

Procedimento para cálculo experimental da posição do centro de gravidade de veículos rodoviários

Ciro K. T. Onuki

Resumo – A posição do centro de gravidade de veículos rodoviários está diretamente relacionada com a segurança. Além de ser um fator influente na dirigibilidade e no conforto da suspensão (devido à sua influência no momento de inércia), o limite no qual o veículo pode fazer uma curva sem capotar é função apenas da velocidade, do atrito com a pista e da altura do centro de gravidade. Para veículos de grande porte este último possui a maior influência. Um procedimento simples para medir experimentalmente esta posição é detalhadamente explicado. Esse procedimento é igualmente preciso e possível de ser adaptado em veículos com geometrias diferentes, nos quais é difícil posicionar as células de carga.

Palavras-chave – Centro de gravidade; Raio de giro; Segurança; Caminhões.

1 Introdução

A posição do centro de gravidade de veículos rodoviários está diretamente relacionada com a segurança.

As curvas efetuadas pelo veículo são caracterizadas pelo raio da curva (o equivalente a “quão aberta” ou a “quão fechada”) e para cada raio existe um limite máximo para o qual o veículo não vai capotar. É fácil perceber que esse limite é diferente para cada velocidade, mas não é tão trivial perceber que os outros fatores são somente o atrito com a pista, a altura do centro de gravidade e a geometria do veículo.

A massa do veículo aumenta a força centrípeta necessária para manter o seu curso, porém também aumenta o atrito fornecido pelo pneu, o que acabam se anulando. Essa relação é demonstrada abaixo.

Considerando que o atrito entre pneu e estrada é um valor entre $0,1 \cdot m \cdot g$ e $0,9 \cdot m \cdot g$ (menor e maior valores possíveis, demonstração matemática abaixo) (WONG, 1993), o veículo pode escorregar as rodas ou não, dependendo do tipo da estrada. Caso as rodas não escorreguem, o que vai definir se o veículo capota ou não é a geometria do conjunto pneu/suspensão/centro de gravidade. Eles devem ser capazes de receber a força resultante (peso combinado com força centrípeta) e de fornecer um ponto de apoio firme o suficiente.

Dada a importância tão grande da altura do centro de gravidade, é de interesse determinar a sua posição e, por isso, um método para medir e calcular é desenvolvido aqui.

2 Revisão bibliográfica

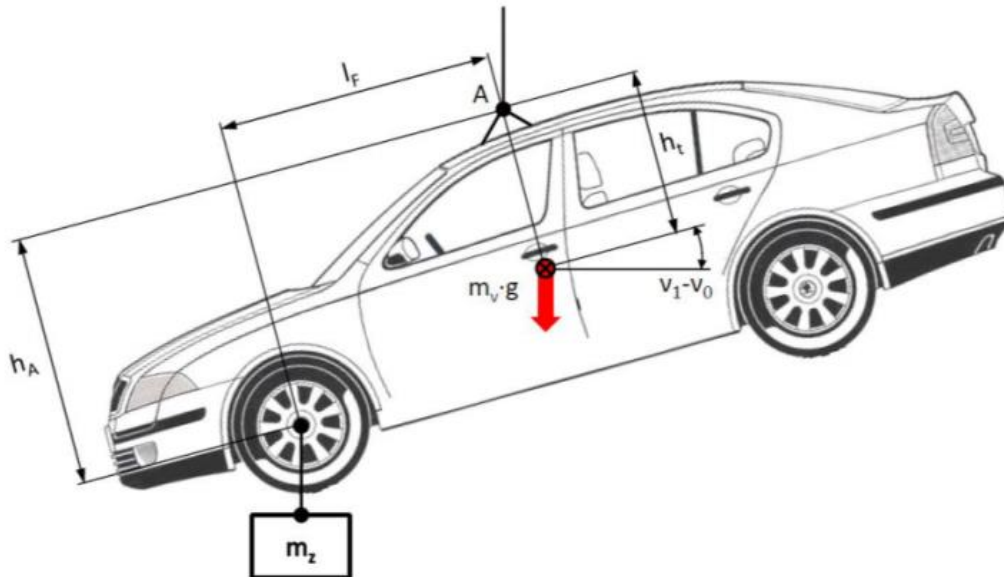
O método clássico para determinar a posição do centro de gravidade é levantar o objeto e deixá-lo pendurado em posições diferentes. O centro de gravidade sempre estará alinhado com o ponto de onde se içou.

Porém, isso é prático para objetos pequenos. Fazer a mesma coisa com veículos é difícil e perigoso.

Um outro método desenvolvido pela Universidade de Michigan (WINKLER et al., 1991) é o método do balanço, que resolve parcialmente o problema. O veículo é levantado numa plataforma móvel que se assemelha a um balanço gigante. O centro de gravidade se alinhará com o gancho de içamento.

Depois, um peso é pendurado numa posição *ad arbitrium* e isso mudará o ângulo do balanço. Como a massa do peso e a posição são conhecidas, é possível calcular a altura do centro de gravidade.

Figura 1 – Método do balanço.



Fonte: (TOMAN, 2014).

Esse método é aplicável com sucesso, sem precisar de grandes alturas de içamento. Também é vantajoso levantar o veículo sem precisar soldar olhais e ganchos, ou seja, é aplicável em veículos de cliente.

Porém, ainda é necessário o içamento, o que é possível com carros de passeio, mas não é com caminhões e ônibus. Veículos de grande porte devem ser medidos por um método mais robusto.

3 Veículo fazendo uma curva fechada

Um veículo com velocidade constante v , ao percorrer uma curva de raio R , é sujeito a uma aceleração a , com a sua correspondente força resultante F num veículo de massa m

$$a = \frac{v^2}{R}, \quad (1)$$

$$F = m \frac{v^2}{R}. \quad (2)$$

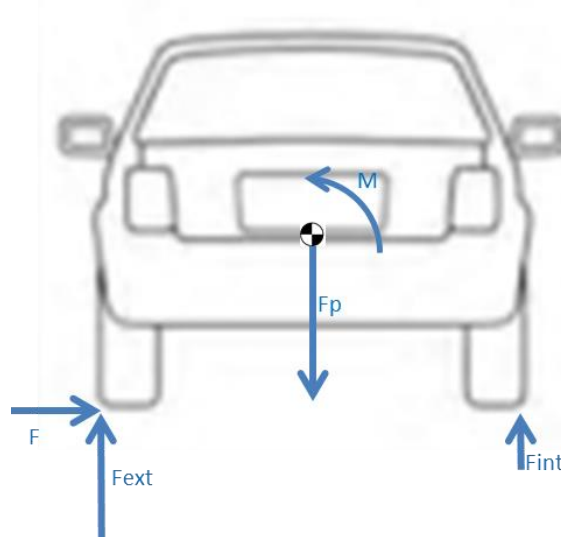
Caso o veículo não tenha asas/*spoilers* e aparatos aerodinâmicos, essa força é produzida somente pelo atrito entre os pneus

$$F = \mu mg. \quad (3)$$

Como a força é aplicada desalinhada com o centro de gravidade, isso produz um momento M no veículo, forçando o tombamento. Os pneus externos à curva sentirão um peso maior F_{ext} e os pneus internos (os quais sentirão um peso menor F_{int}) serão temporariamente aliviados do peso. Ele continuará estável enquanto o balanço dessas forças mantiver o peso do veículo dentro da área entre as rodas.

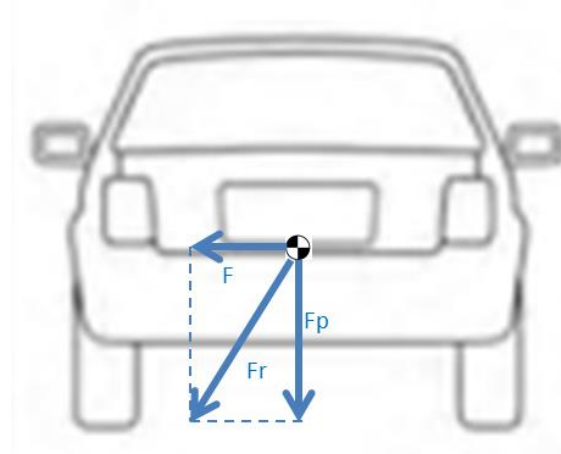
$$F_p = mg. \quad (4)$$

Figura 2 – Diagrama de esforços em um veículo fazendo uma curva fechada.



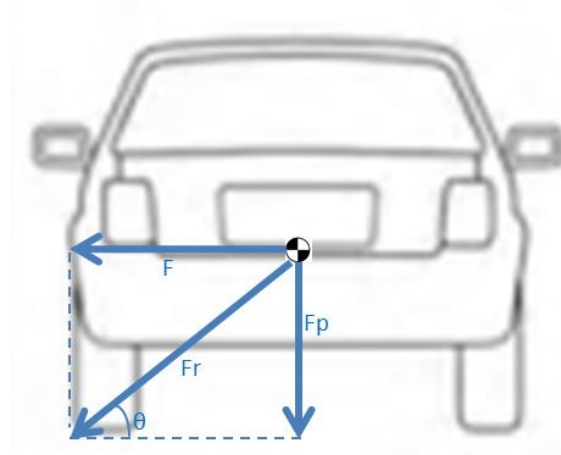
Observando apenas o veículo, ele pode ser simplificado para apenas as forças no seu centro de gravidade.

Figura 3 – Simplificação dos esforços no centro de gravidade do veículo.



Enquanto a força resultante F_r se mantiver dentro da área entre os pneus, o veículo estará estável.

Figura 4 – Condição crítica antes do capotamento.



O valor de F é sempre limitado pelo coeficiente μ , pois existe um limite do quanto o pneu consegue aderir ao asfalto. Para veículos comerciais, o coeficiente para asfalto seco varia de 0,8 a 0,9 (WONG, 1993), então, pela equação 3, F não atinge valores muito maiores do que $0,9 \cdot m \cdot g$.

Para veículos com centro de gravidade baixo, o valor de F é pequeno quando comparado com F_p e insuficiente para deslocar F_r para fora dos pneus. Veículos com $\theta < 30^\circ$ raramente capotam em curvas lisas e o mecanismo mais comum é que o veículo escorrega quando não “vence” a curva.

Para veículos com centro de gravidade alto, o oposto acontece. A força F facilmente desloca F_r para fora dos pneus. Esses veículos tendem a capotar muito mais do que escorregar as rodas.

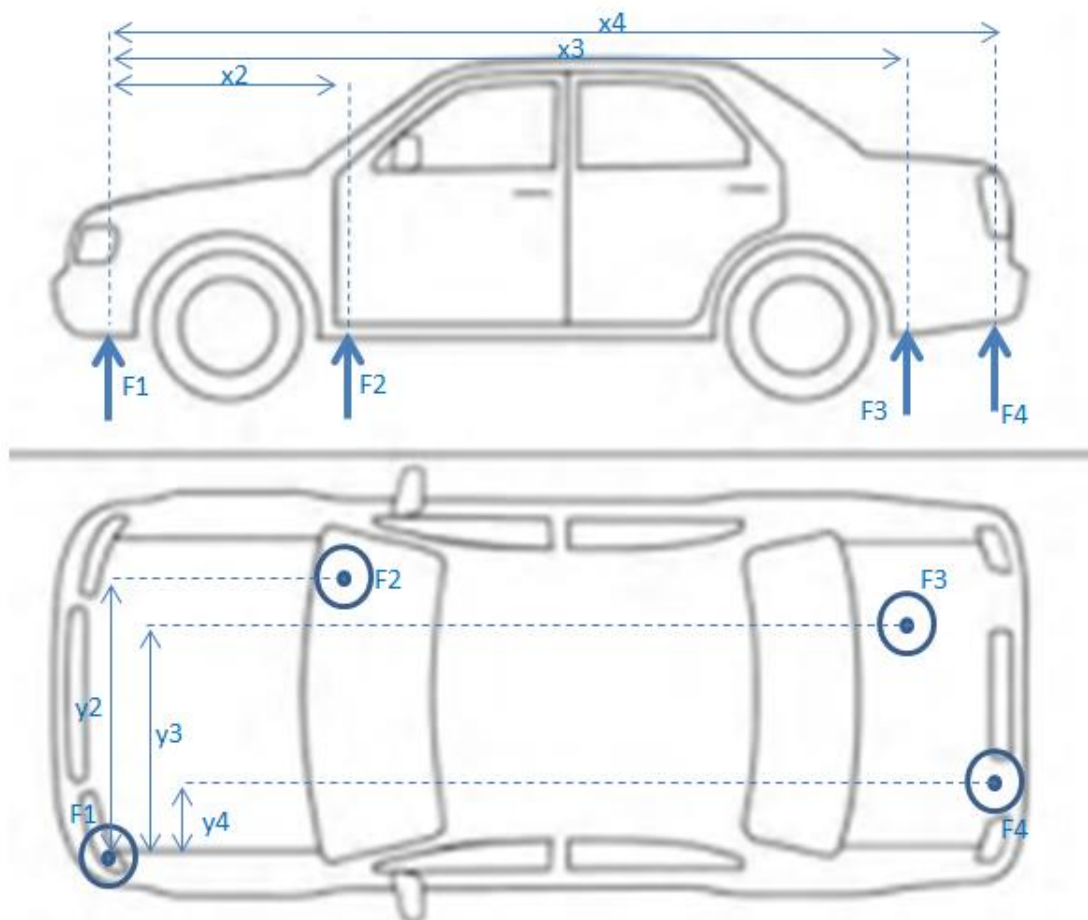
4 Determinação da altura do centro de gravidade

A posição do centro de gravidade pode facilmente ser calculada utilizando algumas balanças e um cálculo simples de diagrama de corpo livre. Porém a altura é complicada e até mesmo perigosa de medir. Com objetos pequenos, o corpo é completamente suspenso em diferentes apoios para determinar a posição tridimensional precisa do centro, o que não é possível com veículos.

4.1 Procedimento

Encaixe quatro células de carga em posições arbitradas no chassi do veículo. Elas não precisam ser simétricas, porém o cálculo é muito facilitado se todas estiverem no mesmo nível horizontal. Também é importante que as posições não sejam alteradas durante a medição.

Figura 5 – Distribuição das quatro células de carga no chassi do veículo.



Pelo diagrama de corpo livre, tem-se que a soma das forças e dos momentos respeita:

$$\sum F = Fp \tag{5}$$

$$F1 + F2 + F3 + F4 = Fp \tag{6}$$

$$\sum M_x = 0 \tag{7}$$

$$F1 \times 0 + F2 \times x2 + F3 \times x3 + F4 \times x4 - Fp \times xg = 0 \tag{8}$$

$$xg = \frac{F2 \times x2 + F3 \times x3 + F4 \times x4}{Fp} \tag{9}$$

$$\sum M_y = 0 \tag{10}$$

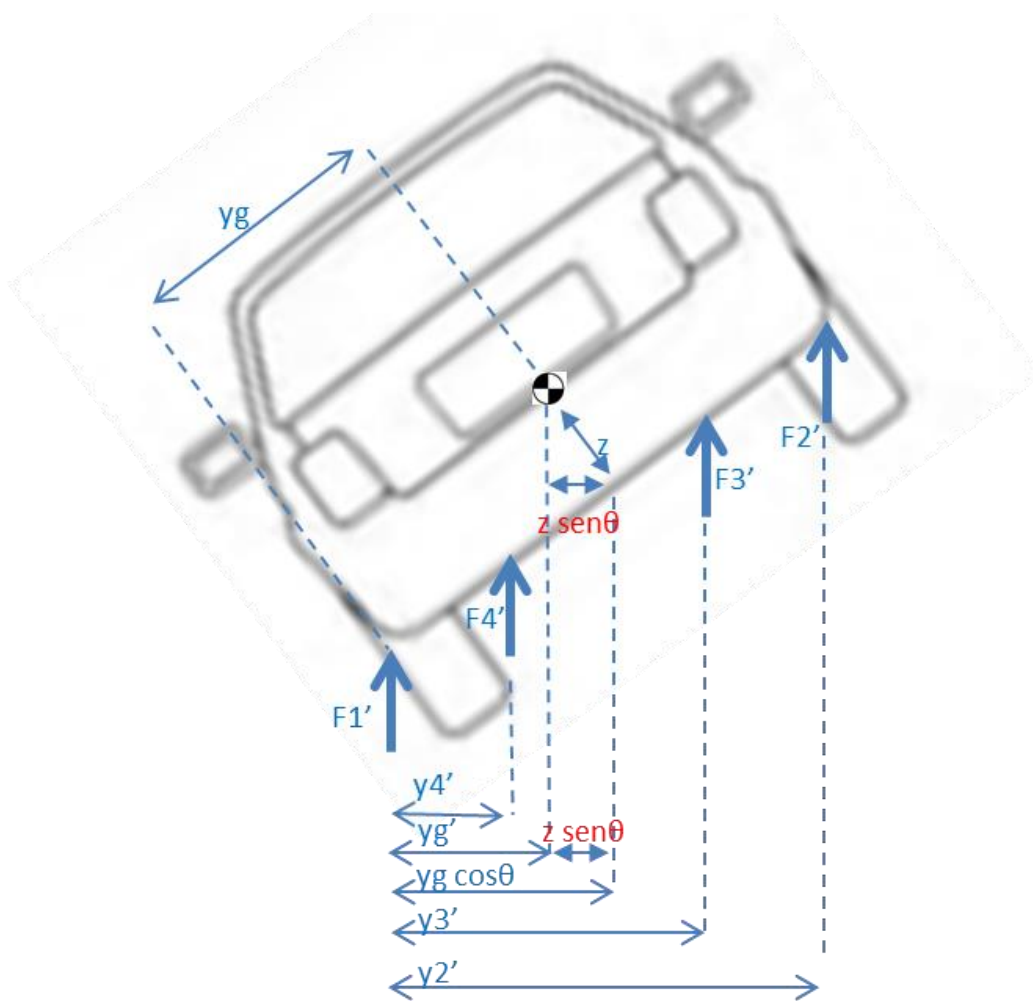
$$F1 \times 0 + F2 \times y2 + F3 \times y3 + F4 \times y4 - Fp \times yg = 0 \tag{11}$$

$$yg = \frac{F2 \times y2 + F3 \times y3 + F4 \times y4}{Fp} \tag{12}$$

Pelas equações 9 e 12, tem-se a posição do centro de gravidade em relação à célula de carga F1, escolhida *ad arbitrium* como a origem do sistema de coordenadas.

Levante o veículo. Bons resultados são obtidos com um ângulo de 20°.

Figura 6 - Distribuição das quatro células de carga para o veículo em posição inclinada.



Novamente, a soma das forças e dos momentos deve seguir:

$$\sum F' = Fp' \quad (13)$$

$$F1' + F2' + F3' + F4' = Fp' = Fp, \quad (14)$$

$$\sum M'_y = 0 \quad (15)$$

$$F1' \times 0 + F2' \times y2' + F3' \times y3' + F4' \times y4' - Fp' \times yg' = 0, \quad (16)$$

$$yg' = \frac{F2' \times y2' + F3' \times y3' + F4' \times y4'}{Fp} \quad (17)$$

$$yg' = \frac{F2' \times y2 \cos\theta + F3' \times y3 \cos\theta + F4' \times y4 \cos\theta}{Fp}, \quad (18)$$

$$yg' = \frac{F2' \times y2 + F3' \times y3 + F4' \times y4}{Fp} \cos\theta \quad (19)$$

Precisa-se descobrir o valor de $z \cdot \text{sen}\theta$. Olhando a Figura 6 percebe-se que:

$$yg \cos\theta - yg' = z \text{sen}\theta, \quad (20)$$

$$z = \frac{yg \cos\theta - yg'}{\text{sen}\theta}, \quad (21)$$

$$z = \frac{\frac{F2 \times y2 + F3 \times y3 + F4 \times y4}{Fp} \cos\theta - \frac{F2' \times y2 + F3' \times y3 + F4' \times y4}{Fp} \cos\theta}{\text{sen}\theta}, \quad (22)$$

$$z = \frac{(F2 y2 + F3 y3 + F4 y4) - (F2' y2 + F3' y3 + F4' y4)}{Fp \tan\theta} \quad (23)$$

A equação 23 é a solução final para a altura do centro de gravidade, em relação à altura inicial da célula de carga F1.

É possível alterar a posição das células de carga, caso se perceba que ao inclinar o veículo o encaixe se torne perigoso. Nesse caso, recomenda-se utilizar a equação 21 na sua forma geral, com as adaptações necessárias.

Et voilà!

REFERÊNCIAS

TOMAN, J. Device for measuring the height position of the vehicle's center of gravity. Brno University of Technology, Czech Republic. Faculty of Mechanical Engineering. 2014, 84 páginas.

WINKLER, C. B.; CAMPBELL, K. L.; et al. Center of gravity height: a round-robin measurement program. The University of Michigan, Transportation Research Institute. 1991, 62 páginas.

WONG, J. Y. Theory of ground vehicles. 2ª edição, New York, N.Y.: Wiley, John and Sons, 1993, pp. 26-28.

Title – Procedure for experimental calculation of the center of gravity position of road vehicles

Abstract – The center of gravity position of road vehicles is directly related to safety. It is a major factor at drivability and at suspension comfort (due to its influence in moment of inertia) and the limit in which the vehicle can drive around a curve without overturning is a function of only velocity, friction with the road and center of gravity height. The latter has the most influence at large size vehicles. A simple procedure to experimentally measure this position is explained in detail. This procedure is equally precise and possible of adaptations at vehicles with different geometries, in which it is hard to position load cells.

Keywords – Center of gravity; Turning radius; Safety; Trucks.

Ciro K. T. Onuki, test engineer at Volvo do Brasil. Worked 8 years testing components for automotive industry, 6 of them testing trucks and 2 of them testing durability of parts. Graduated as mechanical engineer at UFPR, studied at Cranfield University, England, and at MIT.