Dinâmica Longitudinal do Veículo

1. Introdução

A dinâmica longitudinal do veículo aborda a aceleração e frenagem do veículo, movendo-se em linha reta.

Serão aqui usados os sistemas de coordenadas indicados na figura 1. O sistema (CG, x, y, z) está rigidamente ligado ao veículo, e o sistema (O, X, Y, Z) é fixo.

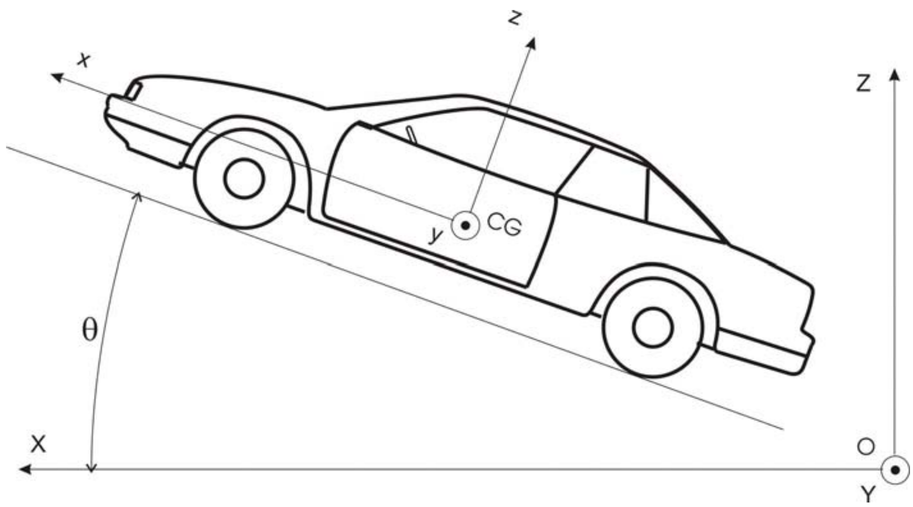

Figura 1- Sistemas de coordenadas

Como acontece em qualquer problema de Engenharia, será usado um modelo físico (ou seja, uma representação simplificada da realidade) para representar o veículo e suas condições de operação, e viabilizar o estabelecimento do seu modelo matemático (equações).

Esse modelo físico incorpora as seguintes hipóteses simplificadoras principais:

a) o veículo é tratado como um único corpo rígido. Ou seja, além de não se considerarem as deformações da carroceria, também não se incluem os efeitos da suspensão, pneus, etc.

b) a superfície sobre a qual o veículo se move é horizontal ou inclinada, e plana, embora possa ser rugosa. Ou seja, não há ondulações nem buracos.

c) o veículo move-se na direção da inclinação máxima da superfície. Essa inclinação é medida pelo ângulo θ, que resulta da rotação do plano (CG, x, y) em torno do eixo (O, Y). Note-se que o eixo (CG, y) permanece paralelo ao eixo (O, Y).

d) o veículo é simétrico em relação ao plano (CG, x, z). Isso tem diversas conseqüências, uma delas sendo que os esforços nas rodas serão iguais em cada lado do veículo.

e) o movimento do veículo é um movimento plano, paralelo ao plano (O, X, Z). Esta não é propriamente uma hipótese adicional, ela decorre das anteriores, mas é conveniente ficar expressa aqui.

f) considera-se no modelo apenas a componente da força aerodinâmica de arrasto ("drag") paralela à direção do movimento do veículo, desconsiderando-se a componente normal a essa direção.

2. Forças atuantes e equações

Num veículo avançando com velocidade V e aceleração escalar a_x, as forças atuantes no movimento longitudinal do veículo são as mostradas na figura 2.

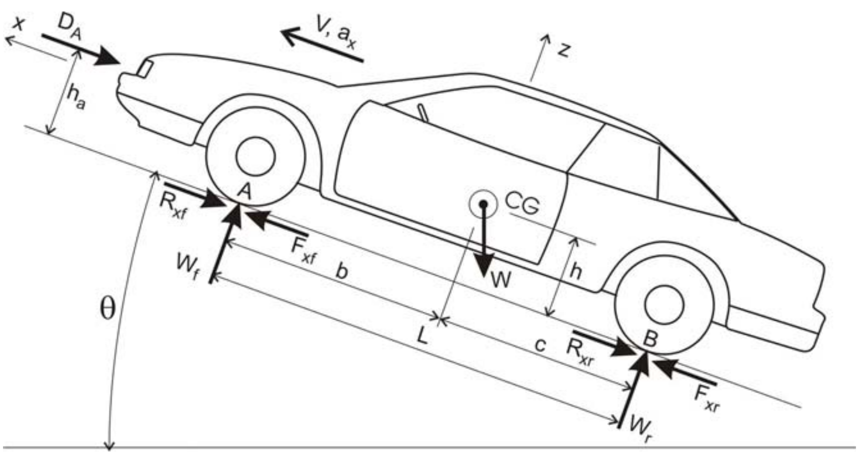

Figura 2 – Forças atuantes no movimento longitudinal do veículo

Temos:

- W é o peso do veículo aplicado no seu baricentro (CG), com intensidade igual ao produto da massa (M) pela aceleração local da gravidade.
- Os pneus vão receber uma reação normal à superfície da rodovia, W_f e W_r. Note-se que esses valores são as somas das reações de ambas as rodas dianteiras (f) e traseiras (r), respectivamente, supostas iguais conforme as hipóteses adotadas.
- Forças de tração, F_{xf} e F_{xr}, e forças de resistência ao rolamento, R_{xf} e R_{xr}, poderão também atuar nos pneus, distribuídas nas respectivas áreas de contatos destes com o pavimento.
- D_A é a componente da resultante das forças distribuídas (pressão) aerodinâmicas de arrasto ("drag"), na direção do movimento do veículo. A componente normal a essa direção é desconsiderada.

Tratando-se de um movimento plano, podemos escrever três equações escalares: duas provenientes do Teorema da Resultante e uma do Teorema da Quantidade de Movimento Angular.

Do Teorema da Resultante, na direção do eixo (CG, x), com W = M g:

$$M\, a_x = -D_A - R_{xf} + F_{xf} - M\, g\, \text{sen}\theta - R_{xr} + F_{xr} \qquad (1)$$

Idem, na direção do eixo z:

$$0 = W_f - M\,g\cos\theta + W_r \tag{2}$$

Do Teorema da Quantidade de Movimento Angular, usando como pólo o ponto B e lembrando que não há rotação (movimento de translação pura):

$$0 = -M\,h\,a_x - D_A\,h_a - W_f\,L + M\,g\,c\cos\theta - M\,g\,h\,\text{sen}\theta \tag{3}$$

Essas são as três equações que constituem o modelo matemático e governam o movimento longitudinal do veículo.

3. Alguns casos particulares

Podemos obter, por exemplo, as expressões das reações normais da pista sobre os pneus, usando as equações (2) e (3):

$$W_f = [M\,g\,(c\cos\theta - h\,\text{sen}\theta) - M\,h\,a_x - D_A\,h_a] / L \tag{4}$$

e

$$W_r = [M\,g\,(b\cos\theta + h\,\text{sen}\theta) + M\,h\,a_x + D_A\,h_a] / L \tag{5}$$

Cargas estáticas em piso nivelado

As equações ficam bastante simples na situação do veículo parado em solo nivelado. Nesse caso, as reações normais ficam:

$$W_f = M\,g\,c / L = W_{fs} \tag{6}$$

e

$$W_r = M\,g\,b / L = W_{rs}\,, \tag{7}$$

usando-se o sufixo “s” para indicar a situação estática.

Aceleração em baixa velocidade

Nesta situação, o veículo está sendo acelerado, em pista nivelada, mas a faixa de velocidades abrange valores suficientemente baixos para que a resistência aerodinâmica do ar ao movimento não seja significativa.

Desta forma, as reações normais serão:

$$W_f = (M\,g\,c - M\,h\,a_x) / L = W_{fs} - M\,h\,a_x / L \tag{8}$$

e

$$W_r = (M\,g\,b + M\,h\,a_x) / L = W_{rs} + M\,h\,a_x / L \tag{9}$$

Forças em ladeira

O efeito da inclinação da pista (ladeira) também está incluído no modelo e pode ser diretamente avaliado. Essa inclinação é normalmente definida pelo quociente entre "subida" e "avanço", e em geral expressa em porcentagem. Por exemplo, uma ladeira na qual o veículo sobe 1,5 m ao percorrer uma distância de 50 m tem inclinação de 3%.

No projeto de auto-estradas procura-se limitar a inclinação a 4%, e em vias primárias e secundárias atinge-se às vezes 10 a 12%. Dentro desse limite, para as equações do movimento, pode-se considerar o cosseno do ângulo de inclinação θ igual a um, e o seno igual ao próprio ângulo, em radianos, ou seja:

$\cos \theta \cong 1$ e $\text{sen}\, \theta \cong \theta$

Para inclinações maiores essas aproximações devem ser evitadas. Desta forma, para o veículo parado em uma pista inclinada, teremos:

$$W_f = M\, g\, (c - h\, \theta) / L = W_{fs} - M\, g\, h\, \theta / L \qquad (10)$$

e

$$W_r = M\, g\, (b + h\, \theta) / L = W_{rs} + M\, g\, h\, \theta / L \qquad (11)$$

4. Exemplos

1) As cargas nos eixos de um Chevrolet Omega com motor de 4,1 litros, em condição de plena carga, são de 9700 N (970 kgf) no eixo dianteiro e de 10150 N (1015 kgf) no eixo traseiro. A distância entre eixos, L, é de 2730 mm. Determine a posição longitudinal do centro de gravidade do veículo.

Solução:

A posição longitudinal do CG é definida por qualquer um dos parâmetros b ou c das equações (6) ou (7), que são aplicáveis ao veículo parado e nivelado. Usando, por exemplo, a equação (7) pode-se obter o valor de b:

$$b = L\, W_{rs} / W = 2730 \,.\, 10150 / (9700 + 10150) = 1396 \text{ mm}$$

isto é, o CG está a uma distância de 1396 mm a ré do eixo dianteiro.

2) Um Taurus GL sedan com motor de 3,0 litros acelera a partir do repouso, numa ladeira com inclinação de 6%, com aceleração de 1,86 m/s^2. As cargas EOM (Em Ordem de Marcha) são 8839 N no eixo dianteiro e 4975 N no traseiro. O entre-eixos é de 2692 mm. O peso dos passageiros nos assentos dianteiros distribui-se com 49% para o eixo dianteiro. Determine a distribuição de cargas nos eixos na condição EOM com o motorista.

Solução:
OBS.:

EOM: "Em Ordem de Marcha" – Veículo abastecido e com todos os reservatórios cheios, com estepe, ferramentas e acessórios, sem motorista, passageiros nem carga.

PBT: "Peso Bruto Total" – Veículo com carga máxima.

- Parte do repouso: a resistência do ar é muito pequena na partida, pode ser desconsiderada.

- CG do veículo (b ou c) na condição EOM com o motorista

Pressupondo um motorista com peso de 900 N, teremos para o veículo no plano:

$W_{fs} = 8839 + (900 \,.\, 0{,}49) = 9280$ N

$W_{rs} = 4975 + (900 \,.\, 0{,}51) = 5434$ N

e o peso total: $W = W_{fs} + W_{rs} = 14714$ N

Usando as equações (6) e (7) obtemos:

b = (5434 . 2692) / 14714 = 994 mm, e

c = (9280 . 2692) / 14714 = 1698 mm

- O aclive de 6% corresponde a um ângulo de 3,43º (atan 0,06)

Na falta de informação sobre a altura h do centro de gravidade do veículo, vamos adotar o valor de 500 mm para este parâmetro.

Assim, agora temos condições de usar a eq. (4):

$W_f = M\,[g\,(c \cos\theta - h \,\mathrm{sen}\,\theta) – h\, a_x] / L =$

$= (14714 / 9{,}81)\,[\,9{,}81\,(1{,}698 \,.\, 0{,}998 – 0{,}50 \,.\, 0{,}0599) – 0{,}50 \,.\, 1{,}86] / 2{,}692 =$

$= 8580{,}5$ N =>

=> $\underline{\mathbf{W_f = 8580{,}5\ N}}$

Da eq. (5):

$W_r = M\,[g\,(b \cos\theta + h \,\mathrm{sen}\,\theta) + h\, a_x] / L =$

$= (14714 / 9{,}81)\,[\,9{,}81\,(0{,}994 \,.\, 0{,}998 + 0{,}50 \,.\, 0{,}0599) + 0{,}50 \,.\, 1{,}86] / 2{,}692 =$

$= 6104{,}0$ N =>

=> **$\underline{W_r = 6104{,}0\ N}$**

- Comentários:

(a) Soma: 8580,8 + 6104,0 = 14684,5 ≠ 14714 (peso total)

A diferença = 29,5 N é devida à inclinação; verificando:

$14714 \cdot \cos 3{,}43^{\circ} = 14684{,}5\ N$

(b) ESTABILIDADE

- empilhadeiras em declive + frenagem

- Caminhões (tanque) em aclive + aceleração