

## RESPOSTA DA RIGIDEZ DE CHASSI NO EQUILIBRIO DE DIRIGIBILIDADE EM VEÍCULOS DE CORRIDA

**Carlos Vinicius Alves Coimbra, carlos.ccoimbra@hotmail.com**

Universidade Estadual do Maranhão  
Rua do Desterro, Nº18, Condomínio Jardim Europa, Casa 120, Turu

**Thiago Fortaleza de Souza, thiago.fortaleza14@gmail.com**

Universidade Estadual do Maranhão  
Rua Jari, Quadra 2, Nº08, Jardim Eldorado

**RESUMO:** É senso comum que, afim de fazer um veículo de corrida manobrar equilibradamente, pelo ajuste dessa “dirigibilidade”, deve-se ter um chassi com rigidez torcional “X vezes a rigidez da suspensão” ou “X vezes a diferença entre a rigidez da suspensão frontal e traseira”[1]. Esse artigo foca nos fundamentos de rigidez de chassi. O mesmo discute os motivos de um chassi ser rígido, como a habilidade do engenheiro automobilístico de alterar o equilíbrio de dirigibilidade muda com o aumento da rigidez do chassi e quanto de rigidez é necessária no chassi.

**PALAVRAS-CHAVE:** Torção, Equilíbrio de Dirigibilidade, Carro de corrida

**ABSTRACT:** It is common sense that in order to make a race car handle properly by adjusting this "drivability", one must have a chassis with torsional rigidity "X times the stiffness of the suspension" or "X times the difference between the stiffness of the front and rear suspensions"[1]. This paper focuses on the fundamentals of chassis rigidity. The same discusses the reasons for a chassis to be rigid, as the ability of the automobile engineer to alter the balance of drivability changes with the increase in chassis stiffness and how much stiffness the chassis requires.

**KEYWORDS:** *Torsion, Handling Balance, Race car*

### INTRODUÇÃO

Sabe-se que, para fazer um carro de corrida controlável, deve ser possível ajustar o equilíbrio de dirigibilidade. Ajustar esse equilíbrio significa alterar o nível de aderência disponível no eixo dianteiro ou no eixo traseiro. Quando ambos os eixos dianteiro e traseiro podem produzir uma força que vai resultar na mesma aceleração lateral, o chassi pode ser dito equilibrado. A Figura 1 ilustra o comportamento não-linear de um pneu tipicamente usado nos carros de corrida da Fórmula SAE. A Figura 2 mostra um carro da Formula SAE. Pode ser visto claramente que, se um par de pneus de um eixo tem a mesma carga vertical, então eles poderiam ambos produzir a mesma força lateral máxima. Se, por exemplo, o veículo estiver em uma curva, então a aceleração lateral causaria uma transferência de carga, matematicamente demonstrada pela equação 1. Esta aceleração lateral faria aumentar a carga vertical sobre o pneu exterior e diminuir a carga vertical no pneu dentro à mesma taxa. O resultado desta transferência de carga é que os dois pneus combinados podem produzir menos força lateral.

Onde  $TCL$  é a transferência de carga lateral para um eixo,  $a_l$  é a aceleração lateral,  $m_e$  a massa suportada pelo eixo em questão,  $h_{cg}$  é a altura do centro de gravidade e  $t$  a largura da pista. Isso assume um chassi flexível.

### MODELAGEM

A seção de modelagem dentro deste artigo, é uma análise estática simples para determinar os efeitos da rigidez do chassi de torção na capacidade de manter a distribuição de transferência de carga lateral desejada.

#### Análise estática da rigidez do chassi

O modelo de cálculo das forças estáticas presente no chassi sob condições de estado estacionário é apresentado a seguir. Este considera o carro de corrida composto por dois pontos de massa,  $M_d$  e  $M_t$  para a parte dianteira e traseira, respectivamente, ligado por uma mola de torção,  $K$ , e uma suspensão em cada extremidade do veículo representado por uma resistência ao rolamento,  $K_{rold}$  e  $K_{rolt}$ , figura 3.

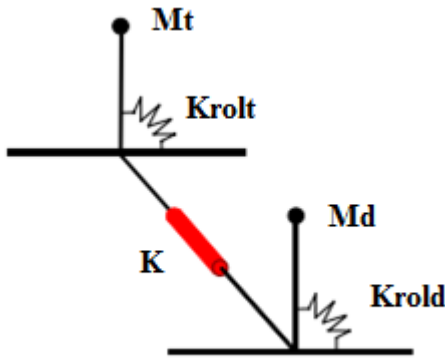


Figura 3 – Modelo estático do efeito da rigidez de torção do chassi na distribuição de transferência de carga lateral

A partir deste modelo, as equações 2, 3 e 4 foram obtidas  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  e  $\varphi_3$  são o ângulo de rolagem da suspensão dianteira, o ângulo de rolagem da parte traseira da suspensão e do chassi de torção, respectivamente.  $M_f$  e  $M_r$  são os momentos dianteiros e traseiros devido à aceleração lateral das massas do corpo.

Estas equações representam um modelo do veículo bastante idealizado, como mostrado na figura 4.



Figura 4 - Modelo idealizado do chassi com duas massas ligadas por uma mola de torção

O veículo real é mais equivalente ao que é mostrado na figura 5, em que a massa está distribuída de forma uniforme ao longo do corpo. Contudo que a rigidez torcional do chassi seja igual em todos os pontos ao longo dele mesmo, então pode ser mostrado que o modelo idealizado ainda representa o chassi atual.

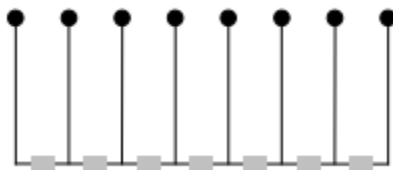


Figura 5 - Modelo do chassi com massa uniformemente distribuída

O veículo real, no entanto, não tem uma massa uniformemente distribuída com toda a massa tendo o

mesmo braço do momento e cada um dos segmentos do chassi tendo uma mesma rigidez torcional. Na realidade, a figura 6 é algo como a distribuição da massa de um veículo real. Objetos mais pesados tais como o motor, a célula de segurança do motorista e o motorista estão localizados próximo do centro de gravidade do carro. Além disso, as molas de torção não podem ser ao longo do mesmo eixo, como mostrado na figura 6. Portanto, há a probabilidade de haver discrepâncias entre os resultados do modelo idealizado e de um veículo real.



Figura 6 - Distribuição de Massa do veículo real

Além disso, há conformidades na suspensão, normalmente conhecidas como rigidez de instalação, o que reduz a rigidez a torção do chassi, visto nas rodas. Estes também devem ser considerados como possíveis erros entre o modelo idealizado, que tem sido proposto, e o veículo real.

#### Equações governantes

$$TCL = \frac{m_e a_l h_{cg}}{l_p} \quad (1)$$

$$M_d = Kroid\varphi_1 - K\varphi_3 \quad (2)$$

$$M_f = Krolt\varphi_2 + K\varphi_3 \quad (3)$$

$$\varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 \quad (4)$$

#### RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos foram usados para indicar como a rigidez do chassi afeta a configuração para uma transferência de carga lateral, isso foi feito a partir de uma análise estática. Os resultados dessa análise estática foram gerados para uma gama de veículos, onde cada rigidez a rolagem total da suspensão representa um veículo. Dixon [2], dá uma gama de valores, Tab. 1, para diferentes tipos de veículos de corrida. A resistência à rolagem típica para carros de Formula SAE também está inclusa.

Tabela 1. Rigidez a rolagem típica de veículos, Nm/deg

Car type	Total roll stiffness, Nm/deg
Saloon	300 – 800
Sports car	2000

Sports prototype	18,000
Formula One	20,000 – 25,000
Formula SAE	500 - 1500

Figuras 9, 10, 11 e 12 mostram a diferença da distribuição de transferência de carga lateral do eixo dianteiro para o eixo traseiro para diferentes distribuições de resistências ao rolamento. Isso é calculado para uma gama de rigidezes de chassi e para uma rigidez a rolagem total de 500, 1500, 5000 e 15000 Nm/deg respectivamente. Todos esses resultados assumem que a razão de distribuição de carga é de 50:50 e as alturas dos centros de gravidade da dianteira e da traseira são as mesmas.

O objetivo é determinar uma rigidez de chassi que assegure que a dirigibilidade do veículo seja suficientemente sensível às mudanças na distribuição da rigidez a rolagem. Uma grande porcentagem da diferença entre a rigidez a rolagem da dianteira para a traseira deve portanto resultar em uma diferença na transferência de carga lateral da dianteira para a traseira, de 80% para fins de exemplo

Olhando para a figura 9, no ponto em que a resistência ao rolamento distribuição é de 30:70, a distribuição de transferência de carga lateral pode ser qualquer coisa de 30:70 até 40:60. Se a diferença da distribuição de carga lateral entre a dianteira e a traseira deve ser 80% da diferença entre a rigidez a rolagem da dianteira e a traseira, então a distribuição de transferência de carga lateral deve ser pelo menos 34:66.

Fica claro a partir da figura 9 que todos, exceto o menos rígido dos chassis mostrados, (100Nm/deg rigidez torcional), produzem uma distribuição de rigidez a rolagem de 34:66 ou maior no ponto em que a distribuição da rigidez a rolagem é de 30:70. Portanto se o critério é de que a diferença entre a transferência de carga lateral entre a dianteira e a traseira deve ser 80% da diferença entre a rigidez a rolagem da dianteira e da traseira, então para carros com molas macias, (Resistencia a rolagem <500Nm/deg), a rigidez torcional do chassi idealizado deve ser maior que 300 Nm/deg.

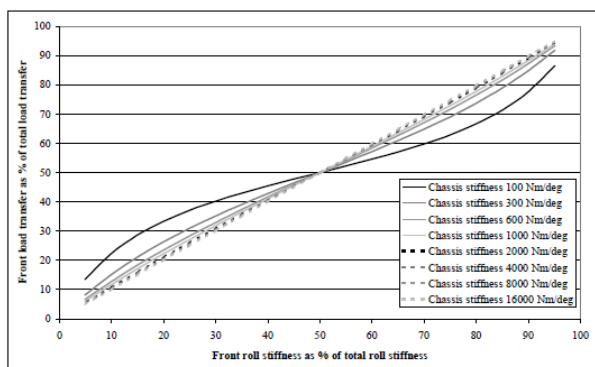


Figura 9 – Transferência de carga lateral de um carro de corrida com rigidez de rolamento de 500 Nm / grau

Com um uma rigidez de rolamento total da suspensão de 1.500 Nm / grau, a rigidez do chassi modelado necessária para produzir uma diferença de carga lateral dianteira para traseira de 80%, da diferença da distribuição da rigidez de rolamento, é cerca de 1000 - 2.000 Nm / grau, figura 10.

Da mesma forma, quando a resistência ao rolamento é aumentada para 5000 Nm / grau, é necessária uma rigidez de torção do chassi modelado maior do que cerca de 6000 Nm / grau, figura 11.

Para o veículo com uma resistência ao rolamento de 15.000 Nm / graus, utilizando a mesma orientação de 80%, é necessária uma rigidez do chassi modelado superior a 10.000 Nm / grau, Figura 12.

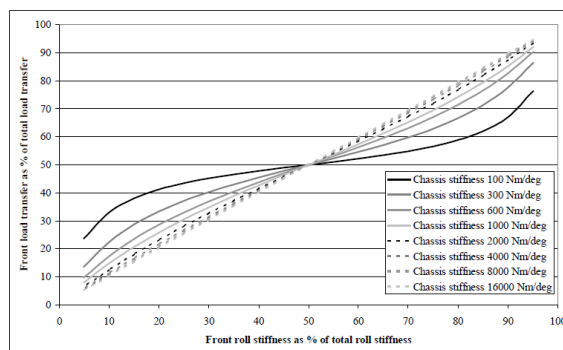


Figura 10 - Transferência de carga lateral de um carro de corrida com rigidez de rolamento de 1500 Nm / grau

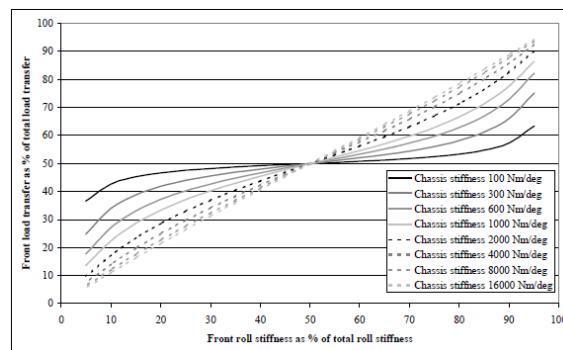


Figura 11 - Transferência de carga lateral de um carro de corrida com rigidez de rolamento de 5000 Nm / grau

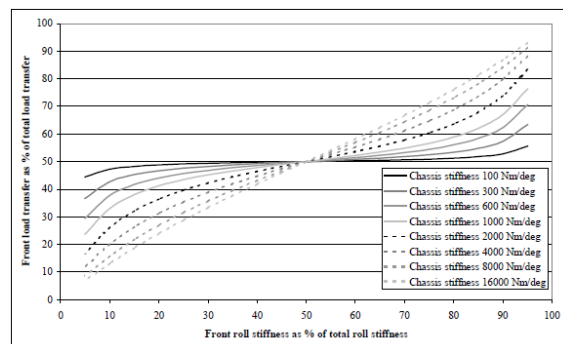


Figura 12 - Transferência de carga lateral de um carro de corrida com rigidez de rolamento de 15000 Nm / grau

Em ambos os casos, o ponto em que a rigidez do chassi não afeta a distribuição de transferência lateral de carga e quando a razão entre a resistência a rolagem da dianteira e da traseira é a mesma para a razão de distribuição de peso entre a dianteira e a traseira

Quando o peso é movido para a traseira e a taxa de rolagem na dianteira é maior que na traseira, menos transferência lateral de carga entre a dianteira e a traseira é alcançada para a mesma distribuição de rigidez a rolagem. Portanto um chassi rígido é necessário

A figura 15 resume os resultados das figuras 9, 10, 11 e 12 para uma distribuição de rigidez a rolagem de suspensão de 60:40. A partir do gráfico pode ser visto, por exemplo, que se é aceitável para a diferença de transferência de carga lateral ser de 80% da diferença da rigidez a rolagem, (a diferença da distribuição de transferência de carga lateral é 20% menor que a diferença de rigidez a rolagem), então a razão entre rigidez a rolagem da suspensão a rigidez torcional do chassi deve ser, aproximadamente, 1.

Se a razão entre a rigidez a rolagem da dianteira e a traseira é reduzida até que fique próxima de 50:50, então a rigidez torcional do chassi é solicitada a ser brevemente maior (4% maior). Entretanto, se a rigidez a rolagem da dianteira para a traseira é aumentada acima de 60:40, um chassi mais flexível pode ser usado.

Se as rigidezes torcional e de rolagem de suspensão são conhecidas, então isso possibilita uma medição aproximada de quão sensível o equilíbrio de dirigibilidade do veículo será para mudanças na distribuição da resistência a rolagem.

## DISCUSSÃO

No que diz respeito ao chassi com diferentes rigidezes torcionais, essas diferenças têm sido atribuídas aos efeitos cinemáticos do modelo do veículo, reduzindo a resistência ao rolamento eficaz em uma extremidade do veículo.

Equação 5, é muito mais uma generalização da razão entre a rigidez do chassi a torção e a rigidez total da suspensão a torção, para produzir uma certa distribuição de transferência de carga a partir de uma certa distribuição de rigidez ao rolamento. Os cálculos sugerem que, se a distribuição de peso do veículo é aproximadamente 50:50, então a equação 5 pode ser utilizada como um guia para determinar o quão rígido o chassi deve ser. No entanto, a fim de fazer isso, é necessário um entendimento do que constitui uma

perda aceitável da distribuição de rigidez de rolamento na carga de distribuição de transferência.

Também tem sido mostrado que os efeitos mais sutis das alterações na rigidez de torção ao longo do chassi e efeitos cinemáticos do veículo influenciam nos resultados. Assim, a rigidez necessária do chassi irá diferir de veículo para veículo, no entanto, esta análise dá uma visão inicial sobre o problema.

## CONCLUSÃO

Tem sido demonstrado que para traduzir uma certa porcentagem da distribuição de rigidez de rolamento da suspensão para uma carga lateral transferir distribuição, deve haver uma certa razão entre a rigidez à torção do chassi e a rigidez a rolagem total da suspensão. Por conseguinte, a rigidez de torção do chassi deve ser um múltiplo da rigidez a rolagem total da suspensão e não a diferença entre a rigidez dianteira e traseira da suspensão como já foi sugerido anteriormente. A rigidez torcional do chassi referidos devem incluir a instalação da rigidez da suspensão.

Tem sido mostrado que um carro de Fórmula SAE que tem uma rigidez de rolamento total da suspensão de 500 - 1.500 Nm / grau requer uma rigidez do chassi entre 300 e 1000 Nm / grau, para permitir que a dirigibilidade possa ser ajustada.

Um carro de Fórmula 1 e veículos com uma rigidez de rolamento semelhante necessitam de uma rigidez de torção do chassi acima de 10.000 Nm / grau, para permitir que a dirigibilidade possa ser ajustada.

Os resultados dinâmicos confirmam que quanto maior a rigidez do chassi, menor terá se ser a diferença na distribuição da rigidez de rolamento para atingir o mesmo equilíbrio de dirigibilidade.

A distribuição da rigidez do chassi ao longo do seu comprimento também tem um efeito sobre a resistência ao rolamento requerido na distribuição para alcançar um bom equilíbrio de dirigibilidade. De fato uma região torcionalmente não-rígida de um chassi perto da suspensão dianteira ou traseira pode efetivamente reduzir mais a rigidez ao rolamento da suspensão.

## REFERÊNCIAS

1. Milliken, F.W.; Milliken, D.L.: 'Race car vehicle dynamics', SAE Int'l, 1995
2. Dixon, J.C.: 'Tyres, Suspension and Handling', Cambridge University Press, 1991. Rectangular Protuberances", Numerical Heat Transfer, Vol.3, pp. 149-167.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo artigo.