) t/2 + T_s - T_d = 0$$

$$W_y = (T_d - T_s)/t$$

$$T_d = F_x r/N_f$$

$$\phi = T_d / K_\phi = T_d / (K_{\phi f} + K_{\phi r})$$

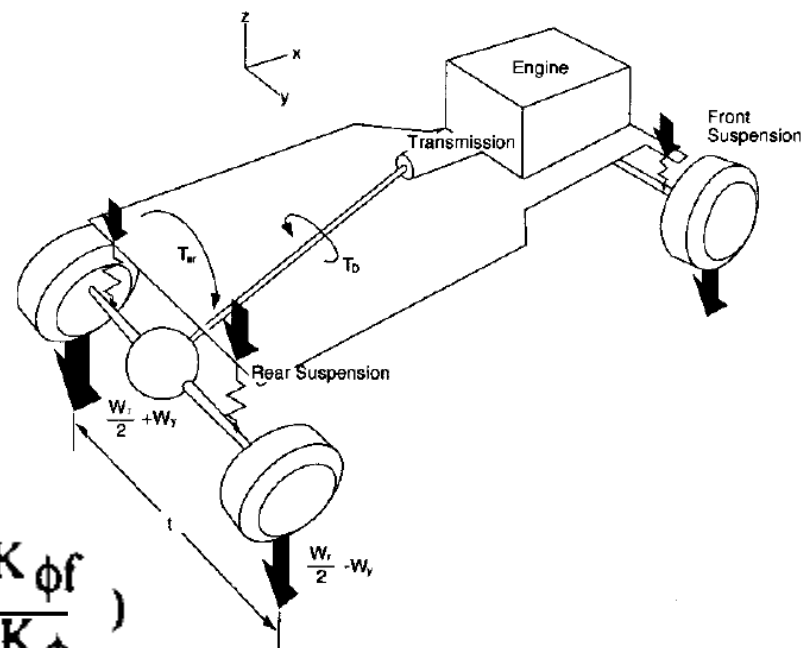
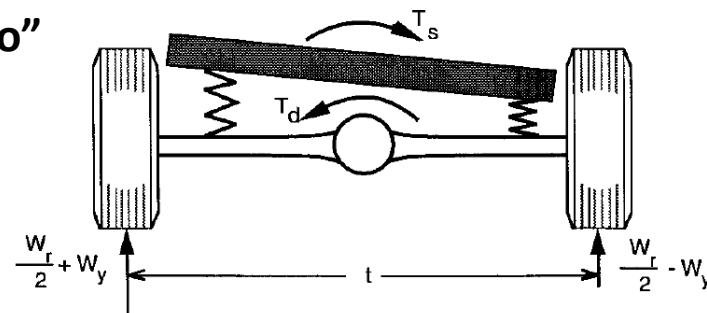
$$T_{sr} = K_{\phi r} T_d / (K_{\phi f} + K_{\phi r})$$

$$W_y = \frac{F_x r}{N_{ft}} \left[ 1 - \frac{K_{\phi r}}{K_{\phi r} + K_{\phi f}} \right] \quad W_y = \frac{F_x r}{N_{ft}} \frac{K_{\phi f}}{K_\phi}$$

$$W_r = W \left( \frac{b}{L} + \frac{a_x h}{g L} \right)$$

$$W_{rr} = \frac{Wb}{2L} + \frac{F_x h}{2L} - \frac{F_x r}{N_{ft}} \frac{K_{\phi f}}{K_\phi}$$

$$F_x = 2 \mu W_{rr} = 2 \mu \left( \frac{Wb}{2L} + \frac{F_x h}{2L} - \frac{F_x r}{N_{ft}} \frac{K_{\phi f}}{K_\phi} \right)$$



# Limite de Tração

Eixo traseiro sólido com diferencial “destravado”

$$F_{x\max} = \frac{\mu \frac{W_b}{L}}{1 - \frac{h}{L} \mu + \frac{2 \mu r}{N_{ft}} \frac{K_{\phi f}}{K_{\phi}}}$$

Eixo dianteiro sólido com diferencial “destravado”

$$F_{x\max} = \frac{\mu \frac{W_c}{L}}{1 + \frac{h}{L} \mu + \frac{2 \mu r}{N_{ft}} \frac{K_{\phi r}}{K_{\phi}}}$$

Eixo traseiro sólido com diferencial “travado” ou suspensão traseira independente

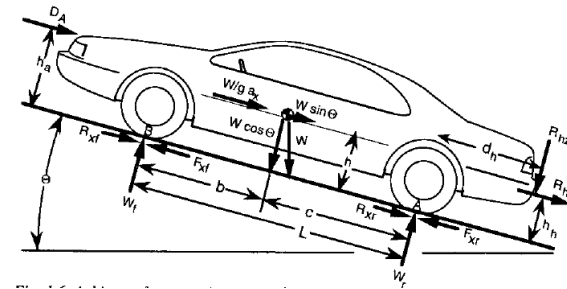
$$F_{x\max} = \frac{\mu \frac{W_b}{L}}{1 - \frac{h}{L} \mu}$$

**Dianteira com  
suspensão  
independente**

$$F_{x\max} = \frac{\mu \frac{W_c}{L}}{1 + \frac{h}{L} \mu}$$

# Desempenho em Frenagem

$$M a_x = - \frac{W}{g} D_x = - F_{xf} - F_{xr} - D_A - W \sin \Theta$$



**Equações básicas (desaceleração constante)**

$$D_x = \frac{F_{xt}}{M} = - \frac{dV}{dt}$$

$$V_o - V_f = \frac{F_{xt}}{M} t_s$$

$$V_f = 0$$



$$t_s = \frac{V_o}{\frac{F_{xt}}{M}} = \frac{V_o}{D_x}$$

$$\frac{V_o^2 - V_f^2}{2} = \frac{F_{xt}}{M} X$$

$$SD = \frac{V_o^2}{2 \frac{F_{xt}}{M}} = \frac{V_o^2}{2 D_x}$$



# Desempenho em Frenagem

MANUAL DO ENSINO DA CONDUÇÃO



FT [13] [256] [34]

**Cálculo de distâncias médias de paragem:**

VELOCIDADE DE CIRCULAÇÃO	DR* (TR = 1S)	DT* ( $V^2/200$ )	DP* (DR + DT)
30 kms/h	9 m	4.5 m	13.5 m
50 kms/h	15 m	12.5 m	27.5 m
70 kms/h	21 m	24.5 m	45.5 m
90 kms/h	27 m	40.5 m	67.5 m
120 kms/h	36 m	72 m	108 m
150 kms/h	45 m	112.5 m	157.5 m

DR = Distância de Reacção ; DT = Distância de Travagem ; DP = Distância de Paragem

# Desempenho em Frenagem

Energia dissipada (energia cinética -> calor + vibração + ...)

$$\text{Energy} = \frac{M}{2} (V_o^2 - V_f^2)$$

parada

massa: 1000 kg

velocidade inicial: 100 km/h



energia: 386 kJ

leva a ferver 1,15 kg de água

$$\text{Power} = \frac{M}{2} \frac{V_o^2}{t_s}$$

massa: 1000 kg

velocidade inicial: 100 km/h

tempo de parada: 8 segundos



potência **média**: 48 kW

# Forças que Contribuem à Frenagem

- Atrito de rolamento (ordem de magnitude: 0,01 g)

$$R_{xf} + R_{xr} = f_r (W_f + W_r) = f_r W$$

- Arrasto aerodinâmico (ordem de magnitude, vel. estrada: 0,03 g)

$$D_A = 1/2 \rho V^2 C_D A$$

- Arrasto do driveline (balanço entre forças inerciais e dissipativas)
  - Inércia dos componentes do powertrain (influência negativa)
  - Freio motor (câmbio manual)
  - Atrito interno

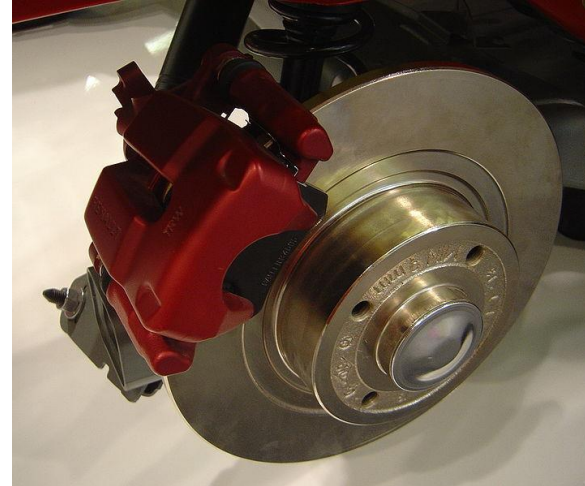
- Plano inclinado (4% inclinação -> aprox. 0,04 g)

$$R_g = W \sin \Theta \cong W \Theta$$

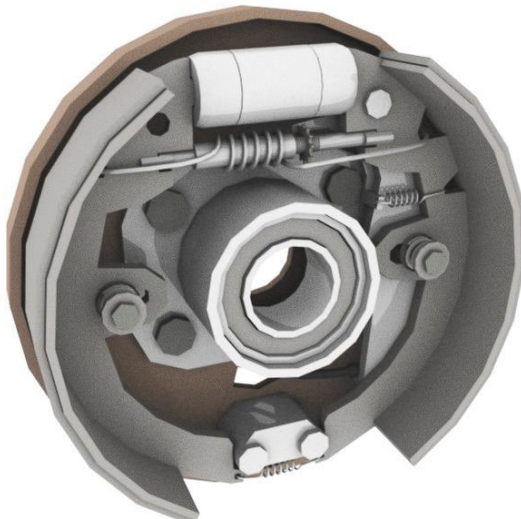
# Freios



freio a tambor



freio a disco

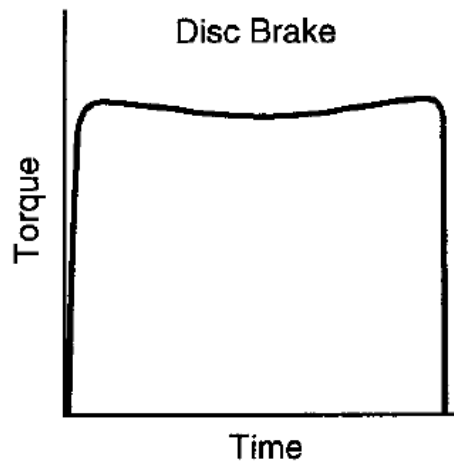
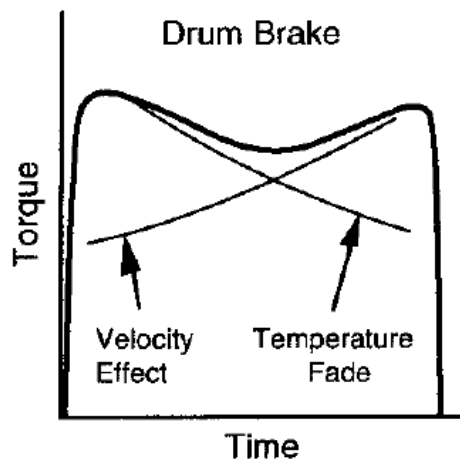
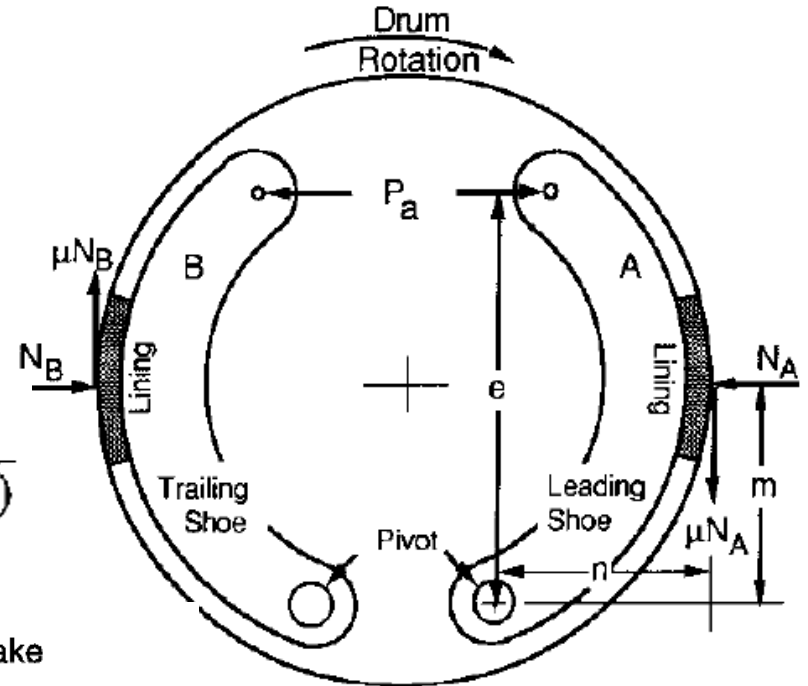


# Freio a Tambor (fator de amplificação)

$$\Sigma M_p = e P_a + n \mu N_A - m N_A = 0$$

$$F_A = \mu N_A \quad \text{and} \quad F_B = \mu N_B$$

$$\frac{F_A}{P_a} = \frac{\mu e}{(m - \mu n)} \quad \text{and} \quad \frac{F_B}{P_a} = \frac{\mu e}{(m + \mu n)}$$



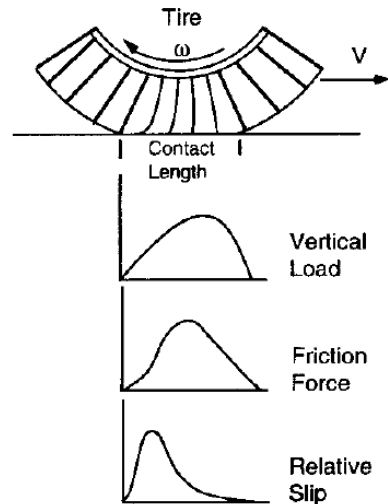
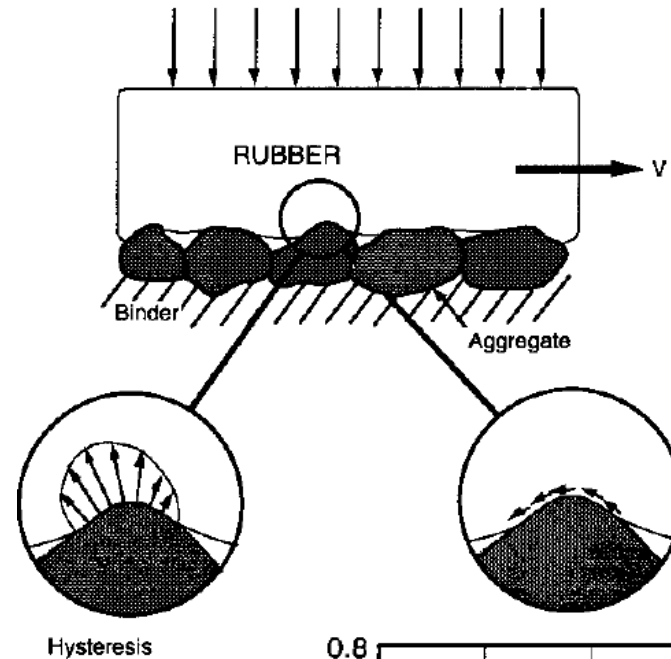
# Atrito entre Pneu e Pavimento (escorregamento)

## Adesão

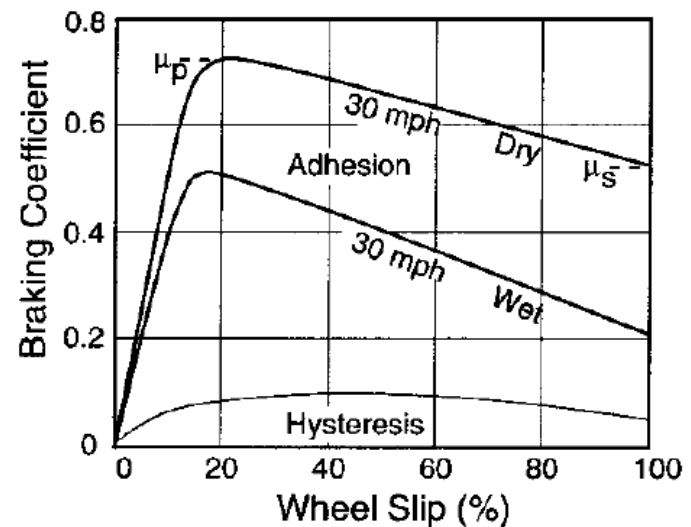
- maior parcela (no seco)
- Diminui muito se contaminação com água

## Histerese do material

- menor parcela (no seco)
- pavimento molhado

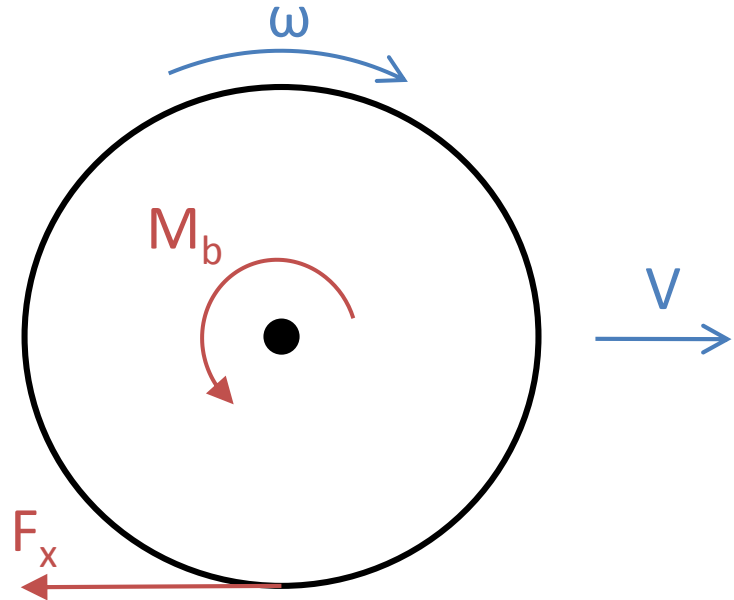
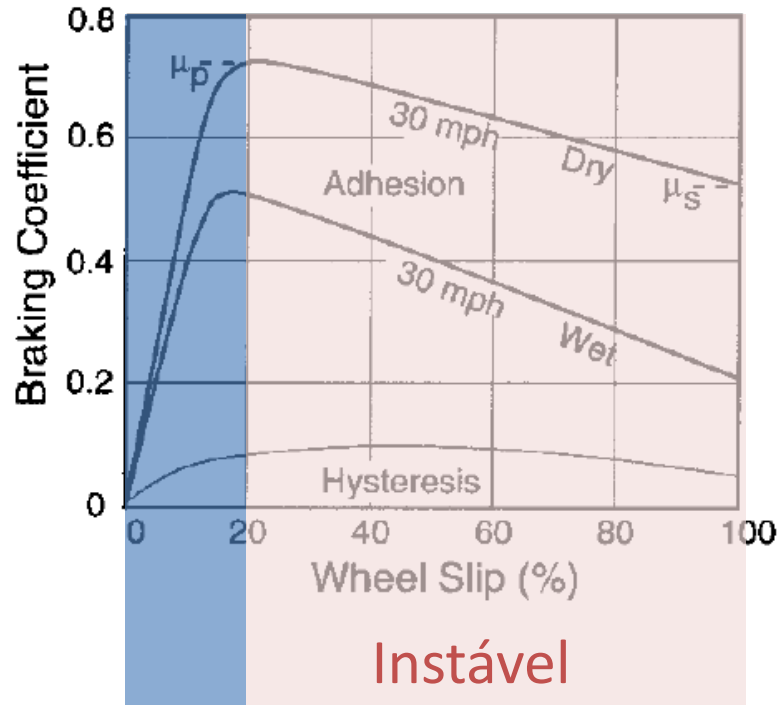


$$\text{Slip} = \frac{V - \omega r}{V}$$



# Travamento da Roda (Wheel Lockup)

$$\text{Slip} = \frac{V - \omega r}{V}$$



## Estável

aumento do slip causa aumento de  $F_x$ , acelerando roda e diminuindo slip

## Instável

aumento do slip causa diminuição em  $F_x$ , o que causa desaceleração da roda e aumento ainda maior do slip.

# Travamento da Roda (Wheel Lockup)

## **Travamento das rodas dianteiras**

- Perda na capacidade de controlar direção do veículo (manobrabilidade)
- Veículo continua em movimento retilíneo
- Sistema análogo: pêndulo

## **Travamento das rodas traseiras**

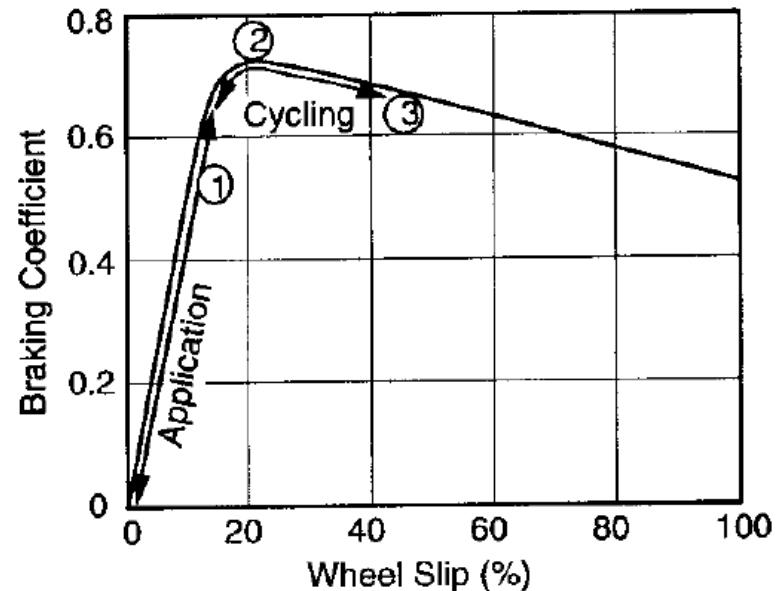
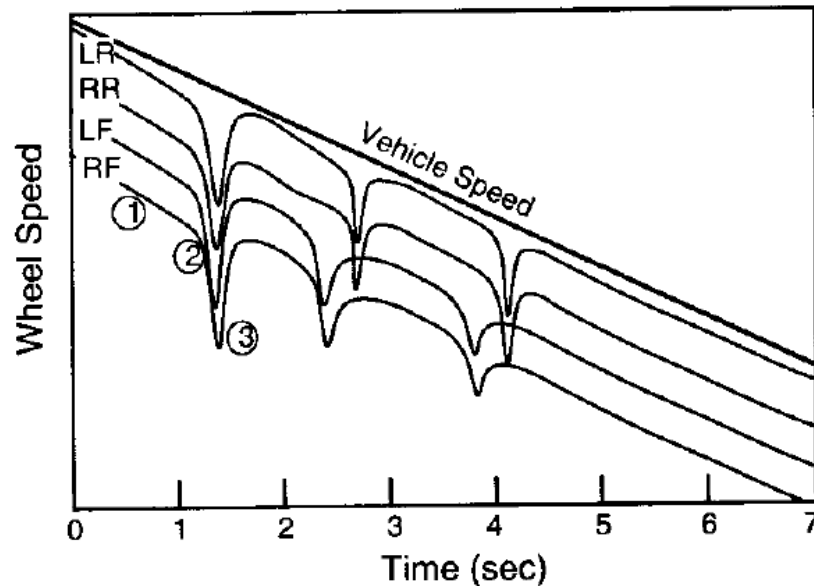
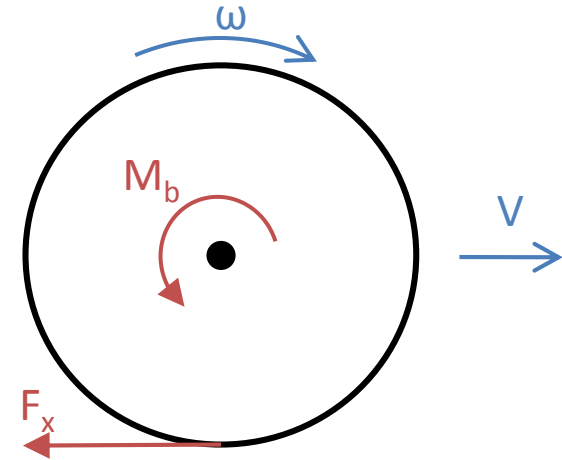
- Sistema instável
- Sistema análogo: pêndulo invertido
- Qualquer perturbação causa divergência e “rodopio” do veículo
- Veículo rodopia até ficar de ré



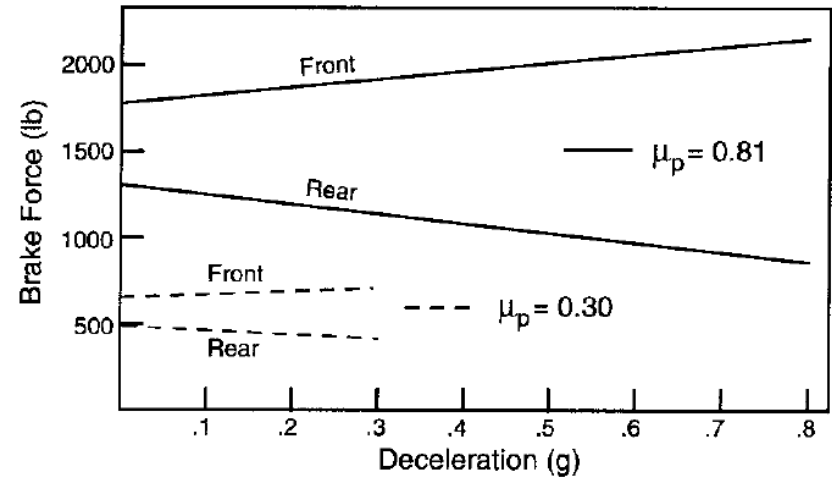
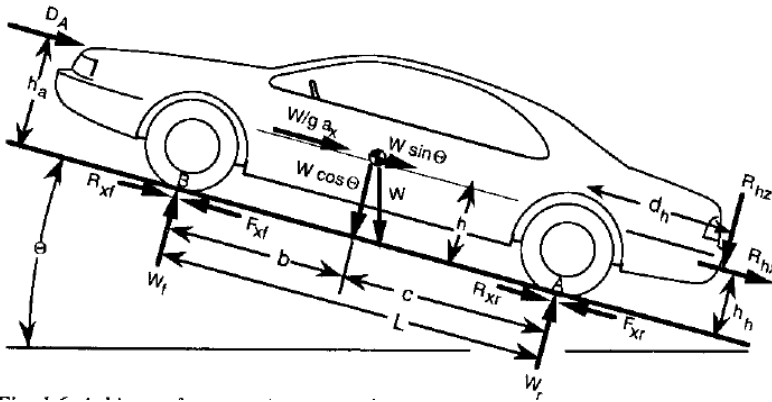
# Anti-Lock Braking System (ABS)

## Componentes

- Sensor de velocidade da roda
- Solenóide (controle de válvulas e bomba)
- Unidade de controle



# Distribuição dos Força de Frenagem



$$W_f = \frac{c}{L} W + \frac{h}{L} \frac{W}{g} D_x = W_{fs} + W_d$$

$$W_r = \frac{b}{L} W - \frac{h}{L} \frac{W}{g} D_x = W_{rs} - W_d$$



$$F_{xmf} = \mu_p W_f = \mu_p (W_{fs} + \frac{h}{L} \frac{W}{g} D_x)$$

$$F_{xmr} = \mu_p W_r = \mu_p (W_{rs} - \frac{h}{L} \frac{W}{g} D_x)$$

# Distribuição das Força de Frenagem

Força de frenagem máxima (em cada eixo)

$$F_{xmf} = \mu_p W_f = \mu_p (W_{fs} + \frac{h}{L} \frac{W}{g} D_x)$$

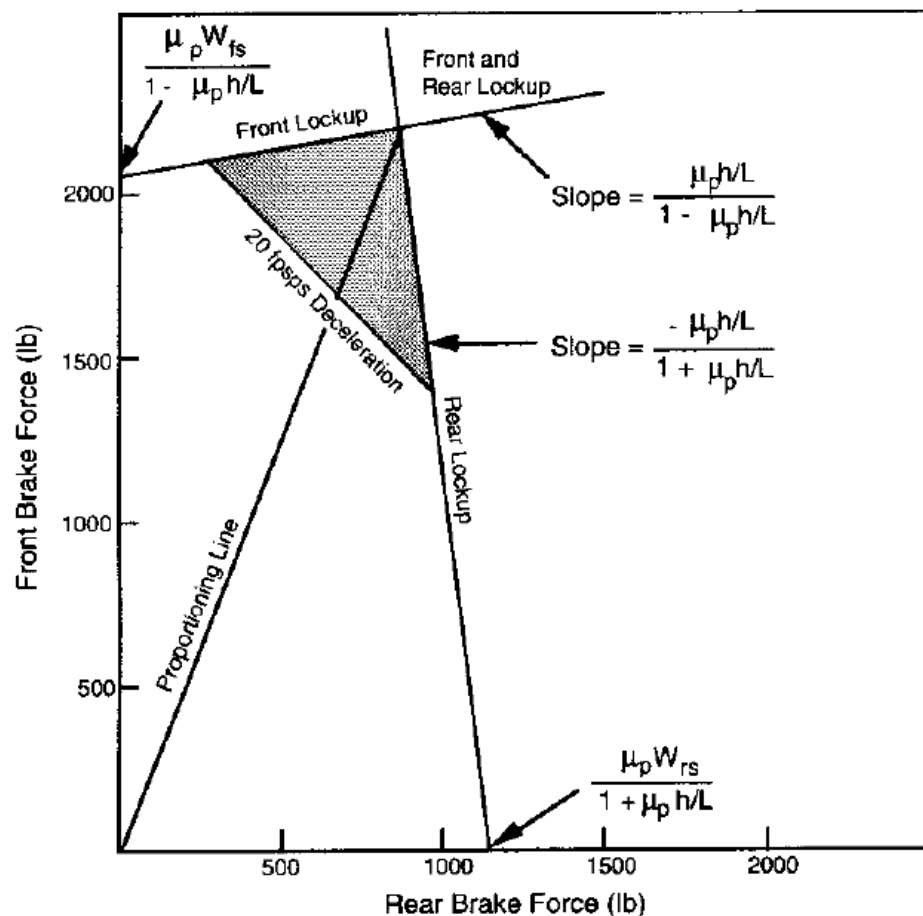
$$D_x = \frac{(F_{xmf} + F_{xrf})}{M}$$

$$F_{xmr} = \mu_p W_r = \mu_p (W_{rs} - \frac{h}{L} \frac{W}{g} D_x)$$

$$D_x = \frac{(F_{xmr} + F_{xf})}{M}$$

$$F_{xmf} = \frac{\mu_p (W_{fs} + \frac{h}{L} F_{xrf})}{1 - \mu_p \frac{h}{L}}$$

$$F_{xmr} = \frac{\mu_p (W_{rs} - \frac{h}{L} F_{xf})}{1 + \mu_p \frac{h}{L}}$$



# Distribuição dos Força de Frenagem

**Projeto do sistema de distribuição de freios deve levar em conta:**

- variações nas propriedades do pavimento (seco vs. molhado, concreto vs. asfalto, etc.)
- distribuição de carga entre eixo frontal e traseiro (plano inclinado, arrasto, aceleração, posição horizontal do CG, etc.)
- altura do CG
- diferentes requerimentos da norma

