



Fundamentos de Dinâmica Veicular
Sistemas de Direção

- Sistemas de direção
- Cinemática do esterçamento
- Erro de geometria
- Forças e momentos
- Esterçamento nas quatro rodas

Front wheel drive, steering and suspension, 3d animation

Flat3d

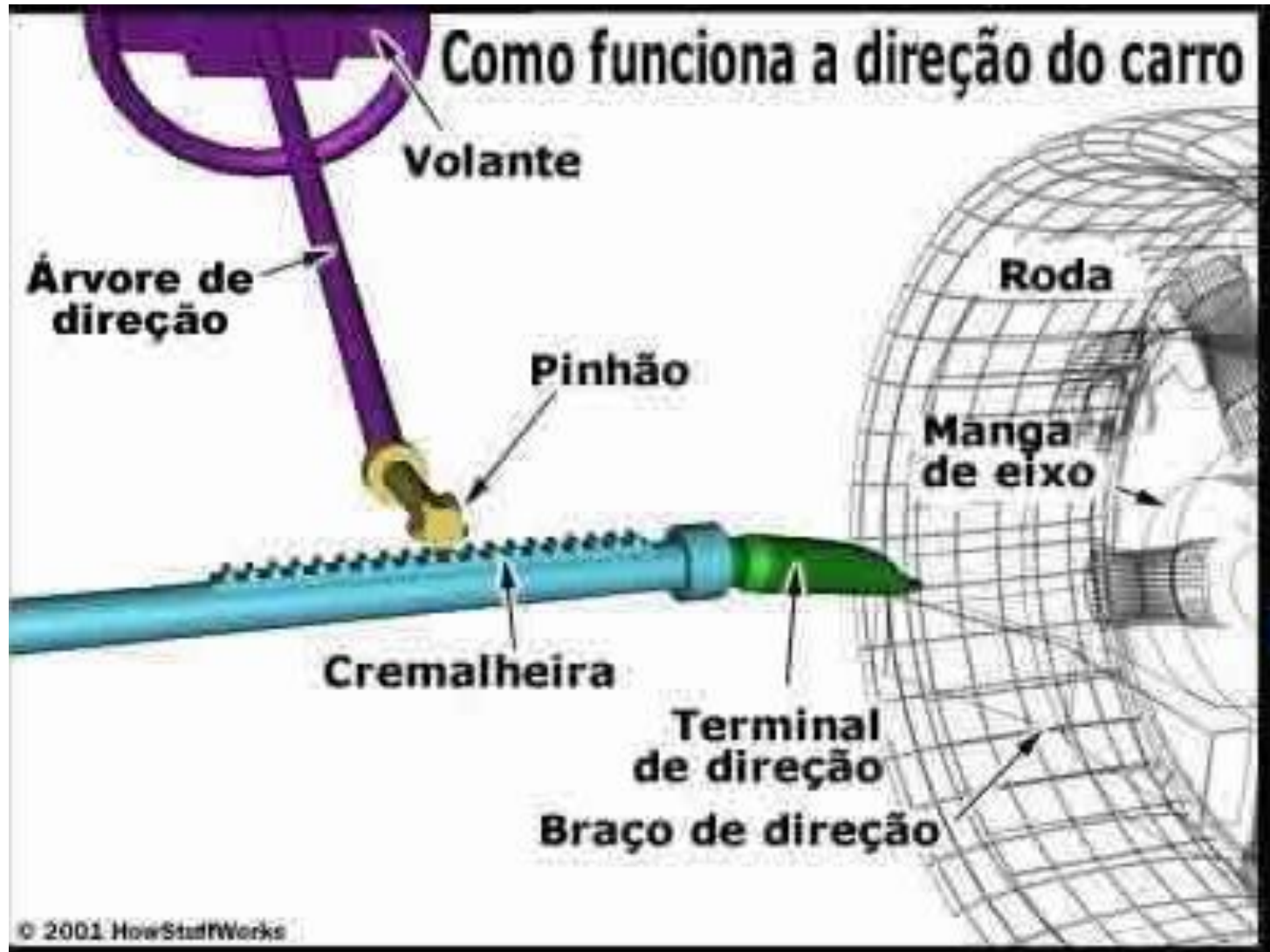


Front wheel drive, steering and suspension, 3d animation

<https://youtu.be/xAHmT-T29BM>

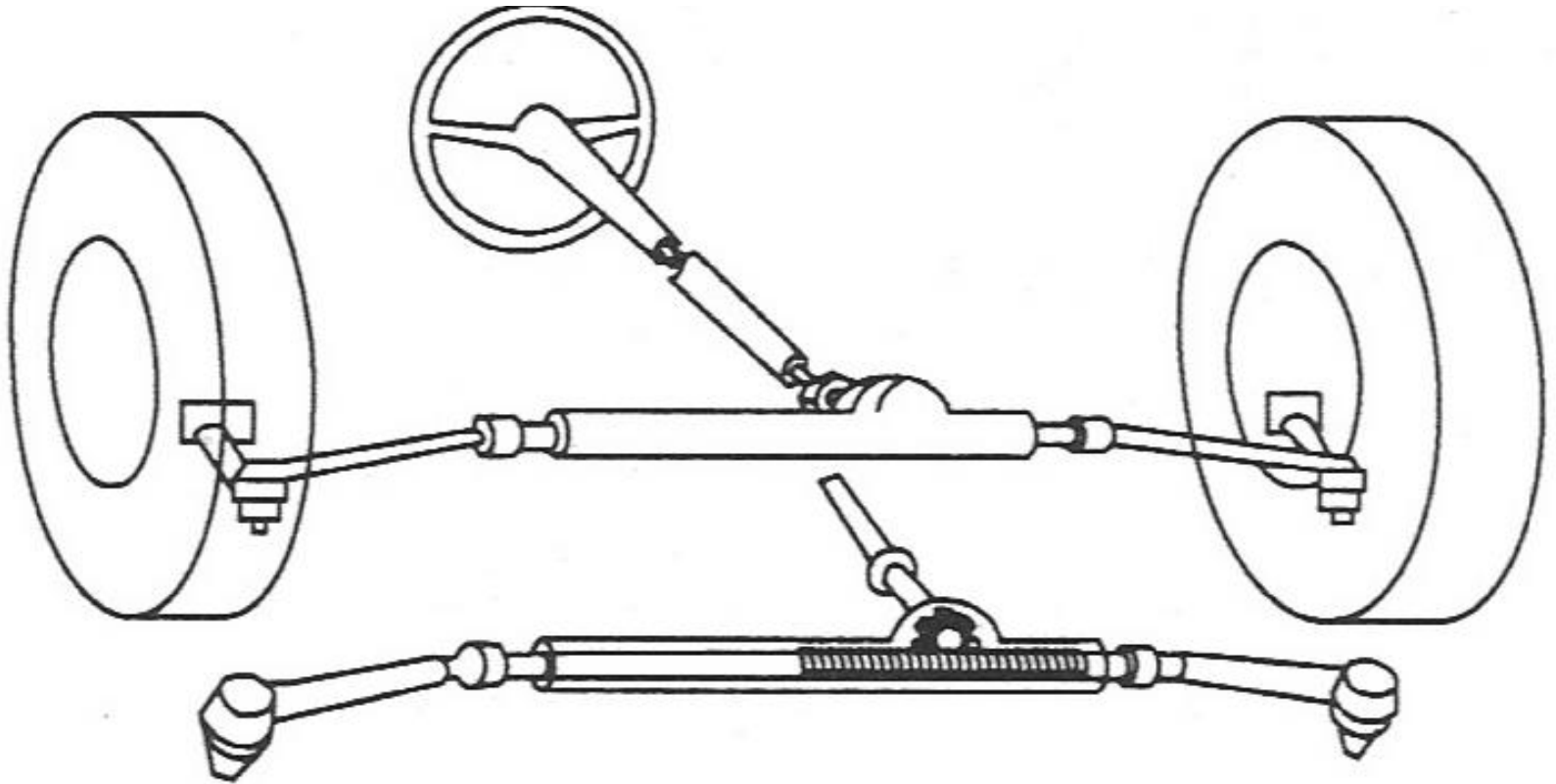
- **Sistemas de direção**
- Cinemática do esterçamento
- Erro de geometria
- Forças e momentos
- Esterçamento nas quatro rodas

Sistemas de direção



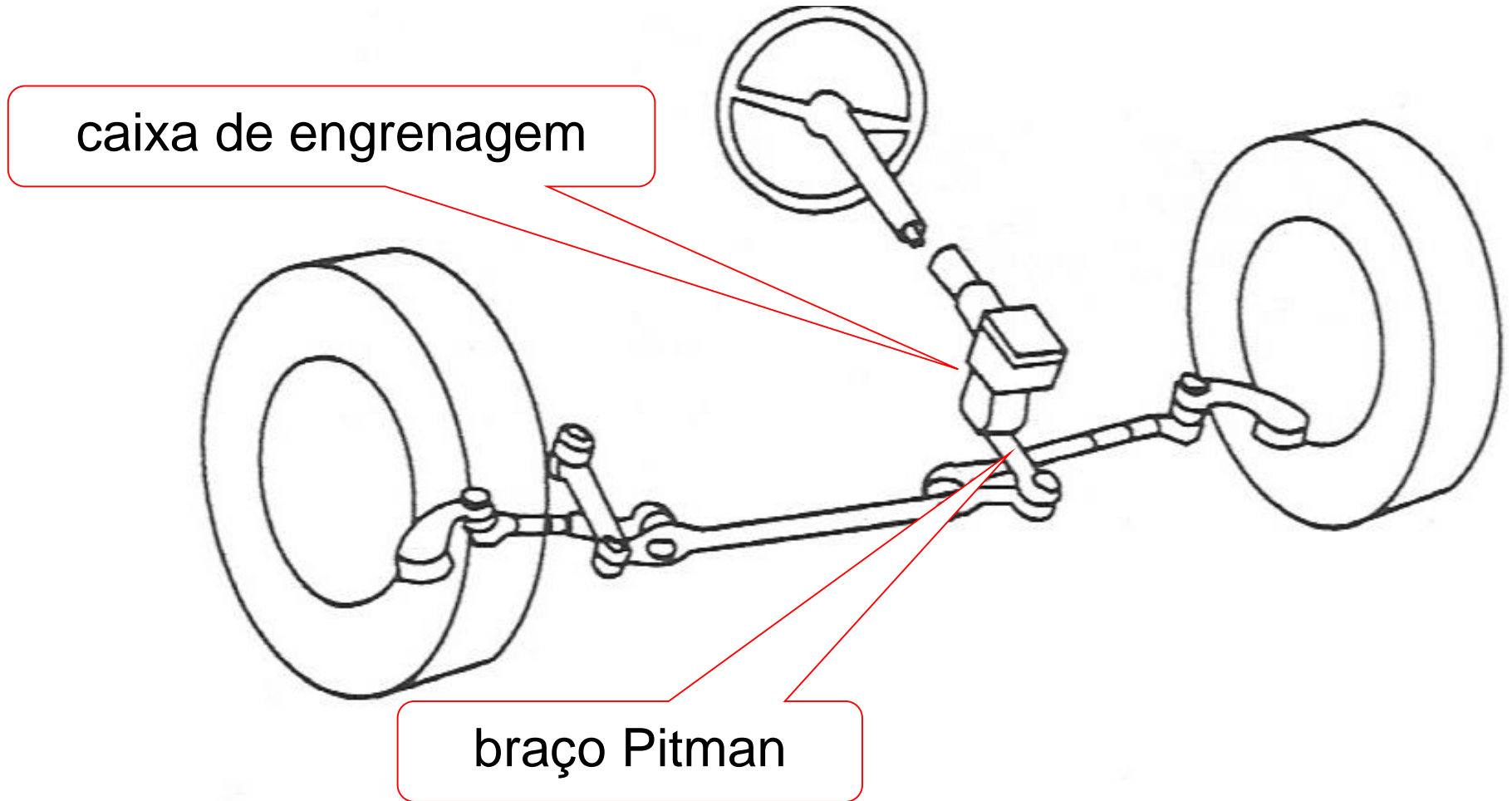
Car Steering System - <https://youtu.be/bX3JQgb7GZk>

Sistemas de direção



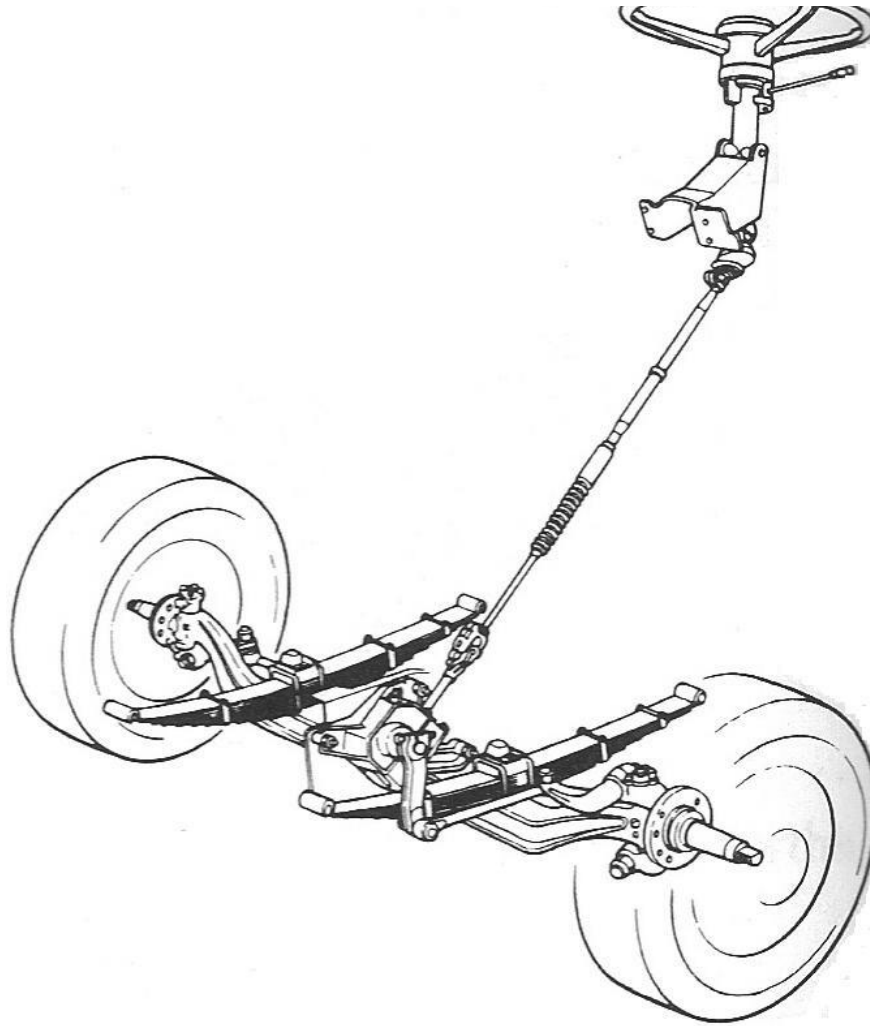
Rack-and-pinion linkage

Sistemas de direção



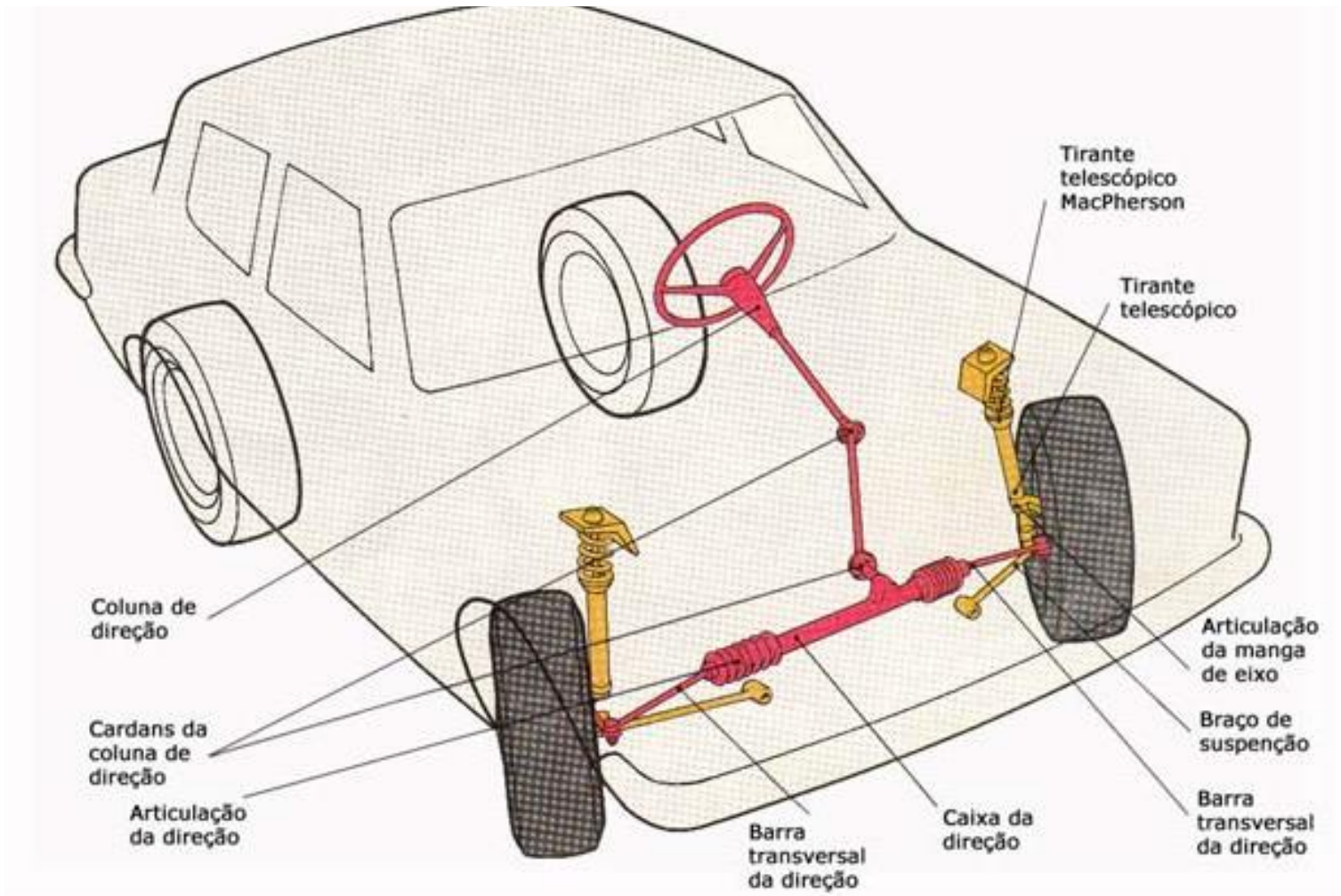
Steering gearbox

Sistemas de direção



Truck steering system

Sistemas de direção



Sistemas de direção

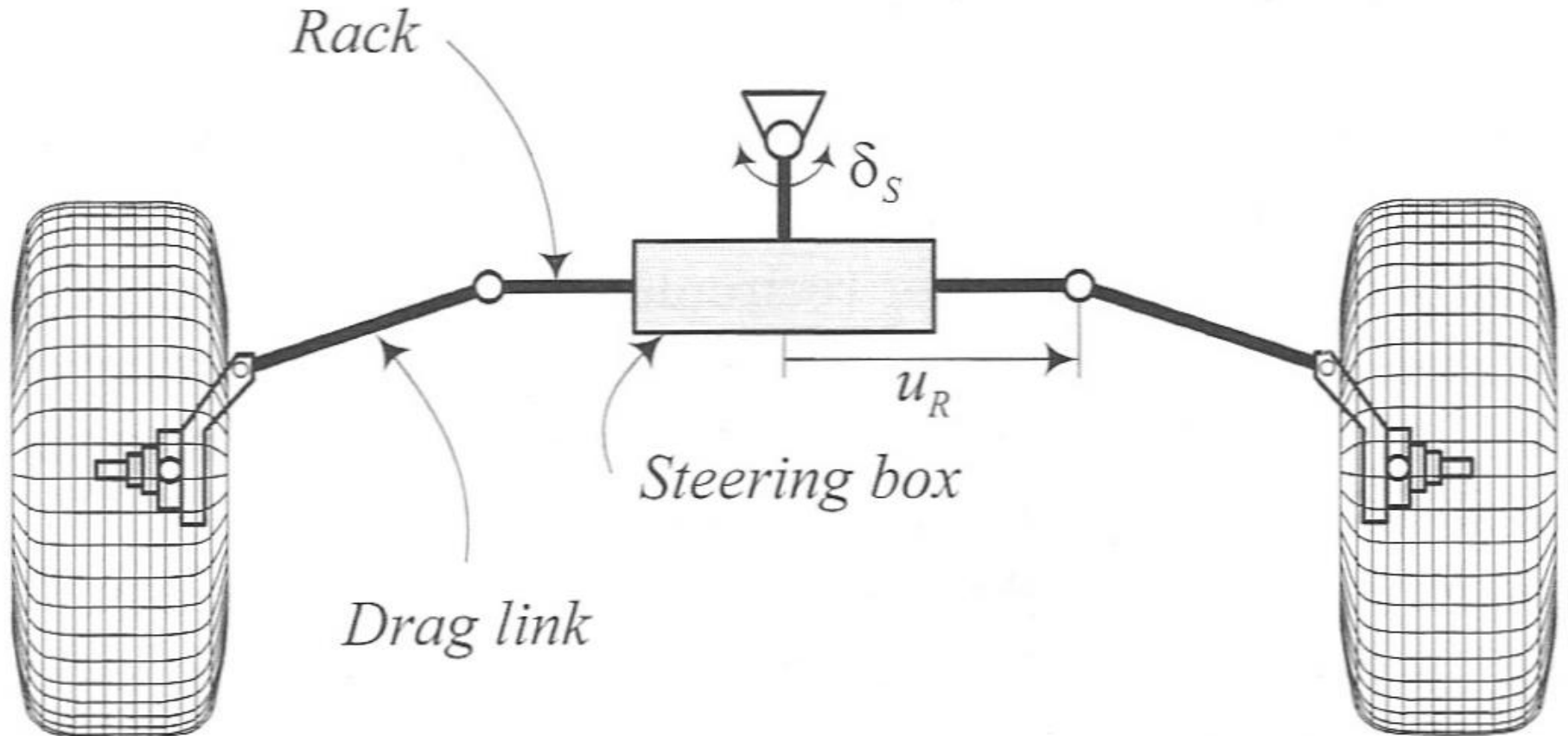


FIGURE 7.24. A rack-and-pinion steering system.

Sistemas de direção

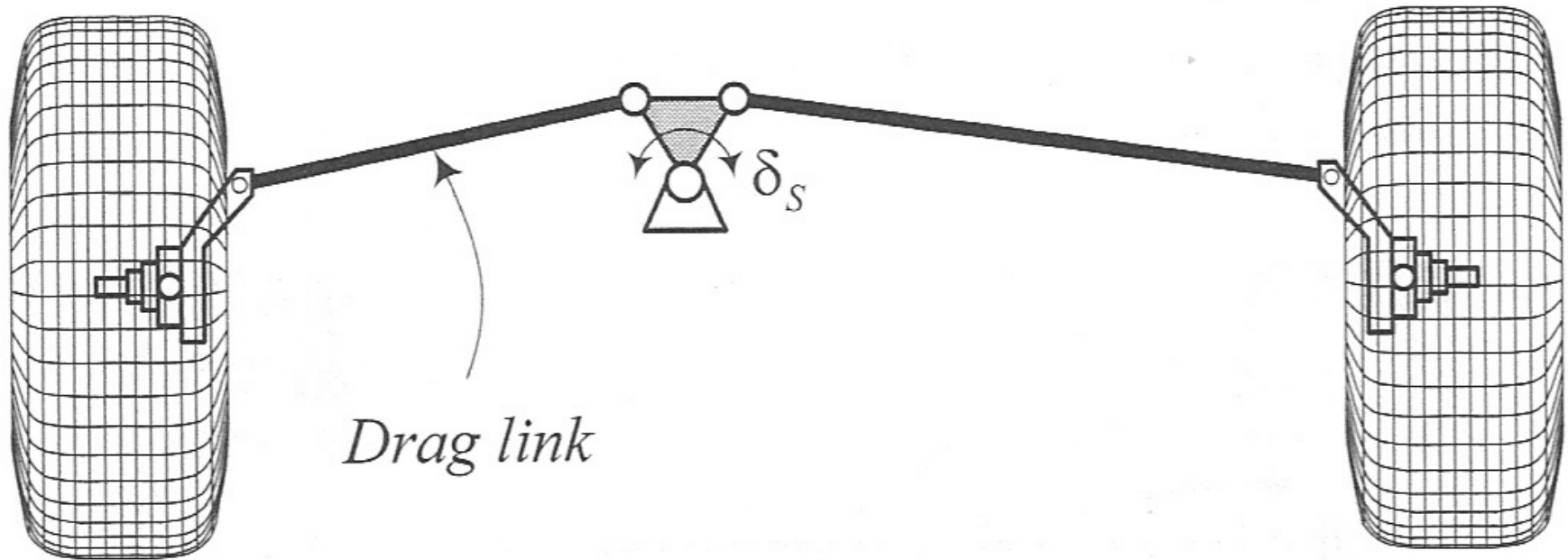


FIGURE 7.25. A lever arm steering system.

Sistemas de direção

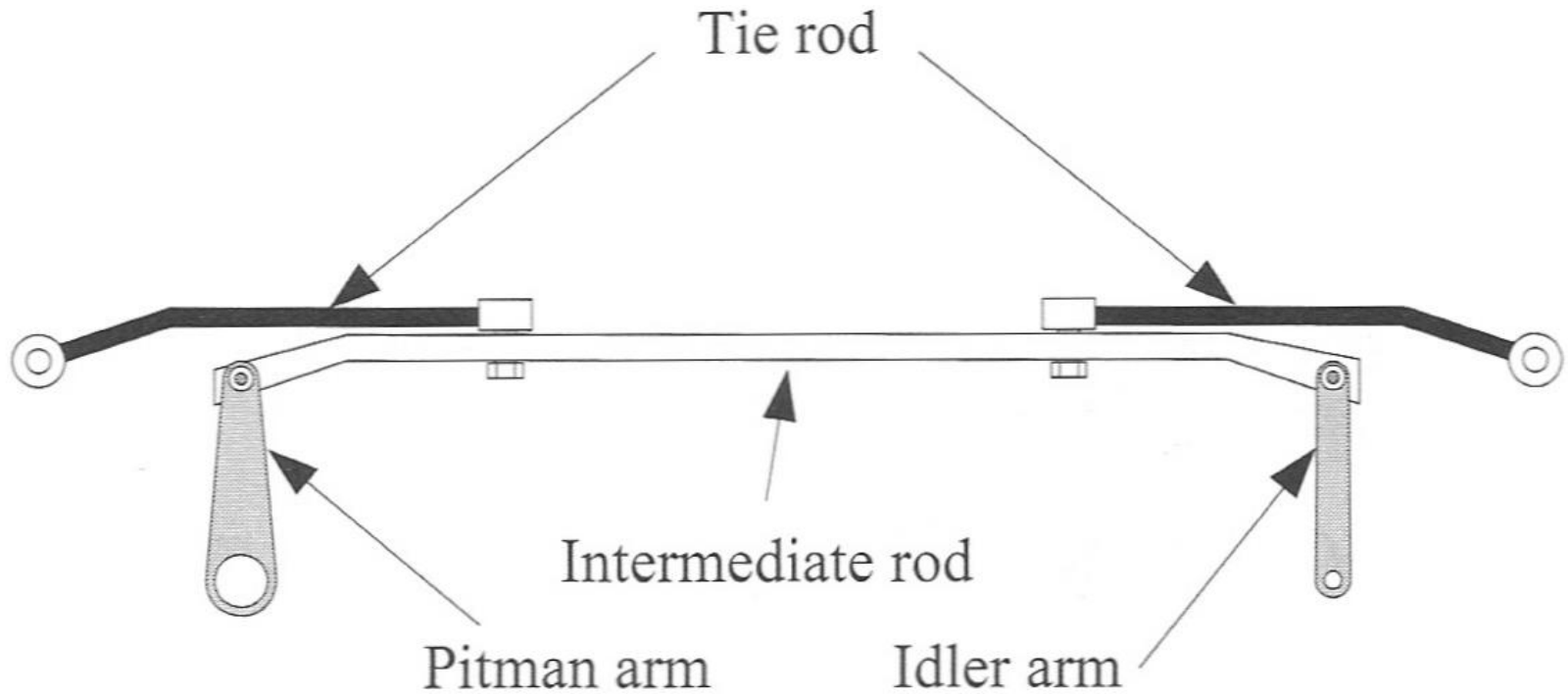


FIGURE 7.23. A sample parallelogram steering linkage and its components.

Sistemas de direção

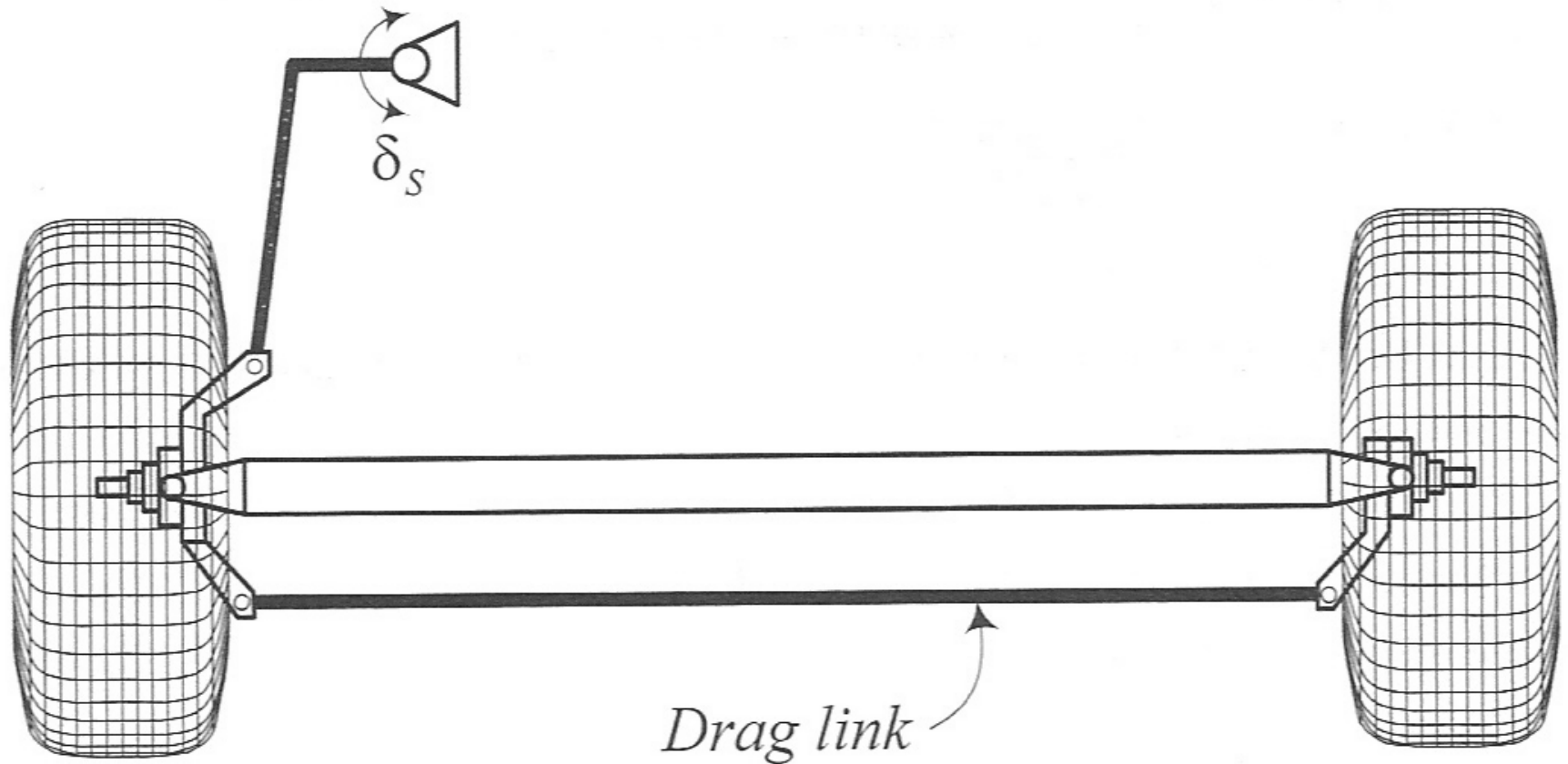


FIGURE 7.26. A drag link steering system.

Sistemas de direção

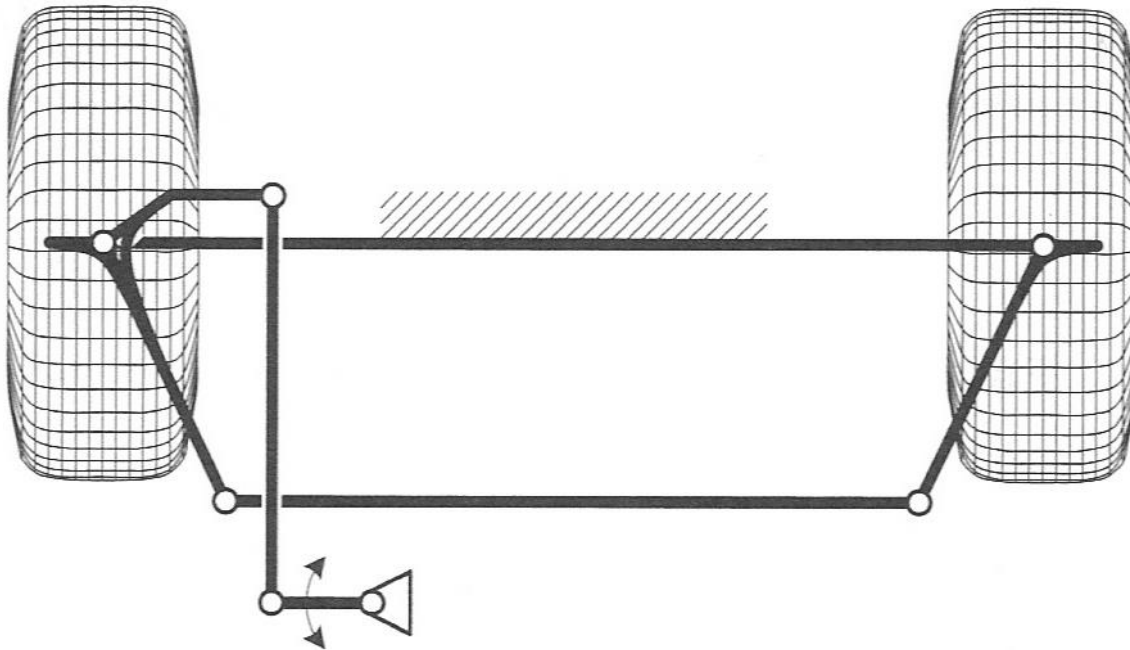


FIGURE 7.27. Connection of the Pitman arm to a trapezoidal steering mechanism.

Sistemas de direção

Animação Técnica - Sistema de Direção do Veículo

<http://www.youtube.com/watch?v=zE13huhOIBc>

Dispositivos de segurança

COLUNAS DE DIREÇÃO QUE CEDEM EM CASO DE COLISÃO



Modelo de coluna de direção que pode ser inclinada e dobra-se pelo cardan em caso de colisão.

Neste modelo, a parte inferior da coluna avança, deslizando sobre a parte superior, a fim de absorver a energia do choque.

Em caso de colisão, a rede metálica da coluna telescópica comprime-se para absorver o impacto.

Nesta aula

- Sistemas de direção
- **Cinemática do esterçamento**
- Erro de geometria
- Forças e momentos
- Esterçamento nas quatro rodas

Cinemática do esterçamento

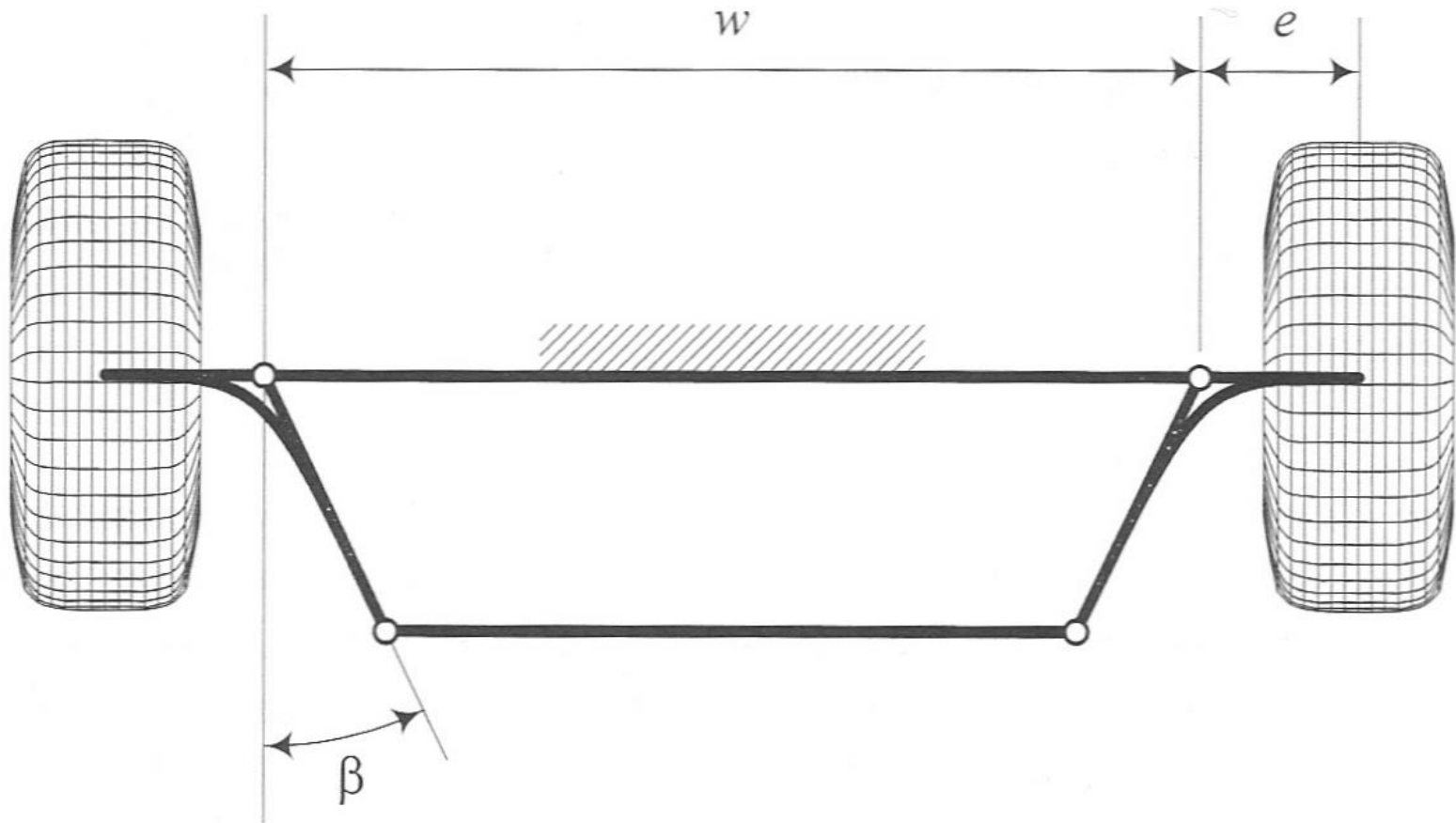


FIGURE 7.29. An offset design for wheel attachment to an steering mechanism.

Cinemática do esterçamento

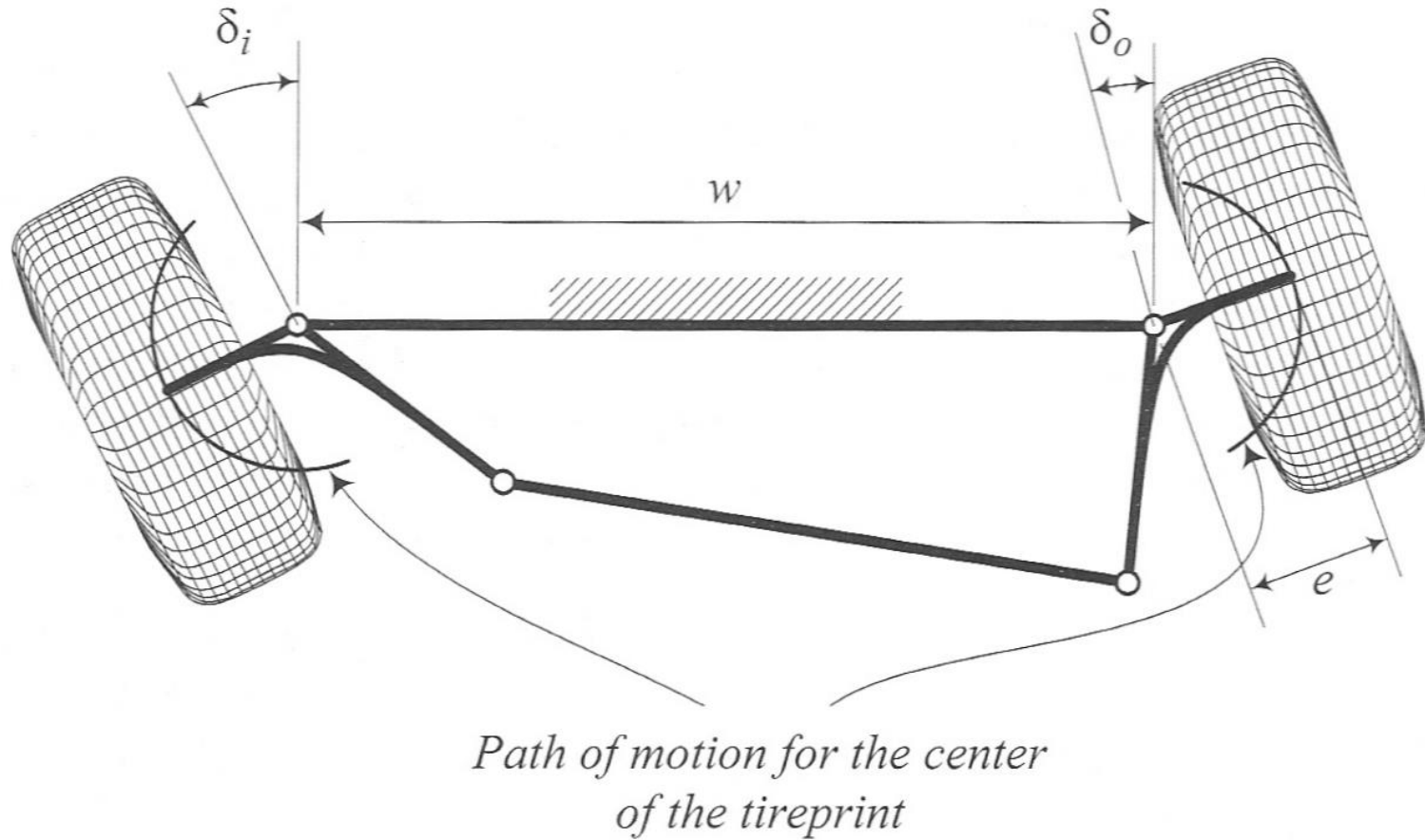


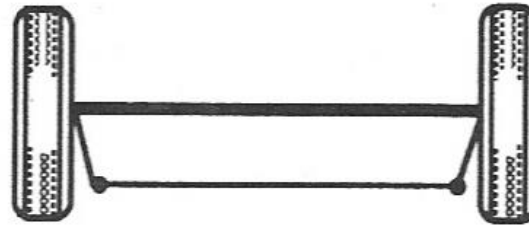
FIGURE 7.30. Offset attachment of steerable wheels to a trapezoidal steering mechanism.

Cinemática do esterçamento

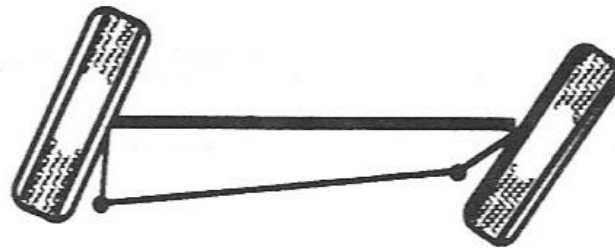
Ângulos de Ackerman

$$\tan \delta_o = \frac{L}{R + \frac{t}{2}} \Rightarrow \delta_o \cong \frac{L}{R + \frac{t}{2}}$$

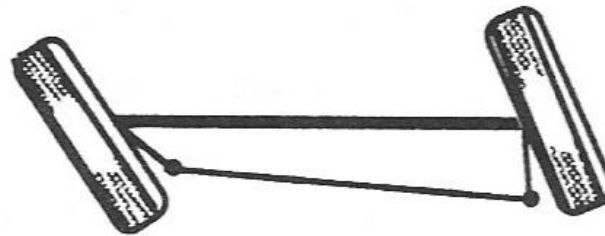
$$\tan \delta_i = \frac{L}{R - \frac{t}{2}} \Rightarrow \delta_i \cong \frac{L}{R - \frac{t}{2}}$$



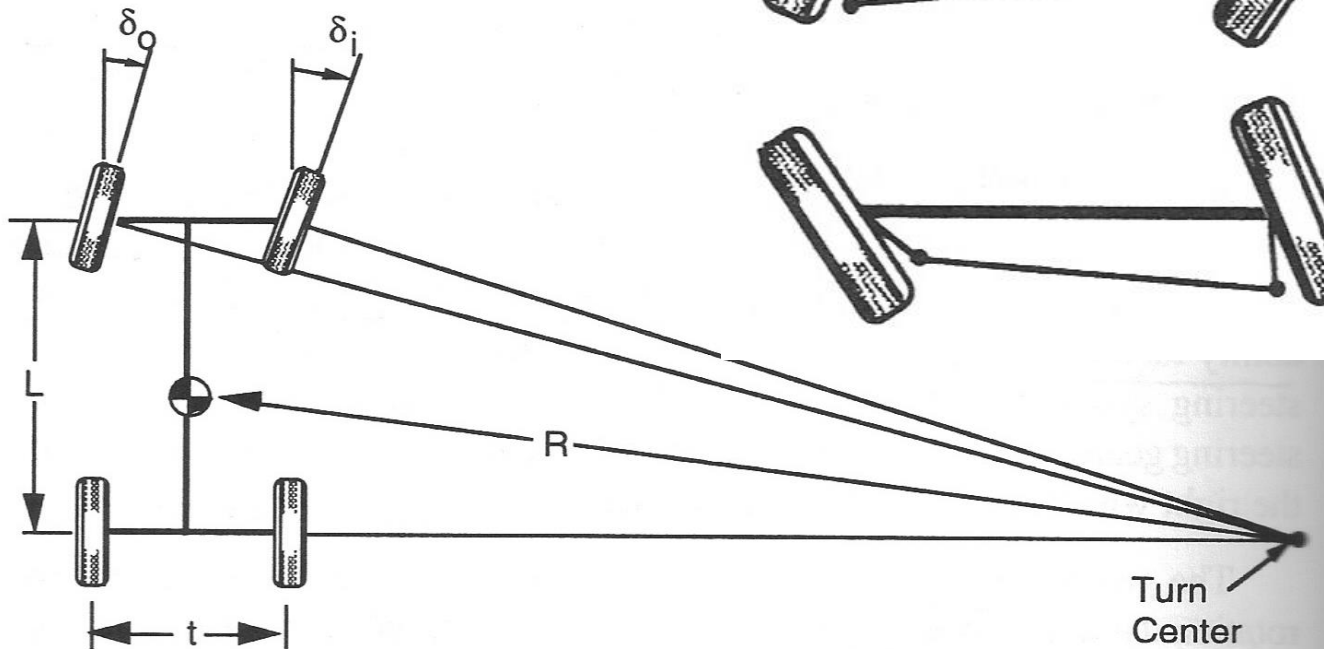
Trapezoidal
Geometry



Right Turn



Left Turn



Cinemática do esterçamento

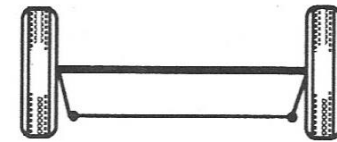
RAZÃO DE ESTERÇAMENTO

Relação entre o ângulo do volante e o ângulo da roda

Valores típicos:

veículos de passageiros \Rightarrow 15:1

veículos pesados \Rightarrow até 36:1



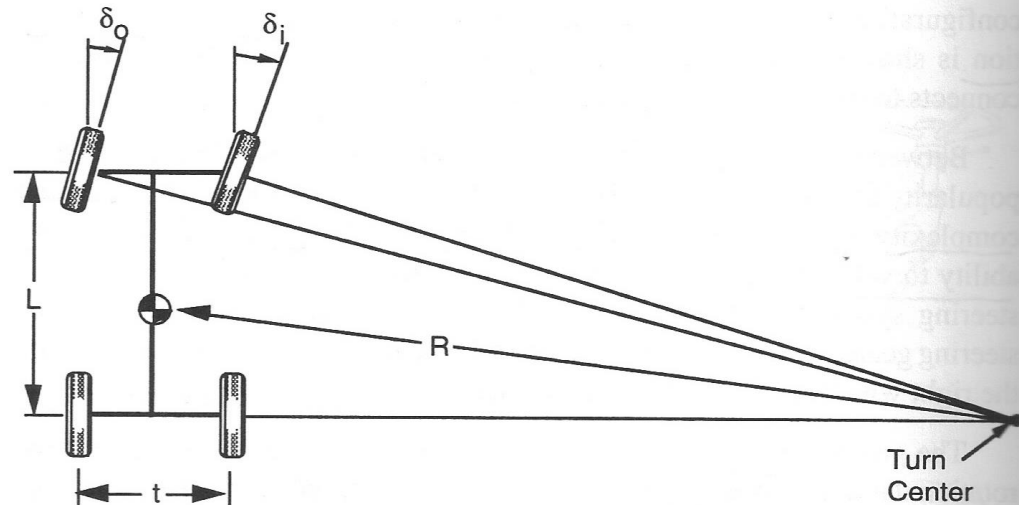
Trapezoidal Geometry



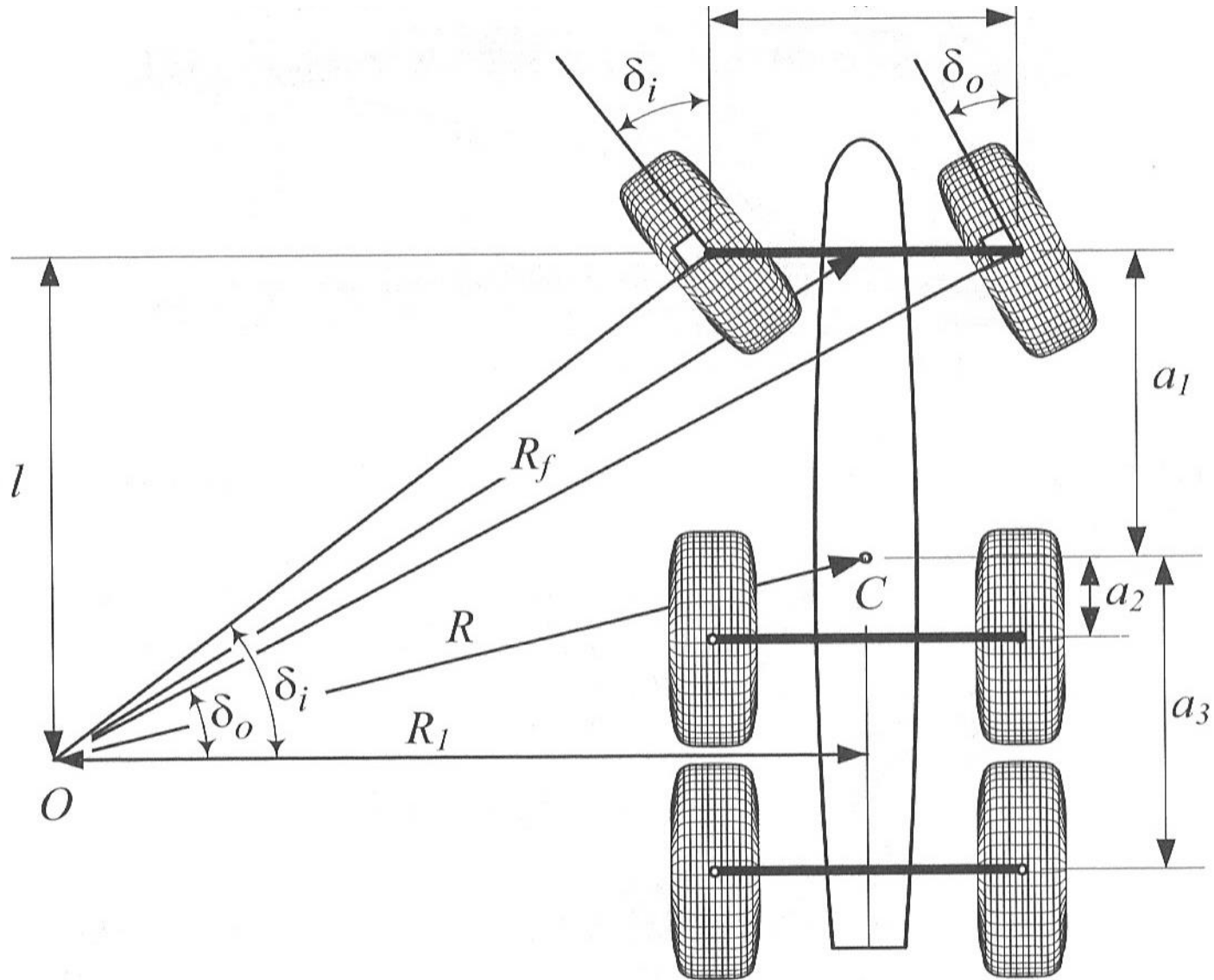
Right Turn



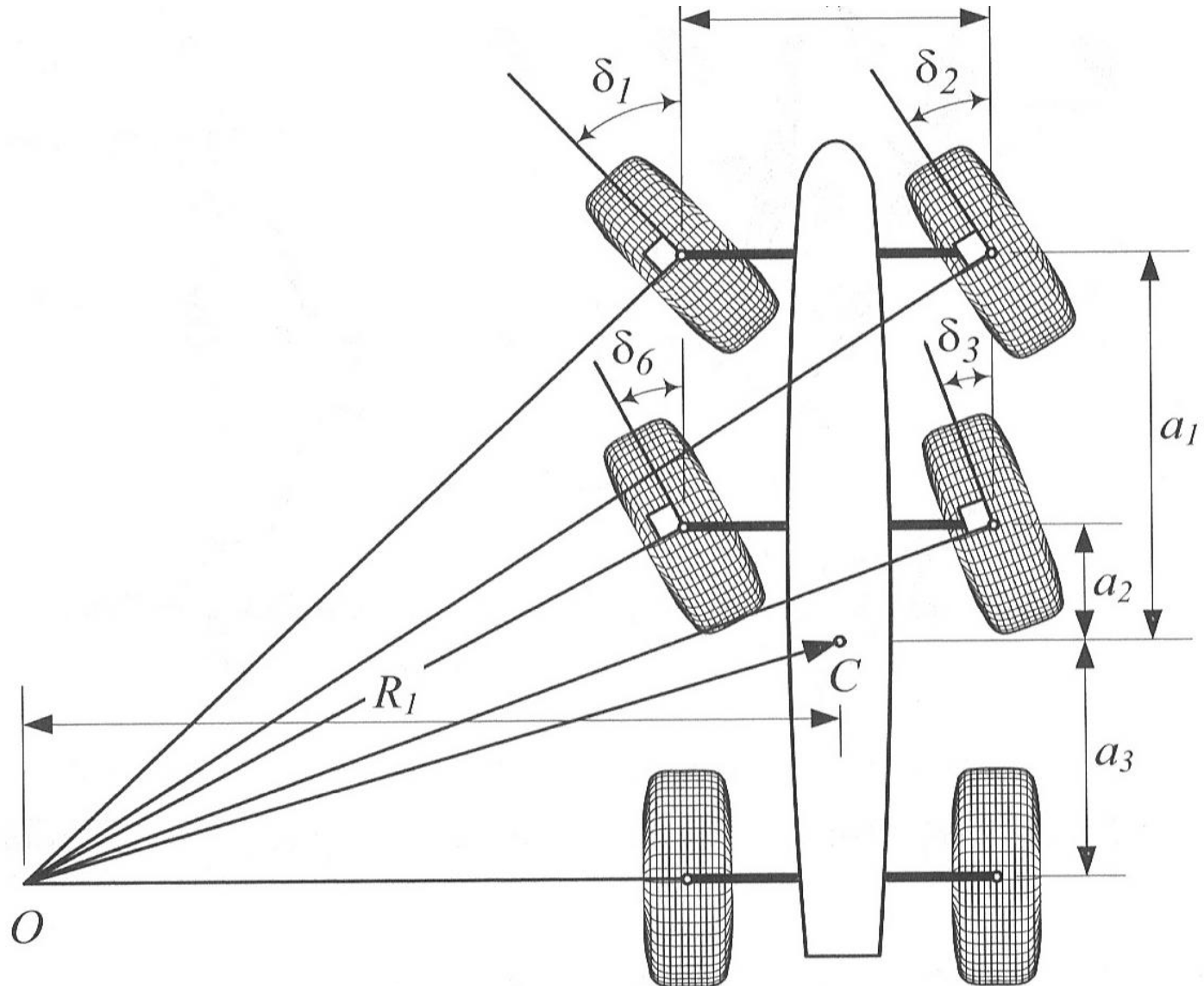
Left Turn



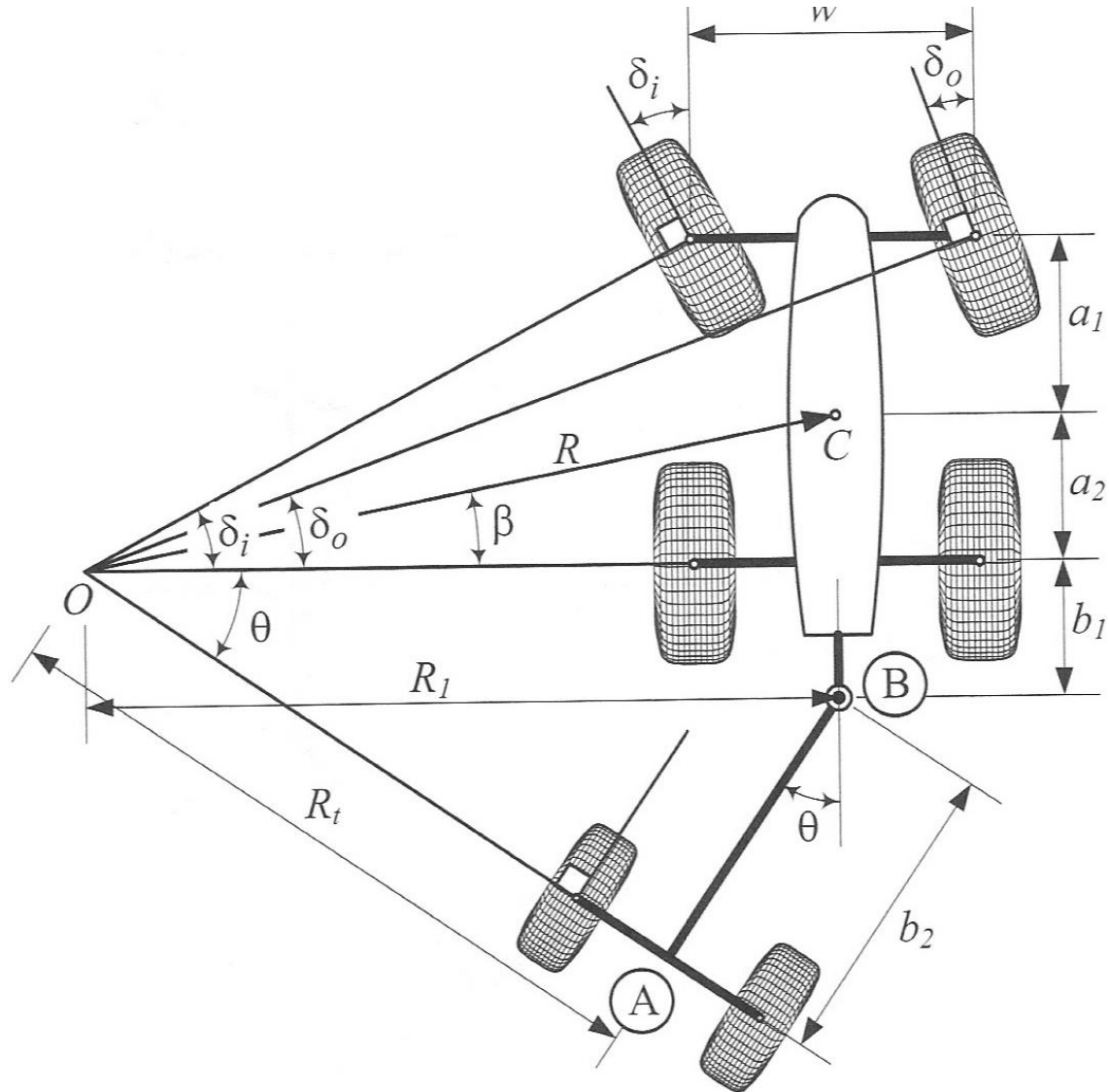
Veículo com três eixos



Veículo com três eixos



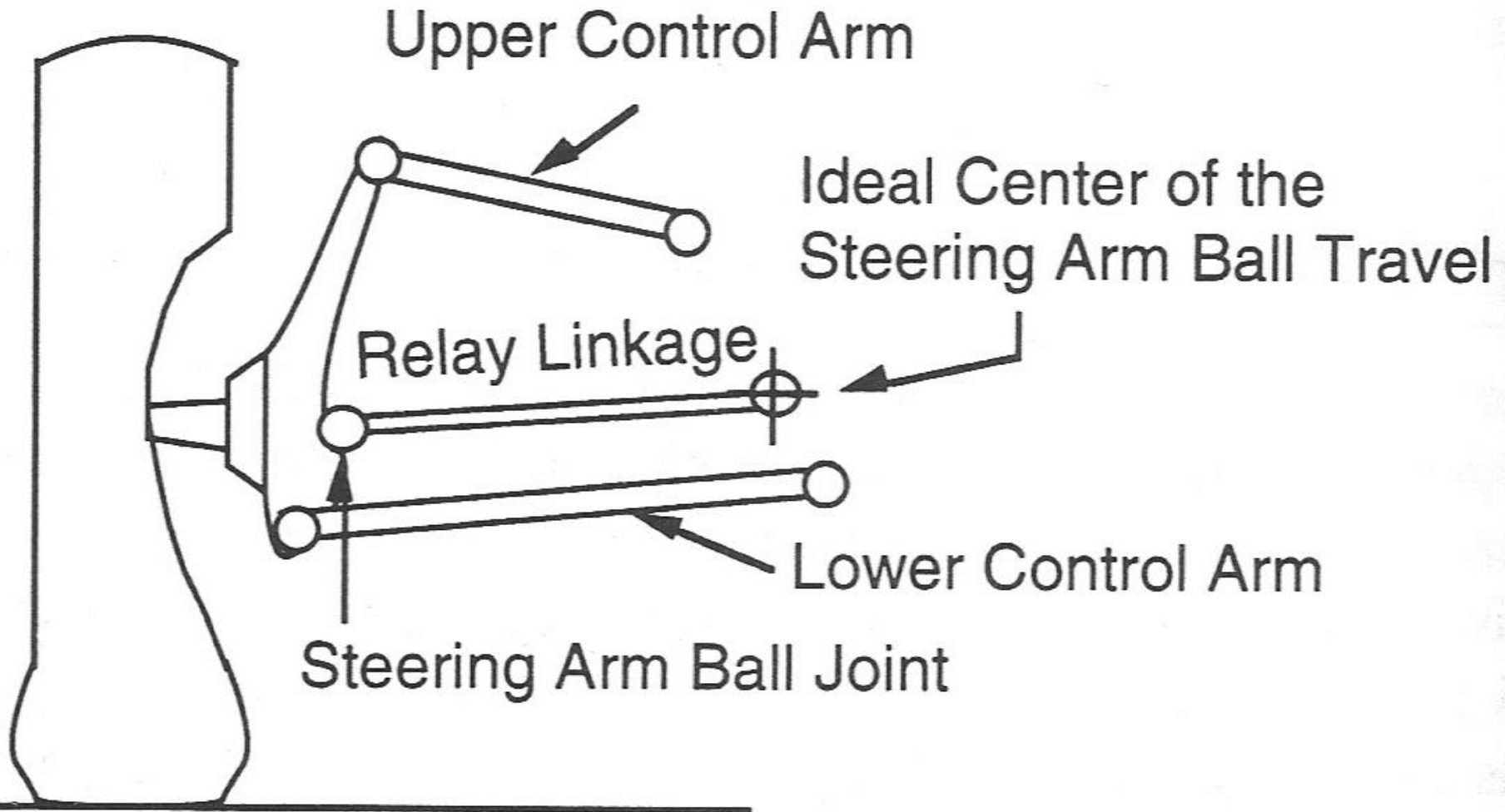
Reboque com eixo



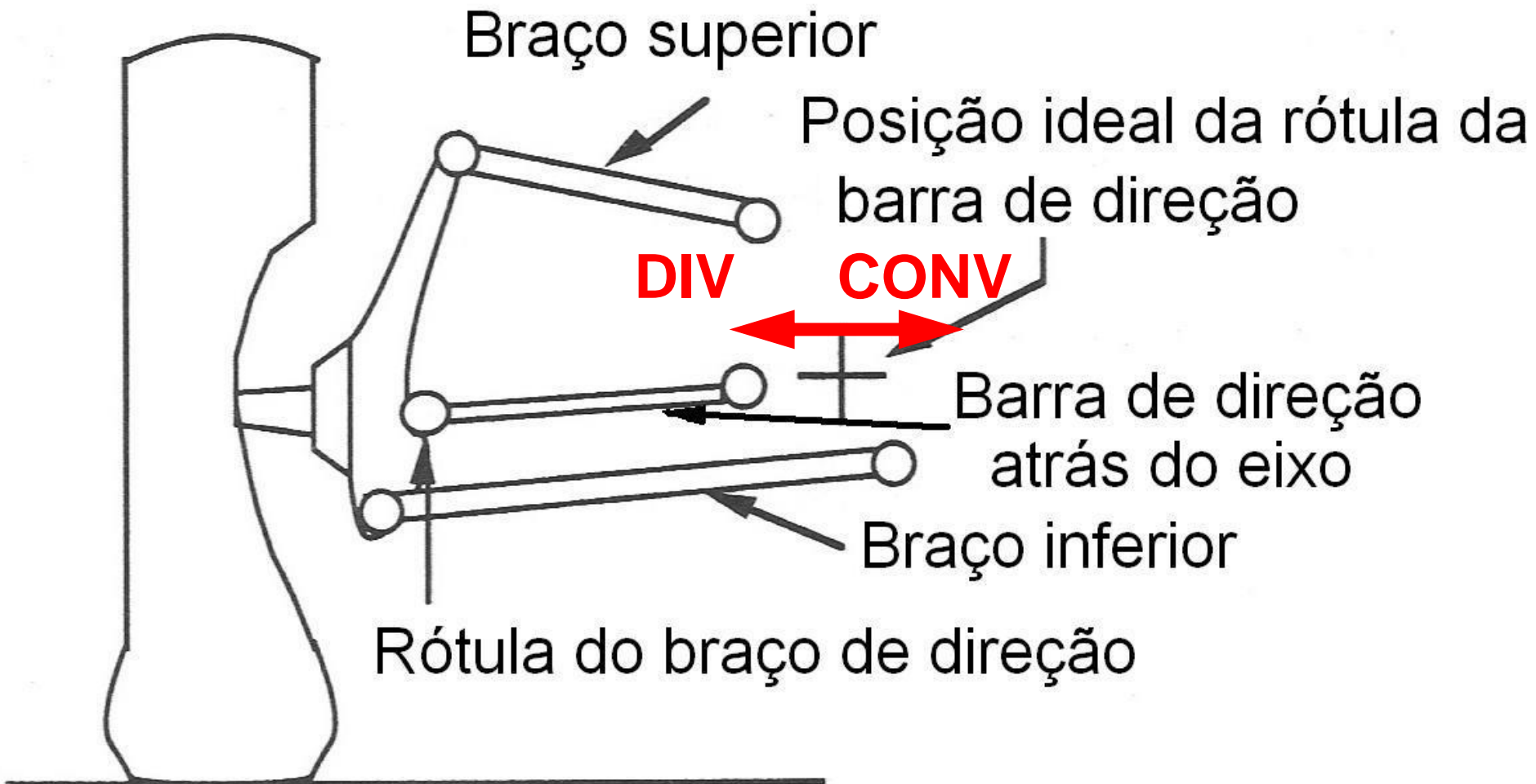
Nesta aula

- Sistemas de direção
- Cinemática do esterçamento
- **Erro de geometria**
- Forças e momentos
- Esterçamento nas quatro rodas

Geometria ideal para uma suspensão independente

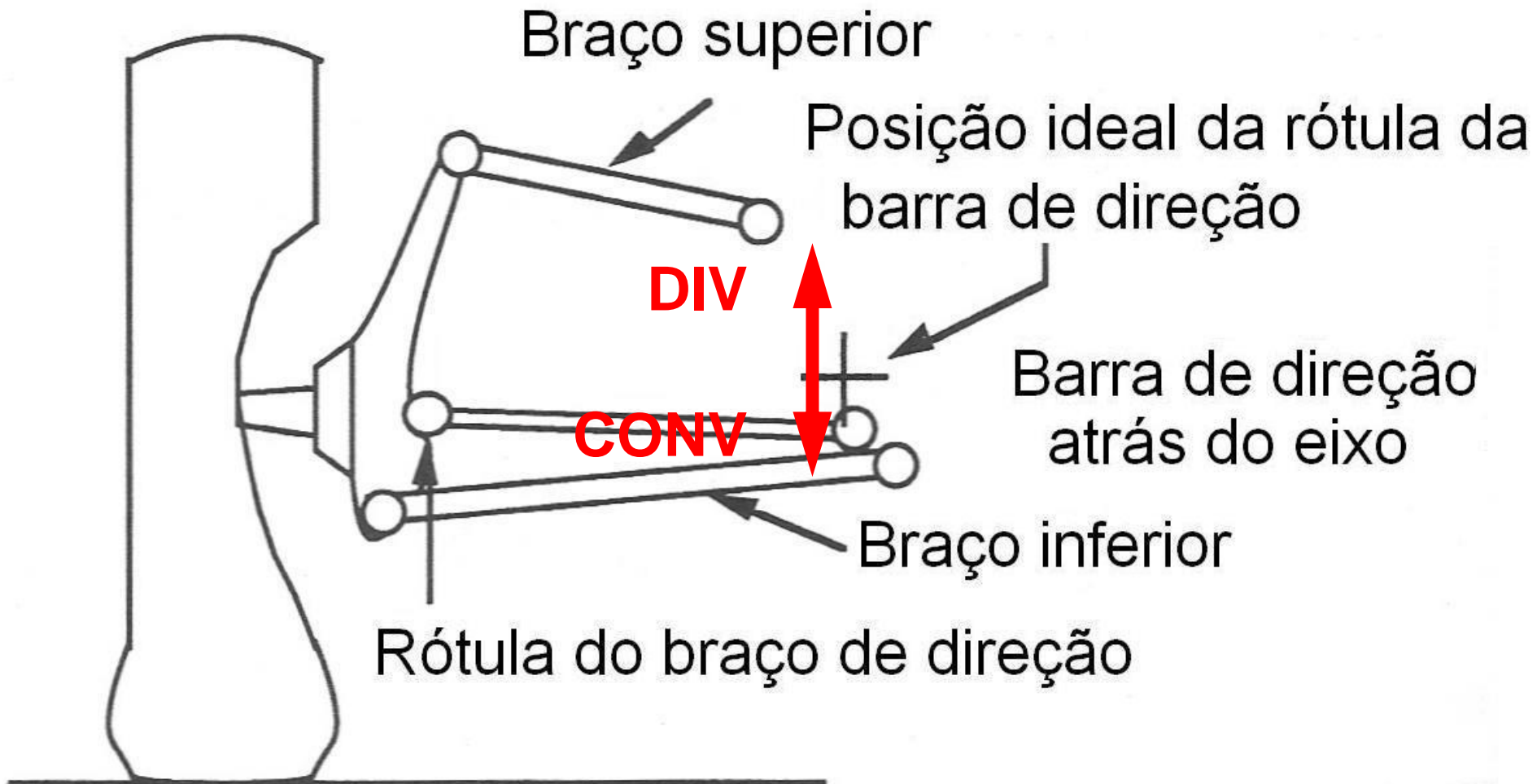


Alterações na convergência (*bump steer*)

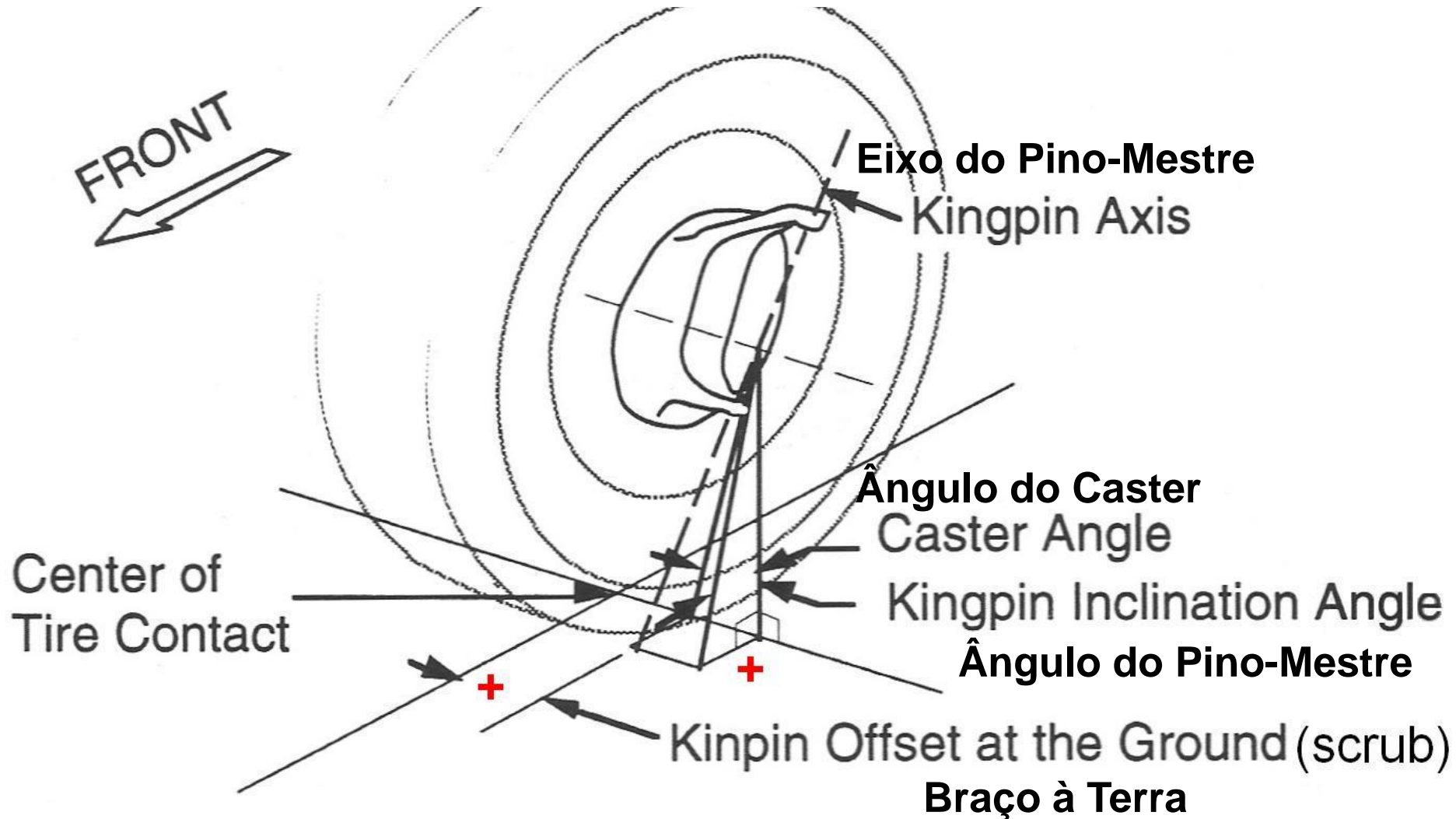


Ocorre divergência quando a suspensão trabalha

Erro na geometria - *roll steer*



Geometria do esterçamento

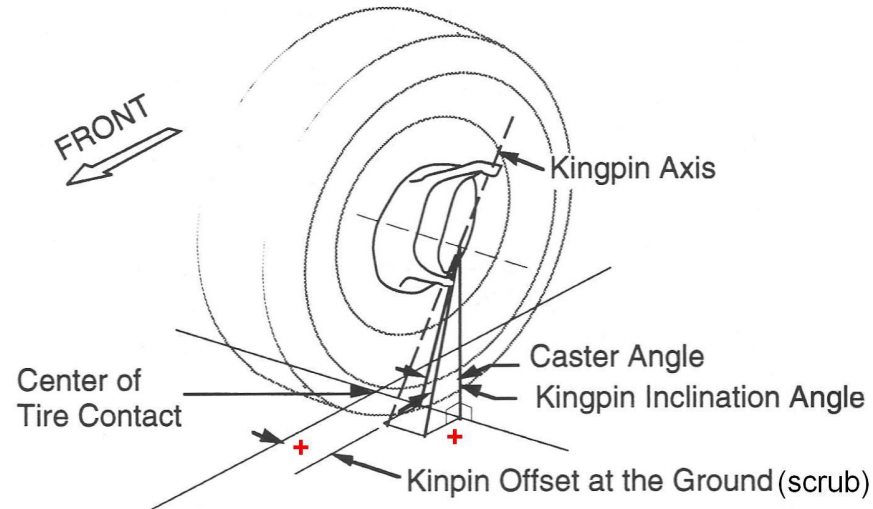


Geometria do esterçamento



Geometria do esterçamento

veículo	Pino Mestre	Caster
caminhões	$0^{\circ} - 5^{\circ}$	$0^{\circ} - 5^{\circ}$
carros	$10^{\circ} - 15^{\circ}$	$0^{\circ} - 5^{\circ}$



Cambagem e convergência são definidos de modo a ficarem em torno de 0° nas mais variadas condições de funcionamento.

Nesta aula

- Sistemas de direção
- Cinemática do esterçamento
- Erro de geometria
- **Forças e momentos**
- Esterçamento nas quatro rodas

Forças e momentos sobre uma roda

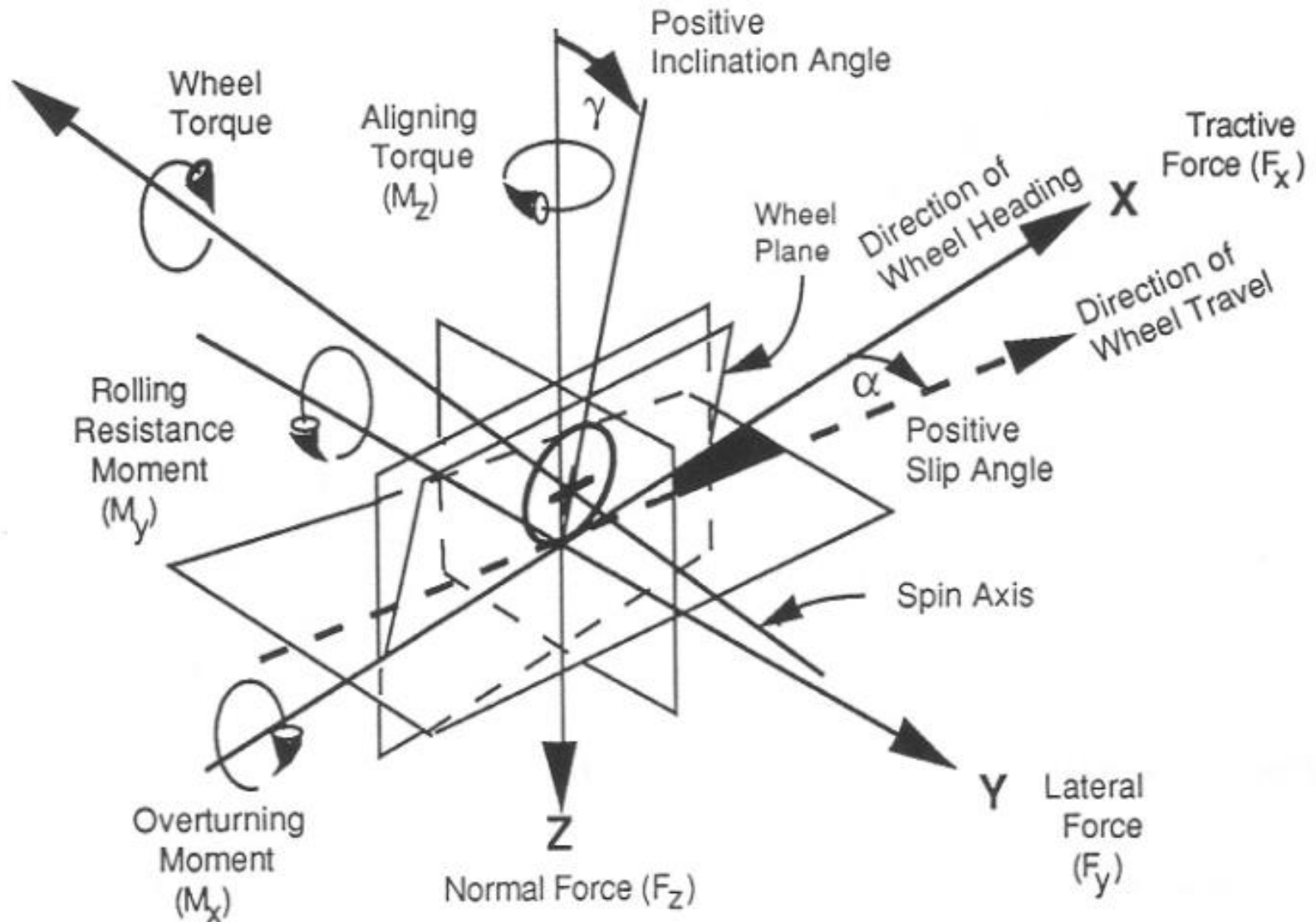
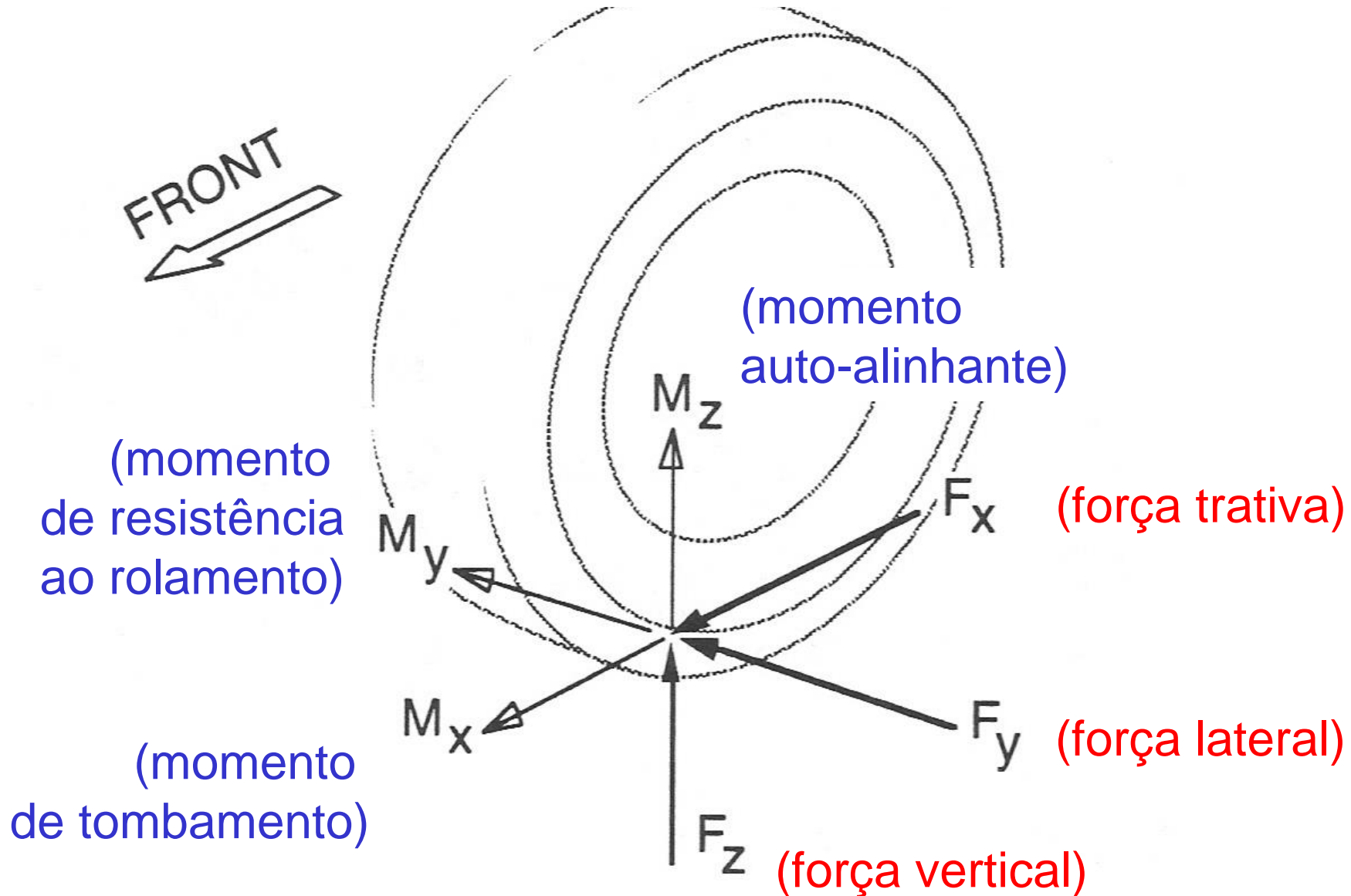


Fig. 8.9 SAE tire force and moment axis system.

Forças e momentos sobre uma roda



Momento produzido pela força vertical

$$M_V = \underbrace{-(F_{zl} + F_{zr}) \cdot d \cdot \sin \lambda \cdot \sin \delta}_{\text{influenciado pinomestre}} + \underbrace{(F_{zl} - F_{zr}) \cdot d \cdot \sin \nu \cdot \cos \delta}_{\text{influenciado caster}}$$

M_V = momento total das duas rodas

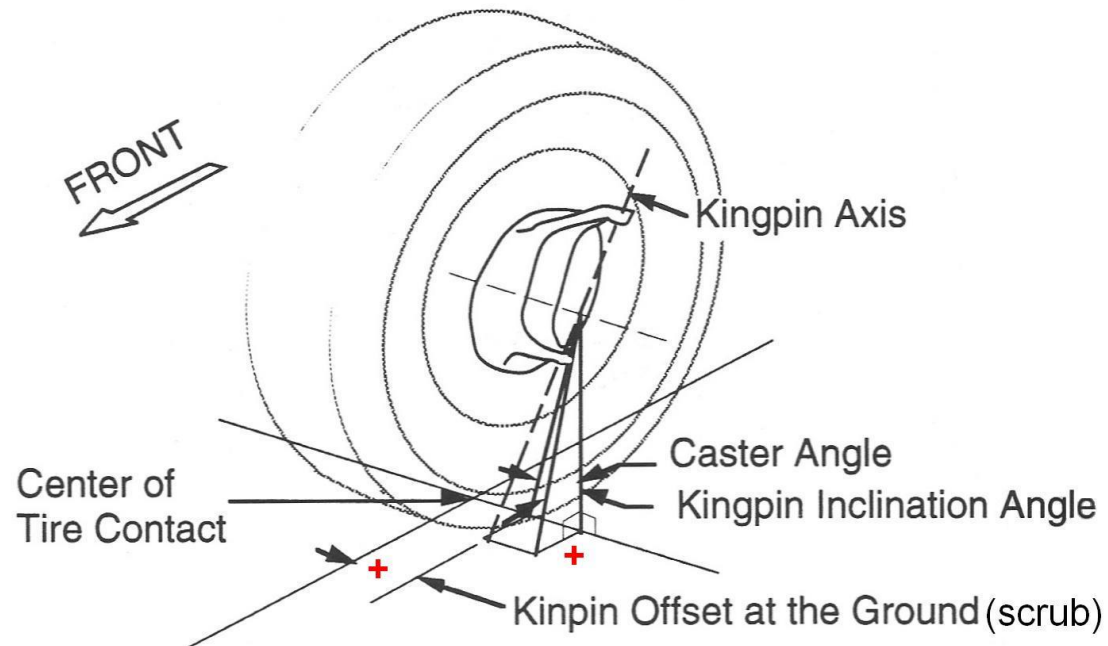
F_{zl}, F_{zr} = força vertical nas duas rodas

d = braço à terra

λ = ângulo do pino mestre

δ = ângulo de esterçamento

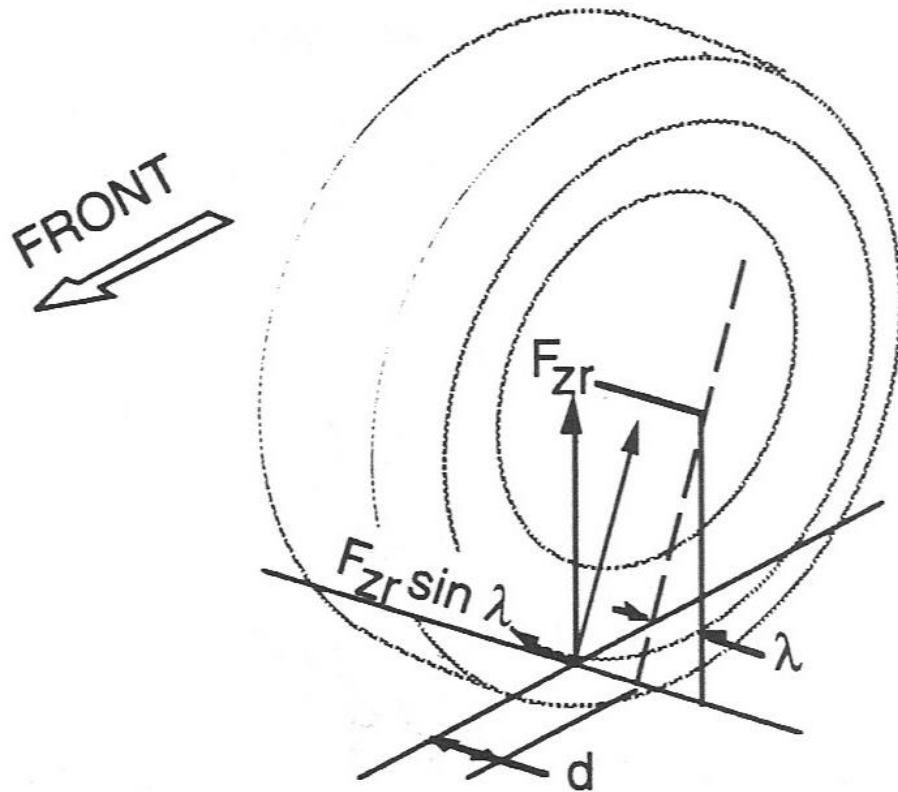
ν = ângulo de caster



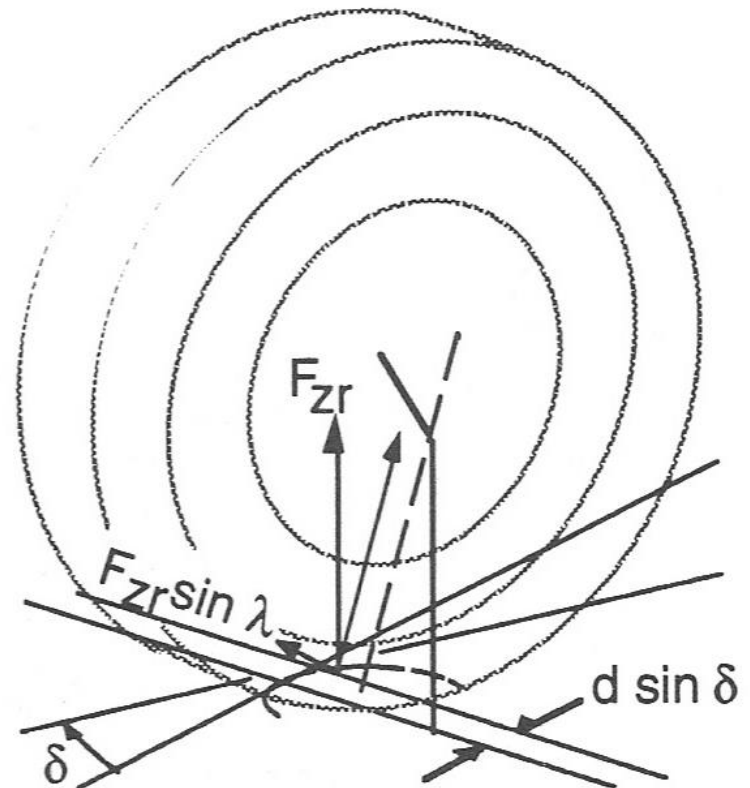
Momento produzido pela força vertical

Influência do ângulo do pino-mestre

No Steer



With Steer Angle

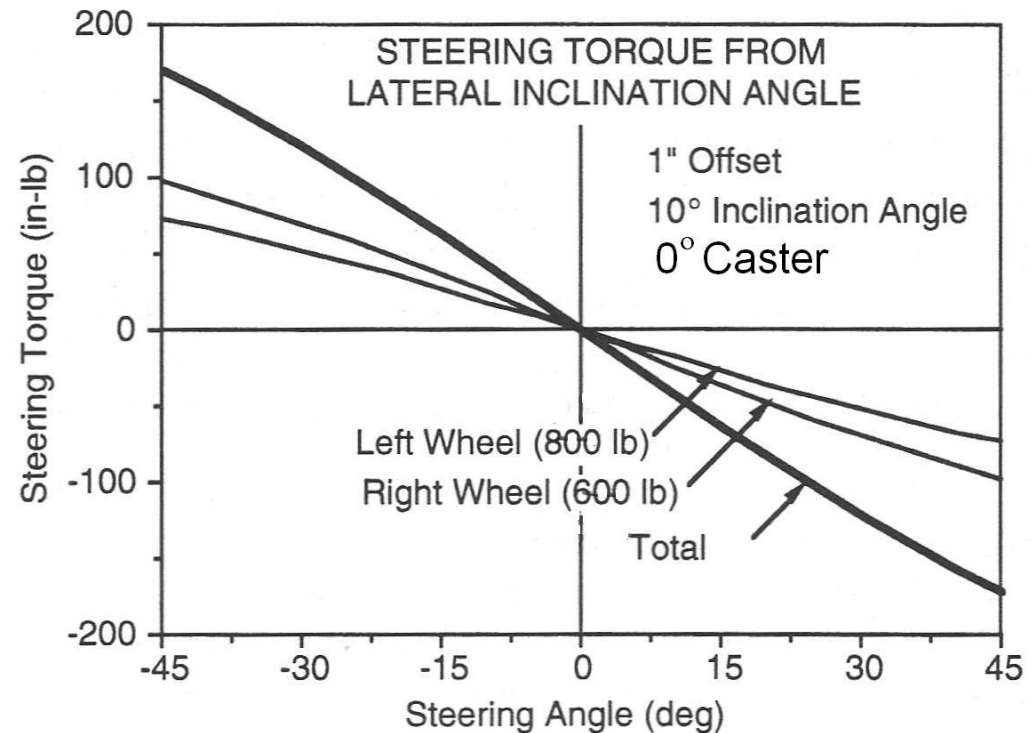


Momento produzido pela força vertical

Influência do ângulo do pino-mestre

$$M_{V1} = - \underbrace{(F_{zl} + F_{zr}) \cdot d \cdot \sin \lambda \cdot \sin \delta}_{\text{influenciado pinomestre}}$$

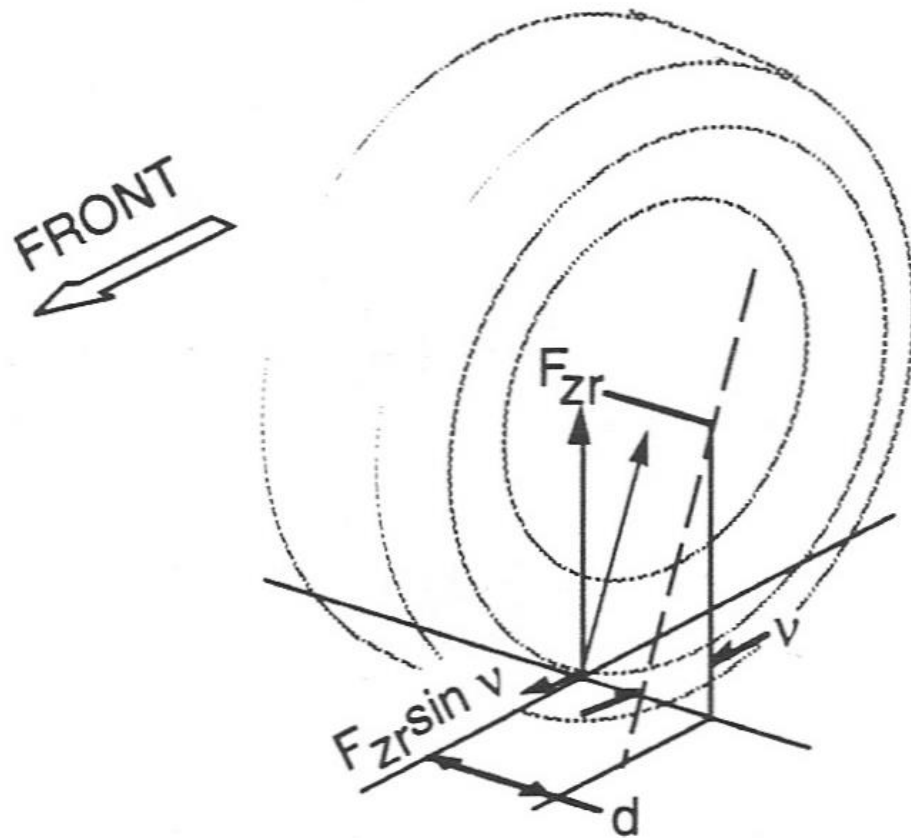
- O eixo se eleva (momento centralizador)
- Não é afetado pela transferência de carga



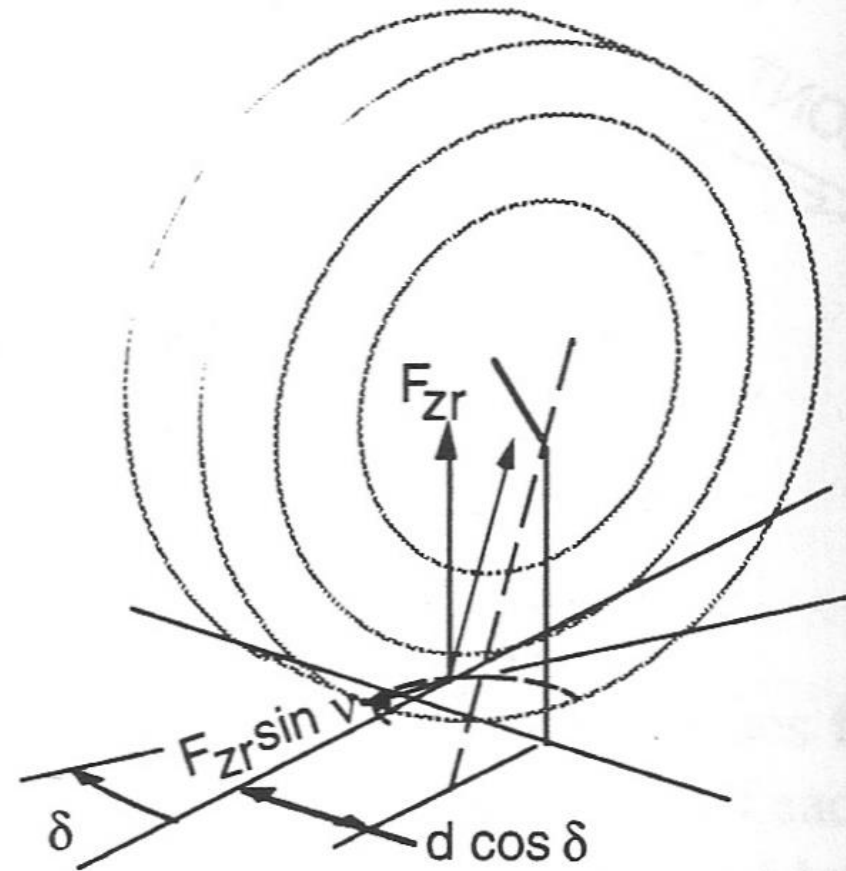
Momento produzido pela força vertical

Influência do ângulo do caster

No Steer



With Steer Angle

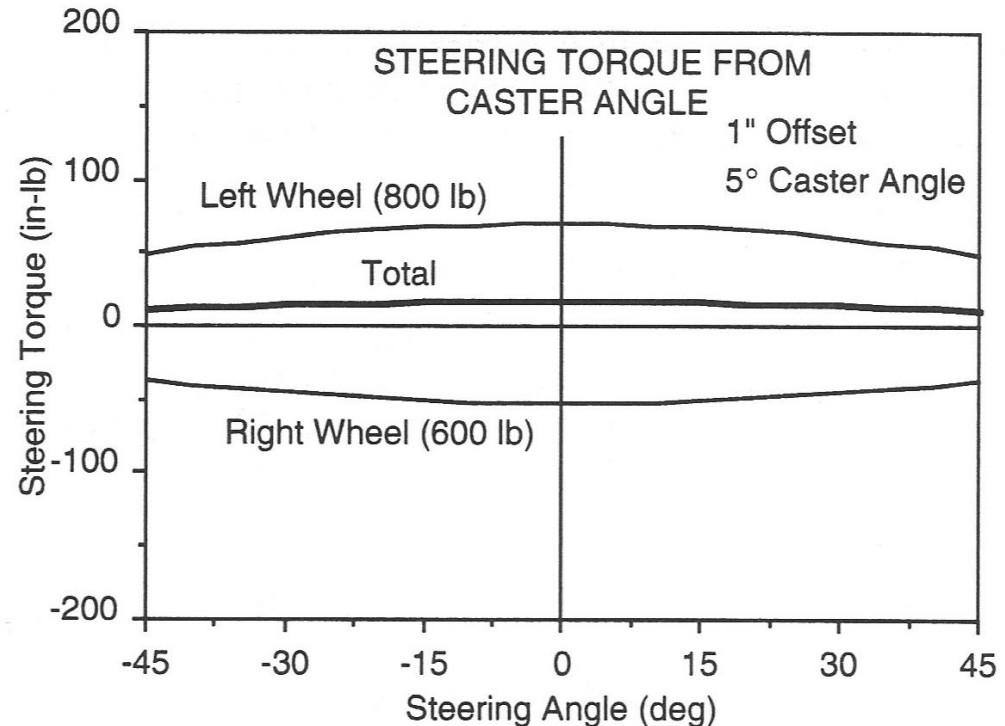


Momento produzido pela força vertical

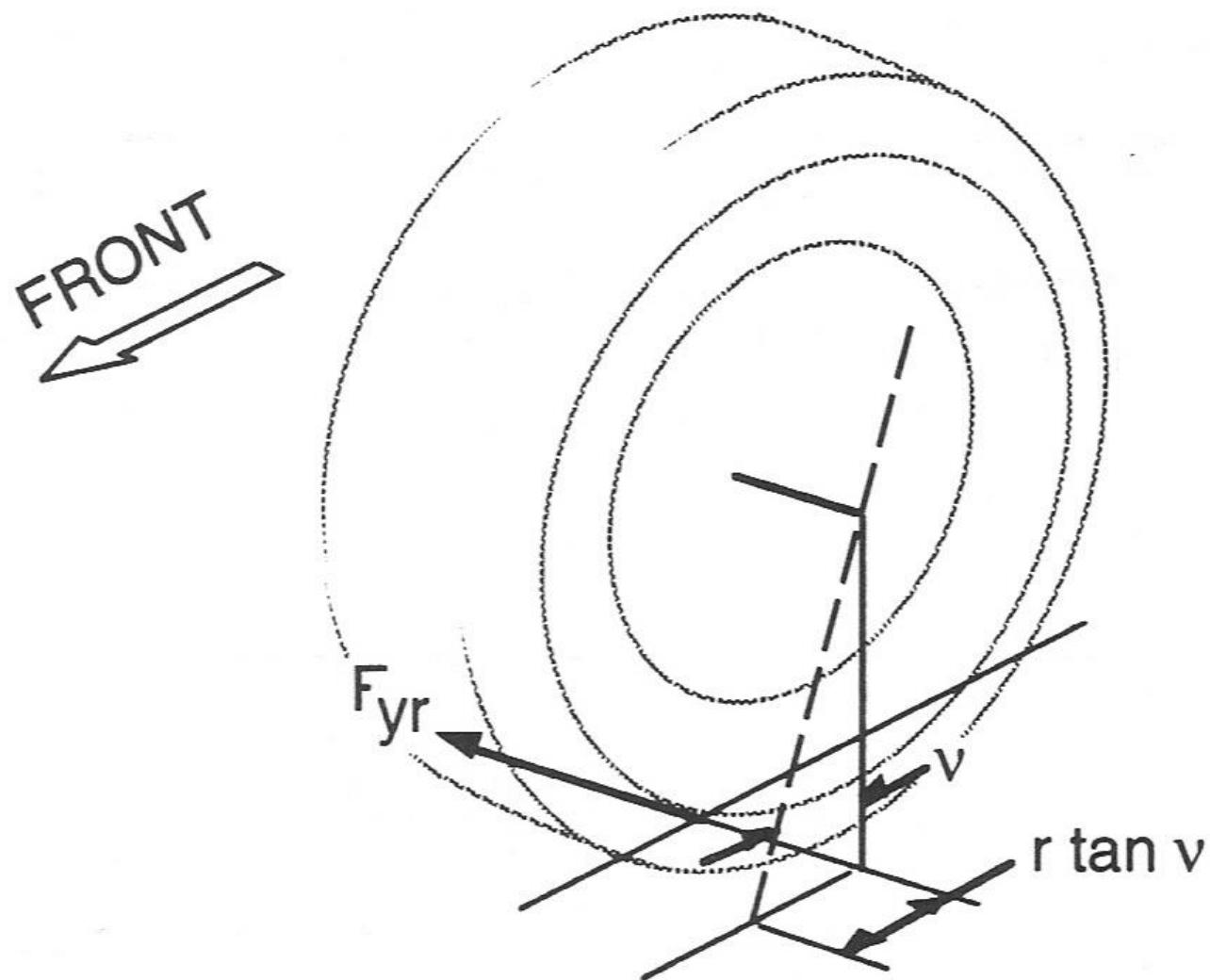
Influência do ângulo do caster

$$M_{V2} = \underbrace{(F_{zl} - F_{zr}) \cdot d \cdot \sin \nu \cdot \cos \delta}_{\text{influenciado caster}}$$

- O eixo rola (um lado sobe e outro desce)
- Sensível à transferência de carga



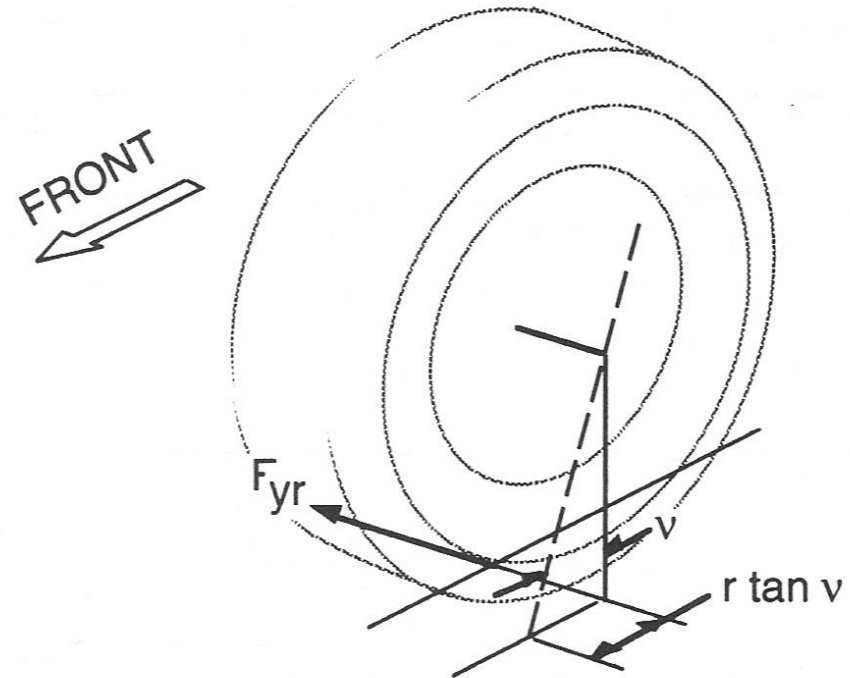
Momento produzido pela força lateral



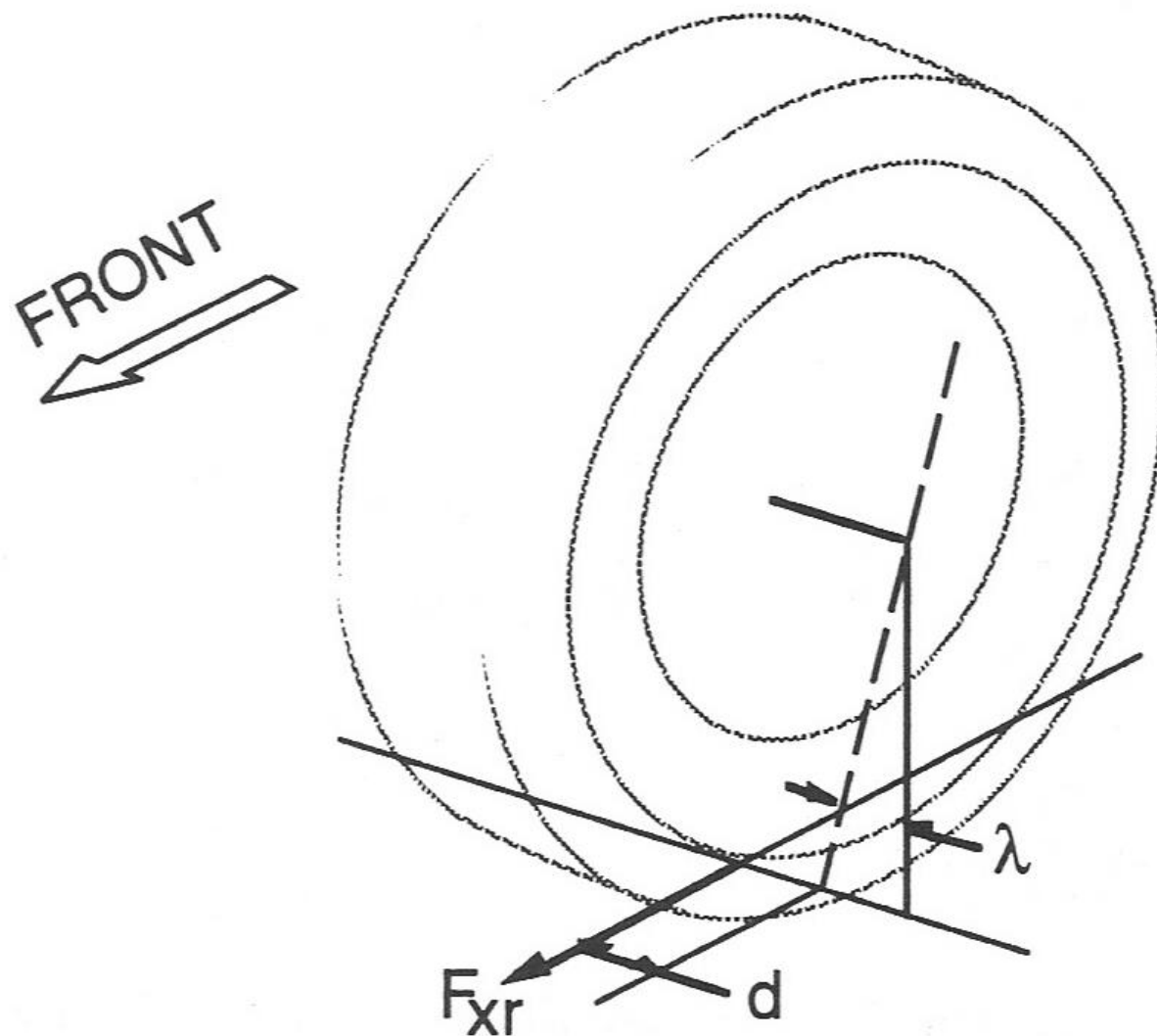
Momento produzido pela força lateral

$$M_L = -(F_{yl} - F_{yr}) \cdot r \cdot \tan \nu$$

- Produz um momento que tende a girar a roda para fora da curva.
- Contribui para o aumento do comportamento sub-esterçante.



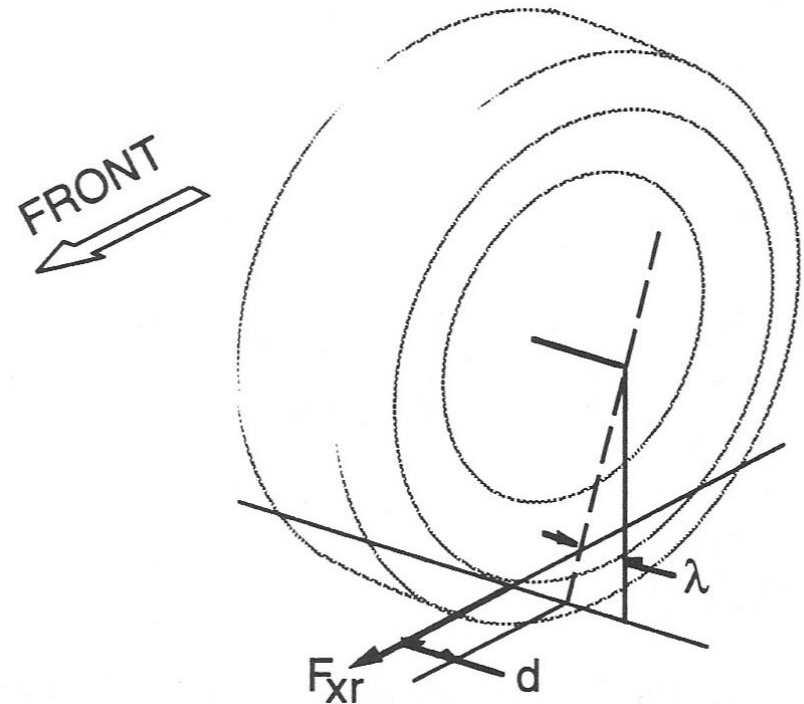
Momento produzido pela força trativa



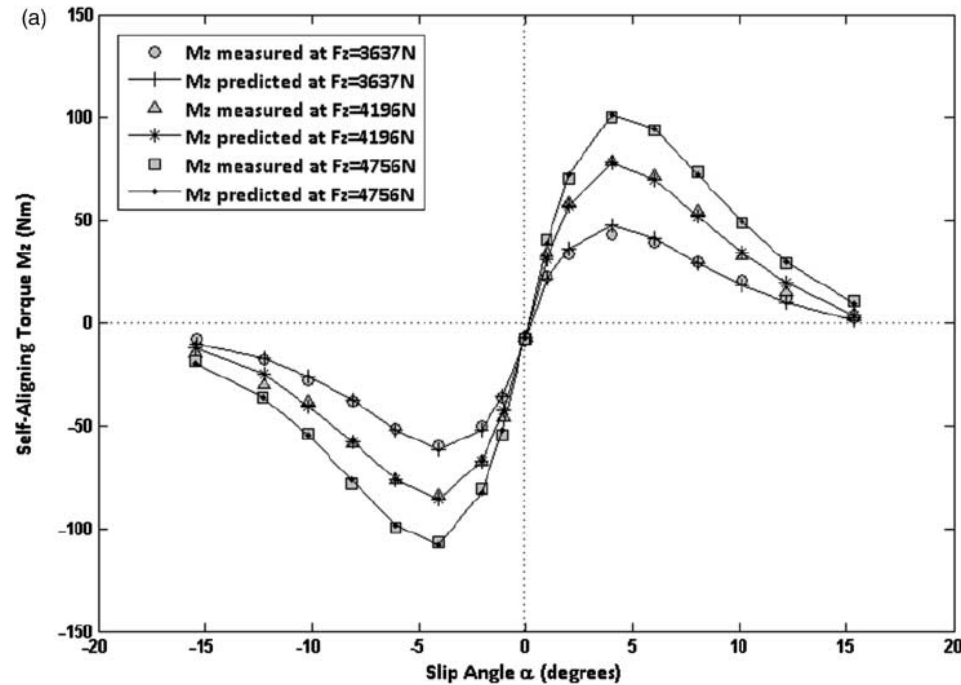
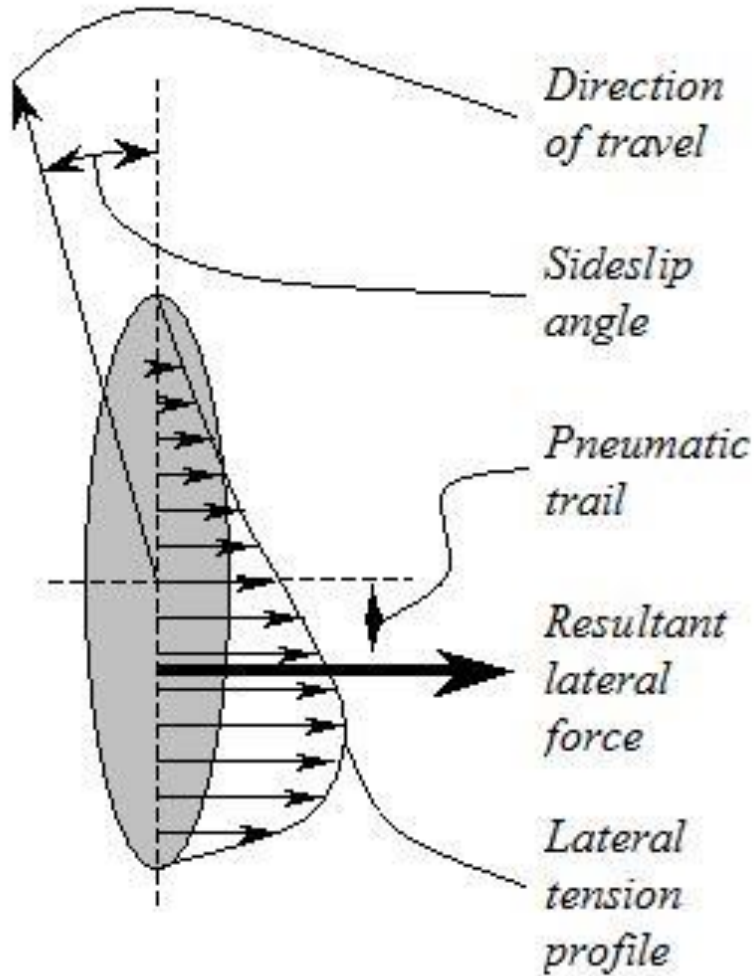
Momento produzido pela força trativa

$$M_T = (F_{xl} - F_{xr}) \cdot d$$

- Os momentos tendem a se equilibrar.
- Sensível ao braço-à-terra (d).
- Desbalanceamento:
 - pneu vazio
 - problemas no freio
 - coeficientes de atrito diferentes



Momento produzido pelo torque auto-alinhante

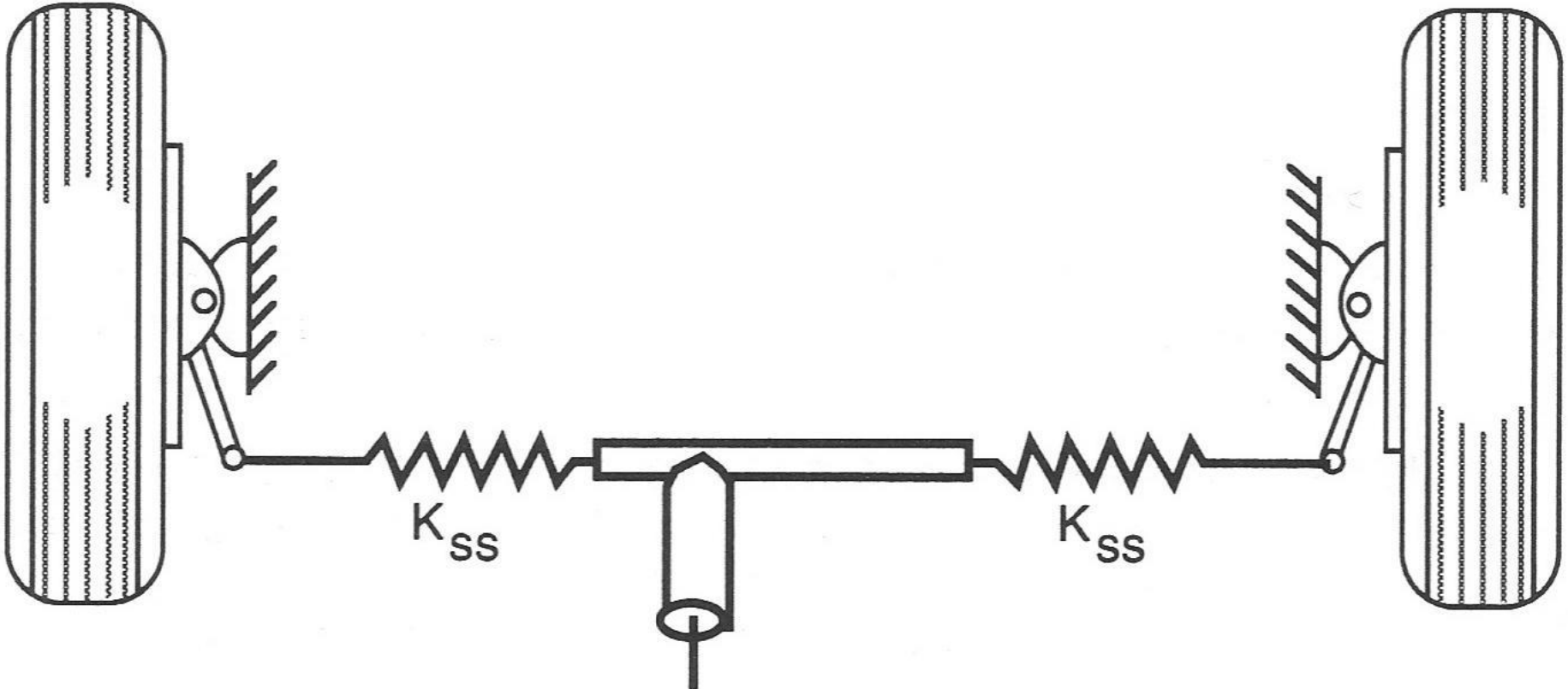


Momento produzido pelo torque auto-alinhante

$$M_{AT} = (M_{zl} + M_{zr}) \cdot \cos \sqrt{\lambda^2 + v^2}$$

- Sempre agem de modo a resistir a qualquer movimento de giro.
- Efeito sub-esterçante.

Modelo dinâmico do sistema de direção



Para o volante

Modelo dinâmico do sistema de direção

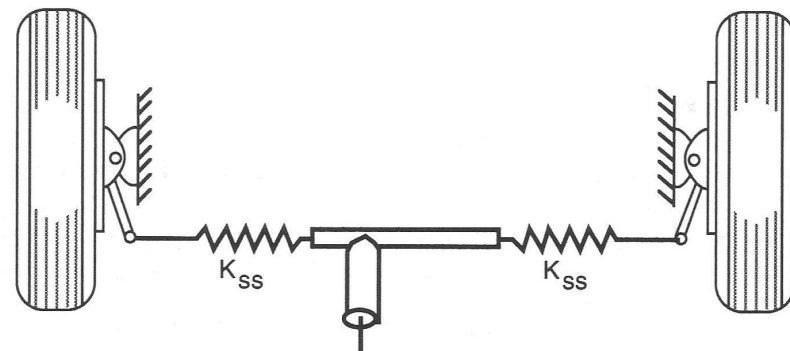
Momentos no eixo da direção

$$F_z \Rightarrow M_V = -(F_{zl} + F_{zr}).d.\sin \lambda.\sin \delta + (F_{zl} - F_{zr}).d.\sin \nu.\cos \delta$$

$$F_y \Rightarrow M_L = -(F_{yl} + F_{yr}).r.\tan \nu$$

$$F_x \Rightarrow M_T = (F_{xl} - F_{xr}).d$$

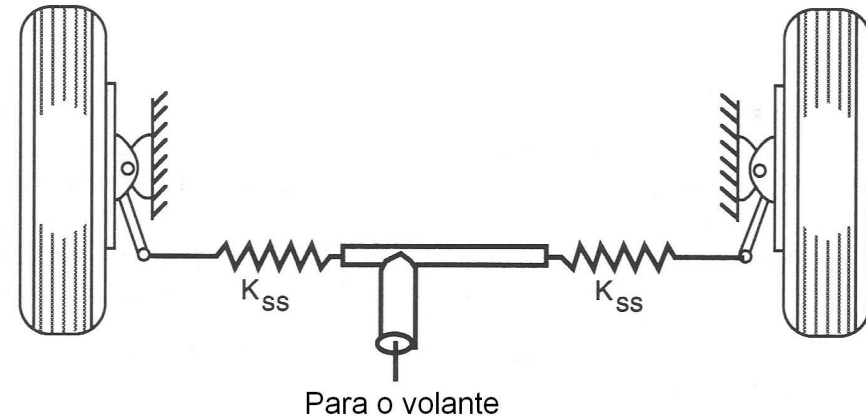
$$M_z \Rightarrow M_{AT} = (M_{zl} + M_{zr}).\cos \sqrt{\lambda^2 + \nu^2}$$



Para o volante

Modelo dinâmico do sistema de direção

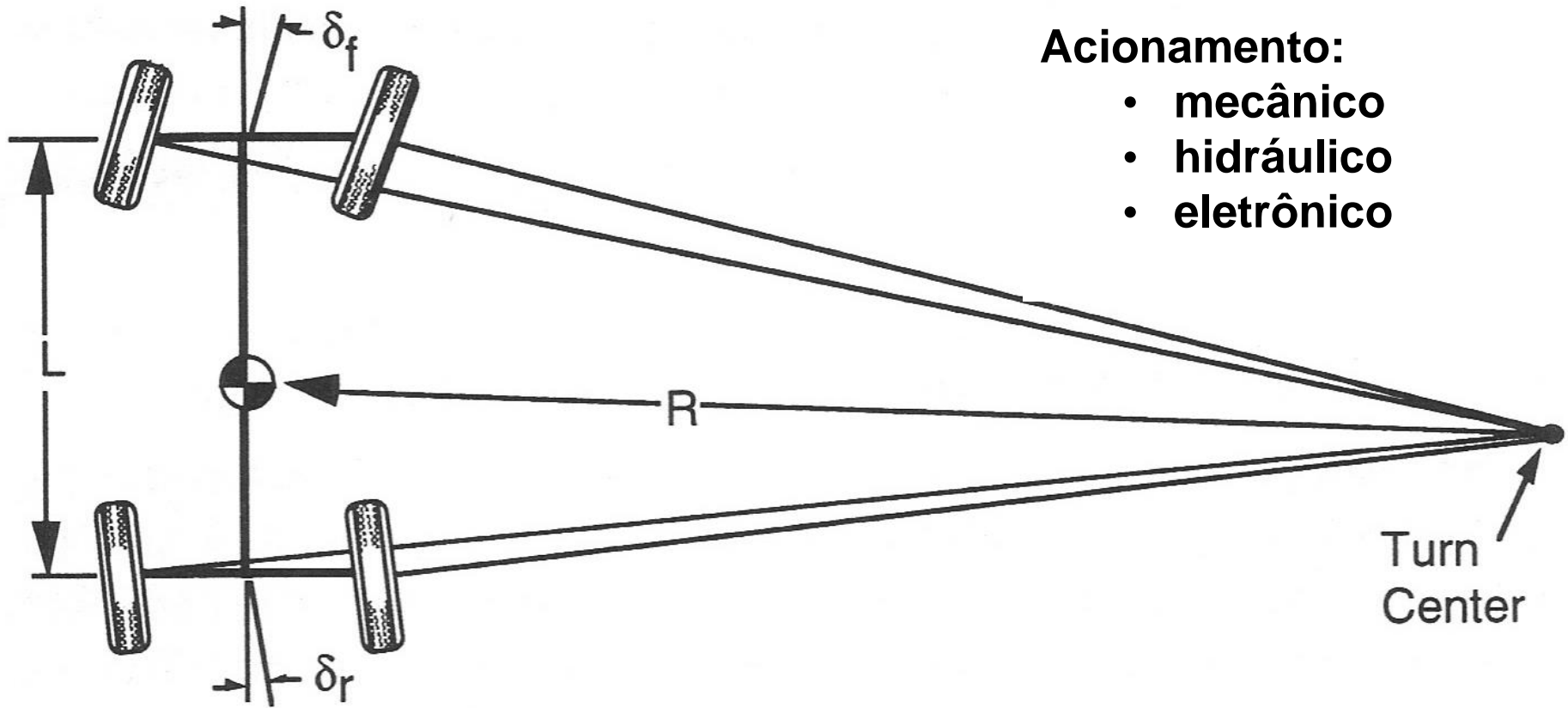
- Rigidez do sistema
- Propriedades da caixa de direção
 - razão de esterçamento
 - torque no volante
- Ângulos de Ackerman
- Cadeia cinemática
- Servomecanismo
- Propriedades elásticas dos componentes
- Resposta direcional (pneus)
- Comportamento em curva



Nesta aula

- Sistemas de direção
- Cinemática do esterçamento
- Erro de geometria
- Forças e momentos
- **Esterçamento nas quatro rodas**

Esterçamento nas quatro rodas (baixas velocidades)



Acionamento:

- mecânico
- hidráulico
- eletrônico

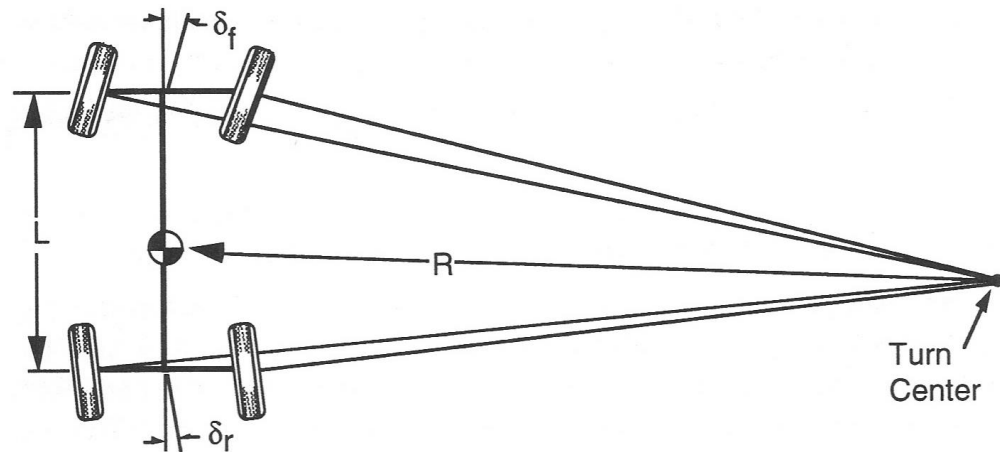
Esterçamento nas quatro rodas (baixas velocidades)

$$\delta_r = \xi \cdot \delta_f$$

$$\delta_r + \delta_f = \delta_f + \xi \cdot \delta_f = \delta_f \cdot (1 + \xi) = \frac{L}{R}$$

$$R = \frac{L}{\delta_f \cdot (1 + \xi)}$$

ξ	redução em R
50%	1/3
100%	1/2



Esterçamento nas quatro rodas (velocidades acima de 30 km/h)

$$\delta_r = \xi \cdot \delta_f$$

$$\delta_r + \delta_f = \delta_f + \xi \cdot \delta_f = \delta_f \cdot (1 + \xi) = \frac{L}{R}$$

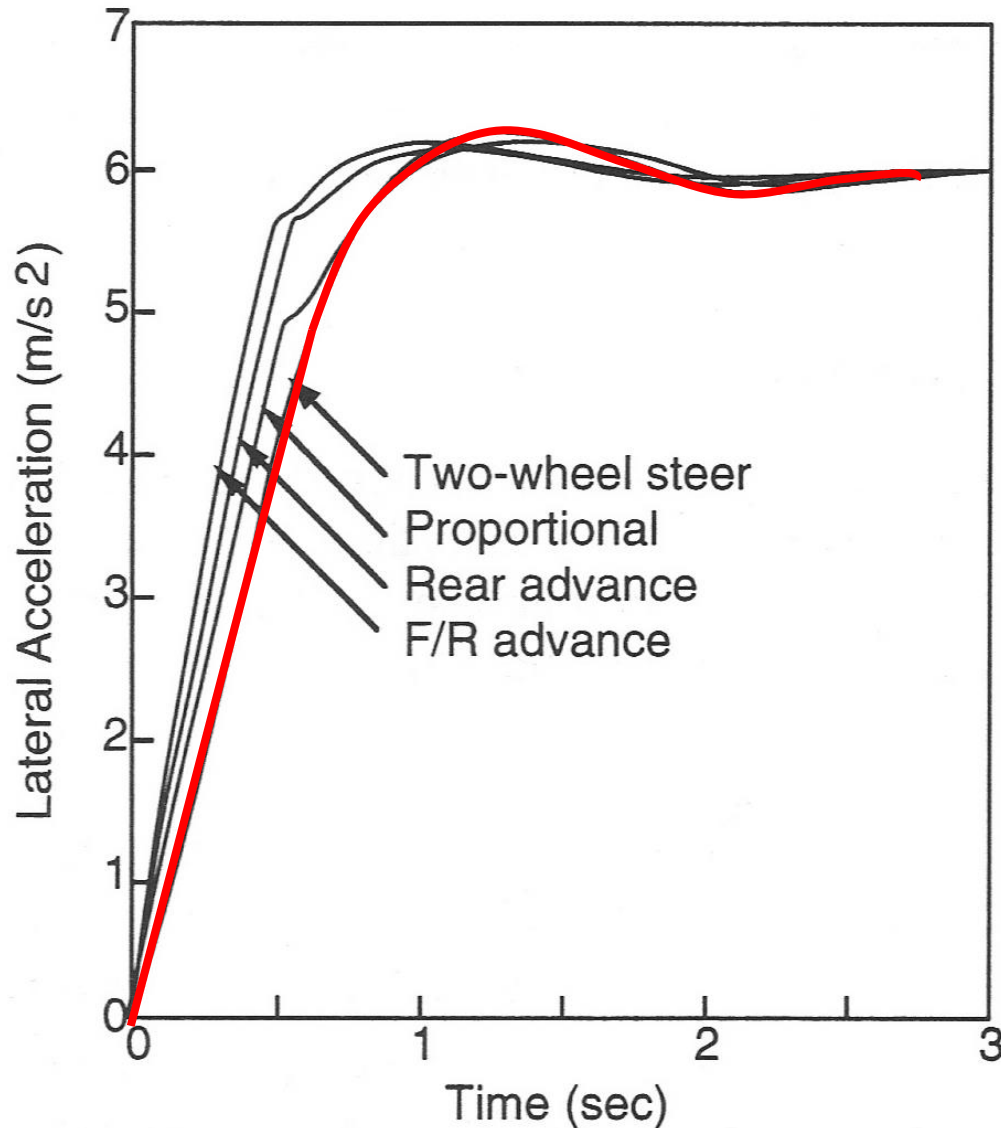
$$R = \frac{L}{\delta_f \cdot (1 + \xi)}$$

ξ redução em R

50% 1/3

100% 1/2

Aceleração lateral para diferentes sistemas de esterçamento nas 4 rodas



Demonstração de sistemas de esterçamento nas 4 rodas

**4 Wheel Active Steering demonstration (by
<https://youtu.be/jQDk7uY9Blo>**

**Honda Prelude 4 Wheel Steering
<http://www.youtube.com/watch?v=sldOdWYzW7U>**

Referência utilizada para esta aula

Gillespie, Thomas D.. FUNDAMENTALS OF VEHICLE DYNAMICS. Warrendale: SAE, 1992.
Capítulo 8.

Jazar, Reza N.. VEHICLE DYNAMICS: THEORY AND APPLICATION. New York: Springer, 2008.