

1. ENTENDENDO A SUSPENSÃO VEICULAR

Um quarto de suspensão é um modelo que abstrai o comportamento de um veículo simplificando a análise para uma única roda. Em sua configuração clássica, conforme apresentado na Figura 1.1, a suspensão de um veículo é composta por três elementos principais:

1. Elemento Elástico: Tipicamente uma mola helicoidal, este elemento fornece uma força proporcional e oposta ao alongamento da suspensão, suportando a carga estática do veículo;
2. Elemento de amortecimento: Geralmente um amortecedor hidráulico, oferece uma força dissipativa contra a velocidade de alongamento. Este componente é crucial em situações dinâmicas, mas fornece força insignificante em estados estacionários;
3. Articulações Mecânicas: Esses componentes conectam a carroceria suspensa do veículo à massa não suspensa, cruciais para a funcionalidade geral do sistema de suspensão.

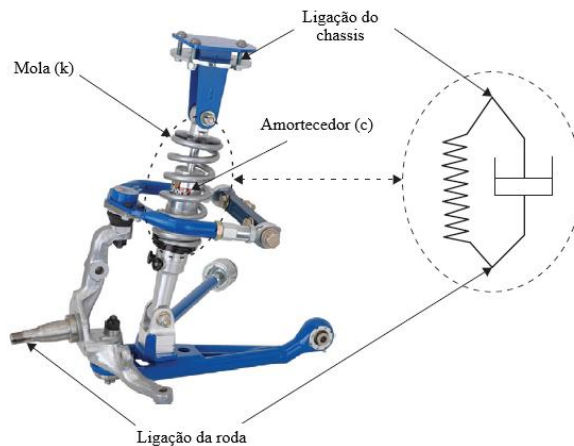


Figura 1.1 – Esquema clássico de suspensão veicular [Adaptado de Saravesi et al., 2010].

Para fins de modelagem, podemos abstrair o conceito conforme a Figura 1.2.

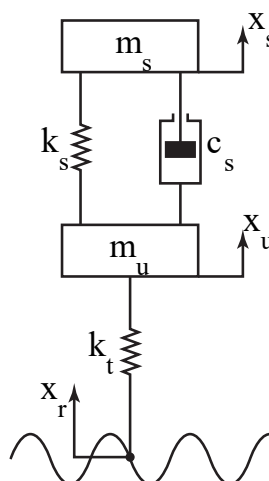


Figura 1.2 – Quarto de suspensão adaptado [Fonte: Adaptado de Ogata, 2010].

Esta abstração inclui:

- Massa suspensa (m_s): a carroceria do veículo suportada pela suspensão;
- Massa não suspensa (m_u): a parte do veículo abaixo da suspensão, incluindo pneus, cubo de roda e eixos;
- Mola (k_s): elemento elástico que suporta a massa suspensa e impactos;
- Amortecedor (c_s): elemento que dissipa energia em forma de calor, reduzindo oscilações;
- Rigidez do pneu (k_t): representa a medida de deflexão do pneu em contato com o solo;
- Deslocamento da estrada (x_r): perfil do solo que a roda segue, pode ser definido por uma função senoidal;
- (x_u): posição da massa não suspensa;
- (x_s) posição da massa suspensa.

No modelo padrão de um quarto de suspensão, as massas da mola e do amortecedor normalmente não são consideradas explicitamente. Essa simplificação pressupõe que as massas da mola e do amortecedor são insignificantes em comparação com a massa suspensa e a massa não suspensa.

A mola e o amortecedor são agrupados com suas respectivas massas de conexão, o que significa:

- A massa suspensa inclui todos os componentes acima da suspensão, incluindo a carroceria do veículo e a carga do passageiro;
- A massa não suspensa inclui componentes como a roda, o pneu e as peças do sistema de suspensão (por exemplo, o braço de controle inferior).

2. EQUAÇÕES DE MOVIMENTO

A modelagem é feita com base na Segunda Lei de Newton ($\sum \vec{F} = m\vec{a}$), podemos equacionar o sistema conforme a Equação 2.1 e a Equação 2.2:

$$m_s \ddot{x}_s = k_s(x_u - x_s) + c_s(\dot{x}_u - \dot{x}_s) \quad (2.1)$$

$$m_u \ddot{x}_u = -k_s(x_u - x_s) - c_s(\dot{x}_u - \dot{x}_s) + k_t(x_r - x_u) \quad (2.2)$$

2.1 Variáveis e Parâmetros Necessários

m_s : Massa suspensa (carroceria) – [kg];

m_u : Massa não suspensa (pneu e eixo) – [kg];

k_s : Rigidez da suspensão, influencia no conforto veicular e na habilidade de absorção das irregularidades da rua – [N/m];

c_s : Amortecimento da suspensão, reduz as vibrações (conforto) e garante o contato do pneu com o solo (controle) – [Ns/m];

k_t : Rigidez do pneu, afeta a transmissão de vibração da rua – [N/m];

x_r : Deslocamento imposto pelo solo, que pode ser definido como:

- Perfil harmônico (senoidal): $x_r = A \sin(2\pi f t)$ ou $\dot{x}_r = A 2\pi f \cos(2\pi f t)$.

Onde a amplitude (A) representa a altura dos solavancos em metros e a frequência angular (f) afeta a resposta dinâmica. A velocidade (\dot{x}_r) impacta na força transmitida ao conjunto de suspensão.

2.2 Métricas Analíticas

Para avaliar a dinâmica veicular, focaremos em:

- Conforto de veicular: Medido através da aceleração da massa suspensa (\ddot{x}_s). Acelerações baixas melhoram o conforto veicular. Faixa ideal: 0,3 – 0,5 m/s (valor RMS) para veículos de passeio em estradas normais;
- Deslocamento da suspensão: Medido pelo deslocamento relativo entre a massa suspensa e não suspensa ($x_u - x_s$). O curso excessivo leva a restrições mecânicas. Curso Máximo da Suspensão:
 - Veículos de passageiros: 50 – 100 mm;
 - Carros esportivos: 30 – 50 mm (suspensão mais rígida, menos curso);
 - Veículos off-road: 200 – 300 mm (curso maior para terrenos acidentados).

2.3 Valores Ideais para os Parâmetros

Para um típico veículo de passageiros:

- Massa suspensa: 250 – 500 kg (1/4 da massa do veículo);
- Massa não suspensa: 25 – 75 kg;
- Rigidez da suspensão: 10 000 – 50 000 N/m;
- Amortecimento da suspensão: 1 000 – 5 000 Ns/m;
- Rigidez do pneu: 150 000 – 250 000 N/m;
- Amortecimento do pneu: Negligenciado.