



TRANSFERÊNCIA LATERAL DE CARGA E SEU EFEITO NO GRADIENTE DE SUB-ESTERÇAMENTO.

Felipe Dicker¹

¹Universidade Federal de Minas Gerais, fsdicker@ufmg.br

Resumo: Este trabalho aborda a transferência lateral de carga em um veículo automotivo e sua influência no comportamento do carro, mensurado pelo gradiente de sub-esterçamento. Inicialmente, é feita uma revisão bibliográfica sobre a transferência de carga e é apresentado o modelo de bicicleta, no qual o gradiente de sub-esterçamento é calculado. Em seguida, é feito um estudo de caso quanto a como essa métrica varia com diferentes ajustes da suspensão que modificam a distribuição de transferência de carga entre os eixos, concluindo que distribuições maiores resultam em veículos mais sub-esterçantes.

Palavras-chave: Transferência de carga, gradiente de sub-esterçamento, pneus, suspensão, aceleração lateral.

1. Introdução

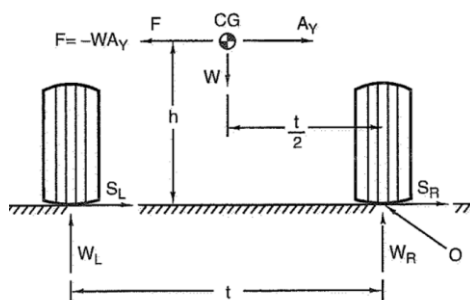
As forças primárias por meio das quais um veículo automotor é controlado são desenvolvidas nas regiões de contato dos pneus com o solo. Dessa forma, o conhecimento das forças e momentos gerados por esses componentes é de fundamental importância para o entendimento da área de dinâmica veicular (GILLESPIE, 1992). O comportamento dos pneus é sensível a diversos parâmetros, dentre eles a carga normal atuante, a qual varia dinamicamente devido a um número de fatores, como forças aerodinâmicas, inclinações na trajetória do veículo e irregularidades na superfície do asfalto. Este trabalho contém um estudo de caso quanto ao efeito que a transferência lateral de carga produz no comportamento do veículo automotor considerando a métrica conhecida como gradiente de sub-esterçamento.

2. Revisão Bibliográfica

A transferência de carga é um dos fenômenos mais importantes no estudo da dinâmica veicular e ocorre sempre que o veículo está sujeito a alguma resultante de força horizontal não-nula. O princípio de D'Alembert diz que a presença de uma aceleração em um corpo pode ser representada ao se aplicar uma força (ou momento) inercial de sentido contrário no seu centro de gravidade (CG), de forma que o somatório de forças seja zero e o corpo se encontre em um equilíbrio estático efetivo (MILLIKEN & MILLIKEN, 1995). Como o CG de um automóvel está sempre acima do pavimento, essa força gera um momento no veículo em torno do solo, induzindo forças de reação que alteram a carga vertical nos 4 pneus de forma que o repouso possa ser atingido.

Analisando o diagrama de corpo livre da Figura 1 a seguir, modelando um veículo de peso W , altura de centro de gravidade h e comprimento de bitola t em aceleração lateral pura A_y , é possível fazer o equilíbrio de momentos em torno do ponto O, obtendo a transferência lateral de carga ΔW_y mostrada na Equação 1. Esse valor representa o acréscimo na carga total sobre as rodas externas e a redução na carga total sobre as rodas internas à curva.

Figura 1: Diagrama de corpo livre de um veículo em aceleração lateral pura.



Fonte: (MILLIKEN & MILLIKEN, 1995).



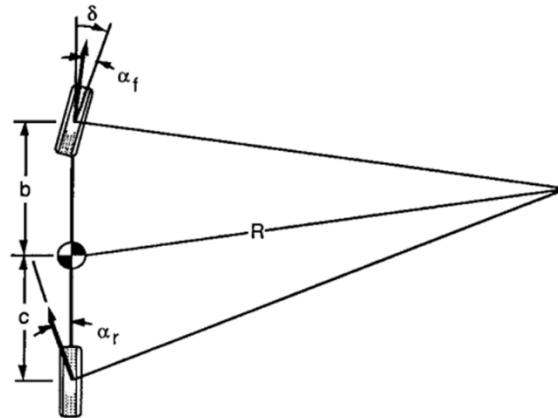
Universidade Federal de Minas Gerais
UEADSL 2025.1 - Liberdade e Cidadania

$$\Delta W_y = \frac{W A_y h}{t} \quad (1)$$

Para um veículo realizando curvas em regime permanente, é possível representá-lo simplificadamente utilizando o modelo de bicicleta mostrado na Figura 2. As considerações utilizadas no modelo são listadas a seguir:

- Cada eixo é comprimido em uma única roda com carga normal equivalente à carga total do eixo;
- A força lateral gerada por essa roda única equivale à soma das forças laterais geradas pelos dois pneus do eixo no carro real;
- Os ângulos de esterçamento das rodas dianteiras do veículo real são aproximadamente iguais;
- Não há transferência lateral ou longitudinal de carga na bicicleta e sua velocidade se mantém constante;
- O raio de curva é muito maior que as bitolas do veículo, de forma que são desprezíveis as diferenças entre os raios de curva das rodas internas e externas;
- Os ângulos de esterçamento e os ângulos de deriva dos pneus são suficientemente pequenos de forma que é válida a aproximação $\sin(\theta) = \theta$;
- Os pneus operam na região elástica da curva de força lateral versus ângulo de deriva;
- Não há efeitos aerodinâmicos presentes.

Figura 2: Modelo de bicicleta.



Fonte: (GILLESPIE, 1992).

Nesse modelo, o balanço do veículo pode ser descrito pela métrica conhecida como gradiente de sub-esterçamento K , obtido a partir da Equação 2, em que δ é o ângulo de esterçamento da roda dianteira, L é a distância entre eixos, R é o raio de curva e A_y é a aceleração lateral.

$$\delta = \frac{L}{R} + K A_y \quad (2)$$

O sinal de K é um indicativo do balanço do veículo: valores de K positivos indicam que, para que se mantenha o mesmo raio de curva, o ângulo de esterçamento a ser aplicado na roda dianteira cresce linearmente com a aceleração, significando um comportamento sub-esterçante; o oposto é verdadeiro quando K é negativo, resultando em um veículo sobre-esterçante. O gradiente de sub-esterçamento sofre influência de um número de fatores; neste trabalho, serão consideradas somente as contribuições da distribuição de peso e da transferência lateral de carga, sendo, então, calculado pela Equação 3, em que C_α é a rigidez de curva dos pneus, b_α é um coeficiente de interpolação da rigidez de curva em função da carga normal e os subscritos f e r indicam que as grandezas são relativas aos eixos dianteiro e traseiro,



respectivamente.

$$K = \left(\frac{W_f}{C_{\alpha_f}} - \frac{W_r}{C_{\alpha_r}} \right) + \left(\frac{W_f}{C_{\alpha_f}} \frac{2b_{\alpha}(\Delta W_{yf})^2}{C_{\alpha_f}} - \frac{W_r}{C_{\alpha_r}} \frac{2b_{\alpha}(\Delta W_{yr})^2}{C_{\alpha_r}} \right) \quad (3)$$

3. Estudo de Caso

Neste estudo de caso, será considerado um protótipo de 300 kg de massa igualmente distribuída entre os eixos ($W_f = W_r = W/2$), altura de CG igual 0,3 m e 1,2 m de bitola, utilizando 4 pneus iguais ($C_{\alpha_f} = C_{\alpha_r} = C_{\alpha}$) com rigidez à curva de 700 N/grau e coeficiente b_{α} igual a $3,3 \times 10^{-4}$ (N.grau)⁻¹. Nesse veículo, é possível alterar a distribuição da transferência lateral de carga entre os eixos (razão entre a transferência lateral de carga no eixo dianteiro e transferência lateral de carga total nos dois eixos) a partir de ajustes na suspensão. Para essas características, a Equação 3 pode ser simplificada para a Equação 4.

$$K = \frac{Wb_{\alpha}}{(C_{\alpha})^2} \cdot (\Delta W_{yf}^2 - \Delta W_{yr}^2) \quad (4)$$

Para 1 G de aceleração lateral ($9,81 \text{ m/s}^2$), a transferência lateral de carga é calculada ao se substituírem os valores correspondentes na Equação 1.

$$\Delta W_y = \frac{W A_y h}{t} = \frac{300 \cdot 9,81 \cdot 0,3}{1,2} = 735,8 \text{ N}$$

Nesse cenário, a Tabela 1 apresenta o cálculo do gradiente de sub-esterçamento para 3 diferentes ajustes de suspensão, produzindo 3 distribuições de transferência de carga diferentes.



Tabela 1: Gradientes de sub-esterçamento para diferentes distribuições de transferência de carga.

Distribuição de Transferência de Carga [%]	Gradiente de Sub-esterçamento [grau/G]	Comportamento do Veículo
48%	-0,043	Sobre-esterçante ($K < 0$)
50%	0,000	Neutro ($K = 0$)
53%	+0,064	Sub-esterçante ($K > 0$)

Fonte: (Autorial).

4. Conclusão

A partir dos resultados mostrados na Tabela 1, conclui-se que a transferência de carga possui forte influência na resposta dos pneus e, por consequência, na dinâmica do veículo em aceleração lateral. Ademais, percebe-se que diferentes ajustes na suspensão do automóvel podem levar a comportamentos distintos, quantificados pela métrica do gradiente de sub-esterçamento, tendendo a ser mais sub-esterçante quanto maior for a distribuição de transferência de carga.

Referências

- [1] GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. 1ª ed. Warrendale: SAE International, 1992.
- [2] MILLIKEN, W. F.; MILLIKEN, D. L. **Race Car Vehicle Dynamics**. 1ª ed. Warrendale: SAE International, 1995.



Este é um artigo de acesso aberto distribuído sob os termos da Licença Creative Commons Atribuição - Compartilha Igual (CC BY-SA- 4.0), que permite uso, distribuição e reprodução com a citação dos autores e da fonte original e sob a mesma licença.