

ESTUDO DA INTERAÇÃO PNEU-SOLO PARA VEÍCULOS FORA-DE-ESTRADA E DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS PARA DESENVOLVIMENTO DO PROJETO MINI BAJA

Artur Filipe Rempel
artur.rempel@gm.com

Resumo

Este estudo tem o objetivo chegar ao fator de resistência ao rolamento para o veículo fora-de-estrada Mini Baja.

Primeiramente estudam-se as bibliografias automotivas comuns, que o apresentam de forma simplificada. No entanto, os resultados não possuem a precisão esperada.

Introduz-se então a teoria de mecânica e caracterização dos solos a fim de se basear o desenvolvimento do estudo da interação. No estudo, conceitos principais são apresentados e três tipos de abordagem aplicados ao Mini Baja: o método empírico, usado comumente em veículo militares, o método semi-empírico de Bekker que admite o pneu como roda rígida e o método de Ageikin, o mais detalhado. Chega-se por meio destes métodos a fatores de resistência ao rolamento precisos.

Como forma de verificar a teoria apresentada pelas bibliografias realiza-se uma comparação entre simulação e teste experimental. Para se estimar o gráfico de resistência ao rolamento do veículo em função da distância percorrida simula-se o veículo sem resistência ao rolamento e testa-se o veículo em condições reais. Realiza-se esta comparação para o caso de aceleração e de rampa, obtendo-se em um fator de resistência ao rolamento experimental.

Os resultados bibliográficos, teóricos e experimentais são então comparados e chega-se às conclusões finais do trabalho de formatura.

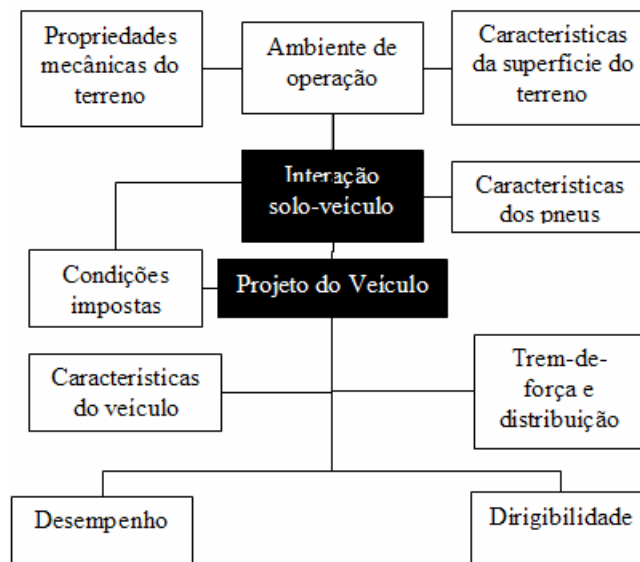
Paralelamente ao estudo da interação, apresentam-se os pneus usados no tipo de solo em que o veículo trafega. Chega-se a conclusões sobre a forma construtiva externa e comprova-se a importância na otimização do contato dos pneus com o solo por meio de um teste de capacidade trativa do veículo.

Palavras chave: Interação pneu-solo, veículos fora-de-estrada, resistência ao rolamento, simulação dinâmica, Mini Baja.

1. Introdução

Dentre os principais parâmetros que definem o projeto de um veículo fora-de-estrada destacam-se o ambiente de operação, a interação pneu-solo e o desempenho e dirigibilidade esperados pelo piloto. Eles estão relacionados de acordo com a Fig. (1):

Figura 1 - Diagrama de desenvolvimento de um veículo fora-de-estrada



Dentro deste diagrama, os assuntos a serem abordados pelo trabalho são: propriedades mecânicas e características da superfície do terreno e características dos pneus. Desta forma se desenvolve o estudo de interação pneu-solo.

2. Resistência ao Rolamento

Os principais fatores que afetam a resistência ao rolamento são: temperatura, dimensão, pressão, material, disposição das ranhuras e velocidade de rotação dos pneus. Estas causas são representadas pelo coeficiente de resistência ao rolamento f_r , que está relacionado ao peso do veículo da seguinte forma:

$$R_x = R_{xf} + R_{xr} = f_r \cdot W \text{ eq. (1)}$$

Onde: R_{xf} – Resistência ao rolamento das rodas dianteiras;
 R_{xr} – Resistência ao rolamento das rodas traseiras;
 W – Peso do veículo.

De acordo com as referências CANALE, GILLESPIE e FENTON, referências comuns na engenharia automotiva, chega-se a faixas de valores estimados de resistência ao rolamento para a aplicação em veículos fora-de-estrada. As Fig. (2) e (3) indicam a resistência ao rolamento para diferentes tipos de solo que foram usadas no cálculo inicial.

Figura 2 - Coeficiente de resistência ao rolamento f_r em função da pressão dos pneus para três tipos de solo (Fonte: GILLESPIE, p. 113)

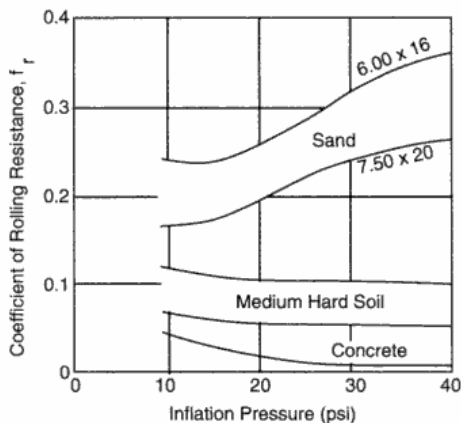
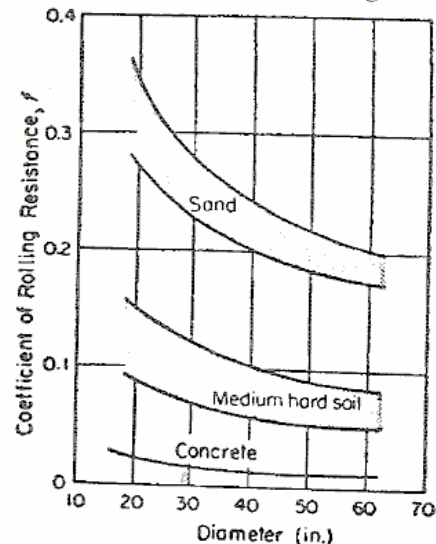


Figura 3 - Coeficiente de resistência ao rolamento f_r em função do diâmetro dos pneus para três tipos de solo (Fonte: FENTON, p. 391)



Os resultados são apresentados na tabela abaixo que apresenta os critérios de projeto usados para sua determinação:

Tabela 1 – Resultados de fatores de resistência ao rolamento usados em bibliografias de engenharia automotiva

Fonte	Valor de f_r	Critério usado
Fenton	0,275	Diâmetro do pneu de 10 pol e solo arenoso
Fenton	0,150	Diâmetro do pneu de 10 pol e solo de dureza média
Gillespie	0,1650	Pressão do pneu de 10 psi e solo arenoso
Gillespie	0,1160	Pressão do pneu de 10 psi e solo de dureza média
Canale	0,1000	Carro de passeio e solo de dureza média
Canale	0,3000	Carro de passeio e areia

As referências apresentadas são úteis para projetos simplificados de veículos. Especificamente nos projetos da Equipe POLI, têm-se usado como referência o gráfico de GILLESPIE. O dimensionamento do sistema de transmissão do veículo nos anos de 2005 e 2006, usando a faixa de coeficientes entre 0,11 e 0,17, têm resultado em um desempenho satisfatório do veículo na competição.

3. Conceitos de mecânica dos solos

A mecânica do solo leva em conta três conceitos importantes: a coesão, que é a capacidade de moldar o solo sem haver falha, a resistência ao cisalhamento e os estados de consistência que definem o tipo de comportamento do solo em função da sua umidade.

A relação entre tensões normais e de cisalhamento de Coulomb apresentada por KARAFIATH, insere o conceito de propriedade de coesão do solo (c). Como mostra a Eq. (2) a seguir:

$$s = c + \sigma_{NORMAL} \cdot \tan(\phi) \text{ eq. (2)}$$

Onde: s é a resistência ao cisalhamento;
 σ_{NORMAL} é a tensão normal;
 ϕ é o ângulo de cisalhamento.

O conceito da máxima força trativa (H) é determinado pela força coesiva somada a força de contato entre o veículo e o solo como mostra a Eq. (3) que é usada no estudo de AGEIKIN:

$$H = c \cdot A + W \cdot \tan(\phi) \text{ eq. (3)}$$

Onde: A é a área de contato entre o pneu e o solo;
 W é o peso do veículo.

Casos extremos:

- Solo muito coesivo: $\phi \rightarrow 0$;
- Solo pouco coesivo: $c \rightarrow 0$;

No entanto, tal fórmula não leva em conta o estado de consistência do solo. Desta forma BEKKER propõe um equacionamento mais apurado que define a pressão de aprofundamento no solo:

$$p = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) \cdot z^n \text{ eq. (4)}$$

Onde: p – pressão exercida sobre o solo (em kN/m^2);

k_c e k_ϕ – coeficientes de Bekker da relação entre pressão e aprofundamento ($[k_c] = kN/m^{n+1}$ e

$[k_\phi] = kN/m^{n+2}$);

b – é o raio ou a menor dimensão da placa circular ou retangular usada na penetração (em m);

z – aprofundamento medido (em m);

n – expoente de aprofundamento.

As formas existentes de caracterização do solo e para obtenção destes parâmetros apresentados acima são: penetrômetro de cone, em que uma haste de penetração é penetrada no solo e a pressão de penetração medida, e o beavômetro de Bekker, em que a pressão de aprofundamento e a relação entre cisalhamento e aprofundamento é medida por meio de uma placa plana e uma placa com pás rotativas, respectivamente.

Obtêm-se os seguintes dados que serão usados mais à frente nos equacionamentos teóricos:

Tabela 2 – Parâmetros de tensão de cisalhamento (Fonte: WONG, p.230)

Tipo de terreno	Cisalhamento do solo		Cisalhamento no contato solo-borracha	
	c (kPa)	Φ (graus)	c (kPa)	Φ (graus)
Solo médio	8,62	22,5	4,64	19,9

Tabela 3 – Parâmetros de pressão e aprofundamento (Fonte: WONG, p.230)

Tipo de terreno	n	k_c (kN/m ⁿ⁺²)	k_ϕ (kN/m ⁿ⁺²)
Solo médio	0,8	29,76	2083

4. Interação pneu-solo

As características que definem a resistência ao rolamento pela rolagem da borracha sólida em superfície rígida estão relacionadas de acordo com a Eq. (5) abaixo:

$$R_x = f_r \cdot F = C \cdot \frac{F^2}{D} \cdot \sqrt{\frac{h_t}{w}} \text{ eq. (5)}$$

Onde: R_x – Resistência ao rolamento;
 f_r – fator de resistência ao rolamento;
 F – Carregamento empregado na roda;
 C – Constante relativa às características elásticas da borracha;
 D – Diâmetro externo do cilindro de borracha;
 h_t – Altura da seção da borracha;
 w – Largura da seção da borracha.

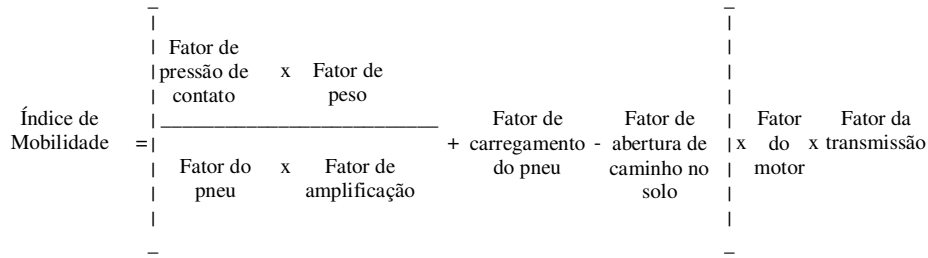
Observa-se que a resistência ao rolamento é sensível ao carregamento aplicado, a composição e dimensões do elemento de contato. Para solos deformáveis, o conceito de resistência ao rolamento passa a depender de outro elemento que sofre deformação, o solo. Também devem ser levadas em conta as características que o compõe e sua geometria, que é alterada pela interação.

A partir destes conceitos básicos, são realizados três estudos de interação pneu-solo:

4.1 Método empírico usado pelo Departamento Militar Norte-americano

Neste método as condições do terreno são identificadas usando um penetrômetro de cone. Partindo de correlações empíricas obtidas em testes de veículos em terrenos chega-se ao índice de mobilidade (MI) que depende dos seguintes fatores conforme a Fig. (4) a seguir:

Figura 4 - Diagrama de desenvolvimento de um veículo fora-de-estrada



Os valores de índice de cone obtidos para o veículo são $VCI_1 = 1,42$ para uma passada e para 50 passadas $VCI_{50} = 4,00$. Tais valores estão dentro do valor máximo típico de solos deformáveis de 32, portanto o veículo Mini Baja possui capacidade de enfrentar estes solos com sucesso.

4.2 Método semi-empírico de Bekker

Neste método o conceito de capacidade de aprofundamento é usado obtendo a Eq. (6) da profundidade z_r para determinação da força de resistência R_x . As equações são respectivamente:

$$z_r = \left(\frac{3 \cdot W}{l \cdot (3 - n) \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) \cdot \sqrt{D}} \right)^{\frac{2}{2-n+1}} \quad \text{eq. (6)}$$

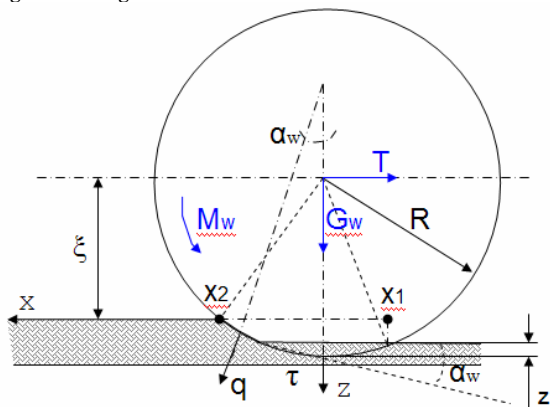
$$R_x = l \cdot \left(\frac{z_r^{n+1}}{n+1} \right) \cdot \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) \quad \text{eq. (7)}$$

Onde: D é o diâmetro do pneu;
 b é a largura do pneu;
 W é o peso do veículo;
 l é o comprimento de contato.

4.3 Método de Ageikin

A partir das Eq. (8), (9) e (10), Ageikin determina o fator de resistência ao rolamento. Estas equações referem-se às forças T e G_w e ao momento M_w , todos de resistência ao rolamento, que estão representados em azul no diagrama abaixo:

Figura 5 - Diagrama das resistências envolvidas no modelamento de Ageikin



$$\int_{x_2}^{x_1} b \cdot (q \cdot \cos(\alpha_w) + \tau \cdot \sin(\alpha_w)) \cdot \frac{dx}{\cos(\alpha_w)} = \int_{x_2}^{x_1} b \cdot (q + \tau \cdot \tan(\alpha_w)) \cdot dx = G_w \text{ eq. (8)}$$

$$\int_{x_2}^{x_1} b \cdot (\tau - q \cdot \tan(\alpha_w)) \cdot dx = T \text{ eq. (9)}$$

$$\int_{x_2}^{x_1} b \cdot [(q + \tau \cdot \tan(\alpha_w)) \cdot x + (\tau - q \cdot \tan(\alpha_w)) \cdot (\xi + z_{ap})] \cdot dx = M_w \text{ eq. (10)}$$

Onde: b – largura de contato;
 q e τ – reações médias normal e tangencial do solo sobre a largura de contato;
 ξ – distância do eixo do pneu até a superfície do solo;
 z_{ap} – aprofundamento do pneu no solo.

5. Simulação e comparação com teste

A fim de se realizar a modelagem matemática para obtenção do fator de resistência ao rolamento experimental, referencia-se GILLESPIE. O equacionamento chega à seguinte relação:

$$a_x = \frac{1}{\gamma \cdot M} \cdot \left(\frac{T_{MOTOR} \cdot i_{TOTAL}}{r_{PNEU}} - R_x - D_A - W \cdot \sin(\theta) \right) \text{ eq. (11)}$$

Onde: a_x é a aceleração instantânea do veículo;
 γ é o fator de massa rotacional equivalente;
 M é a massa do veículo;
 T_{MOTOR} é o torque do motor;
 i_{TOTAL} é a relação de transmissão total;
 r_{PNEU} é o raio do pneu;
 R_x é a força de resistência ao rolamento;
 D_A é a força de arrasto aerodinâmico;
 R_{DP} é a força de resistência de carreta (se houver);
 W é o peso do veículo;
 θ é a inclinação da rampa (se houver).

O objetivo da simulação e comparação com testes é chegar a um gráfico estimado de R_x em função da velocidade para o veículo Mini Baja. Para tanto, na simulação a força reativa ao rolamento é anulada e realiza-se o teste real do veículo. A diferença de desempenho é calculada chegando-se ao gráfico da força de resistência ao rolamento em função da distância percorrida.

Definem-se os seguintes parâmetros de entrada: características físicas e dimensionais do veículo (Peso - W , raio do pneu trativo - r_{PNEU} , momento de inércia de todos os componentes rotativos), curva de torque do motor (T_{MOTOR}) medida em dinamômetro, gráfico da relação de transmissão da CVT em função da velocidade do carro ($i_{CVT} = i_{CVT}(v)$).

Figura 6 - Gráfico da relação de transmissão da CVT em função da rotação da roda usado no modelamento

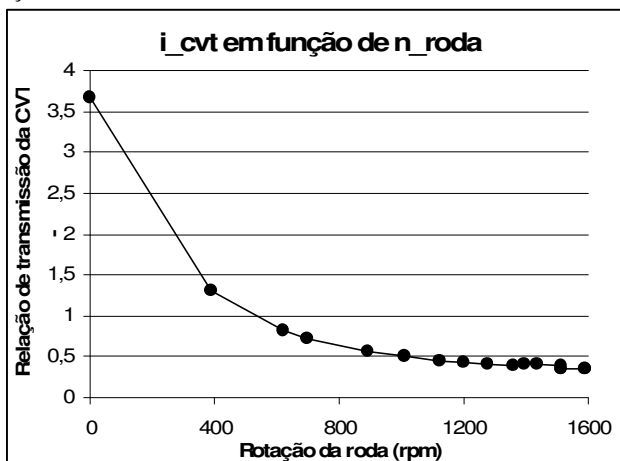
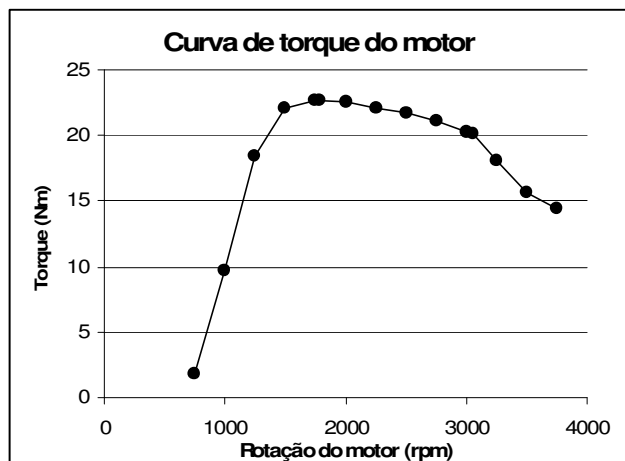
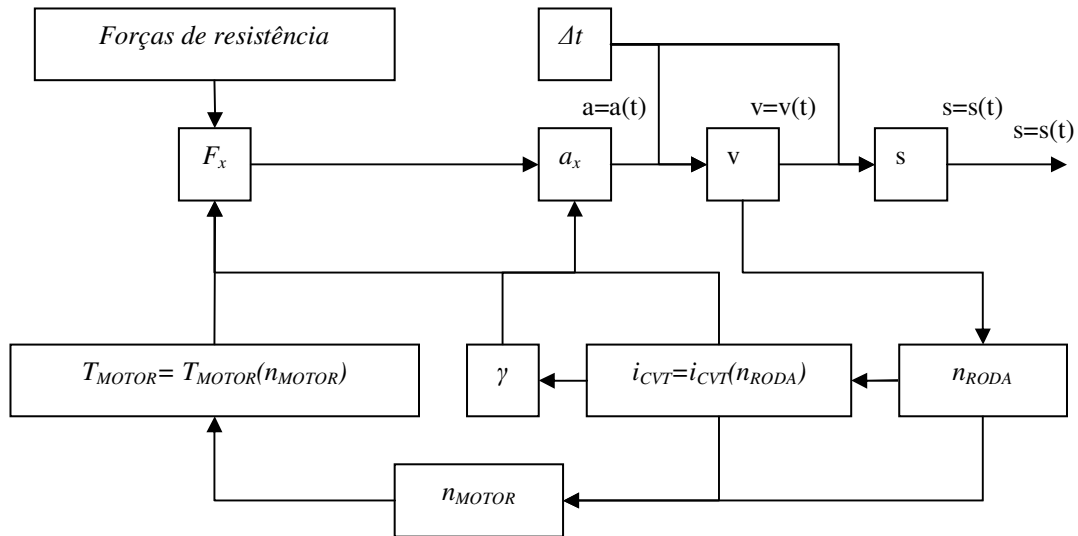


Figura 7 - Gráfico do torque do motor em função de sua rotação usado no modelamento



Realiza-se a simulação por meio do diagrama de blocos da Fig. (4), que resume a metodologia de cálculo e a saída da simulação:

Figura 8 – Diagrama de blocos da simulação de um Mini Baja



O resultado da comparação é obtido e chega-se aos seguintes gráficos:

Figura 9- Gráfico da comparação entre simulação e teste para uma aceleração

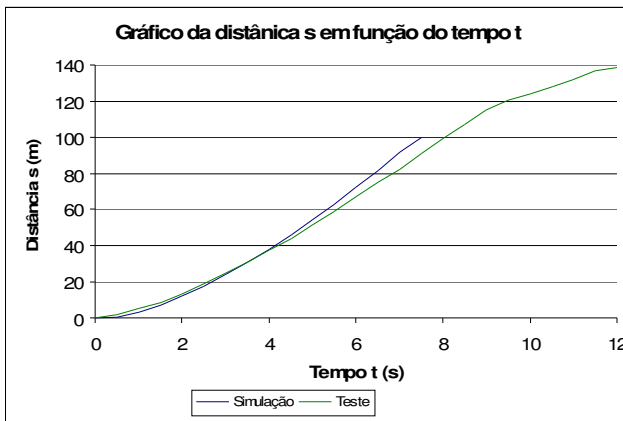
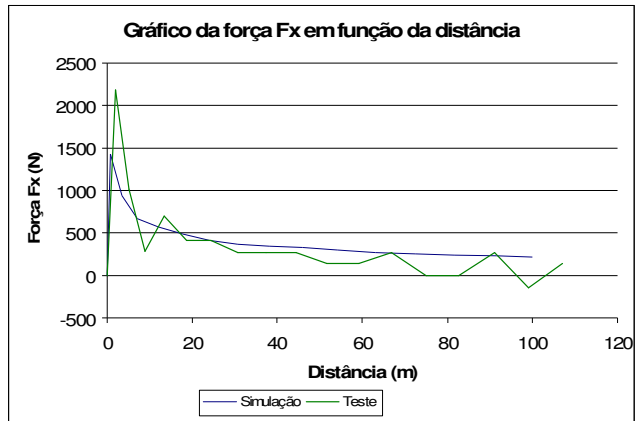
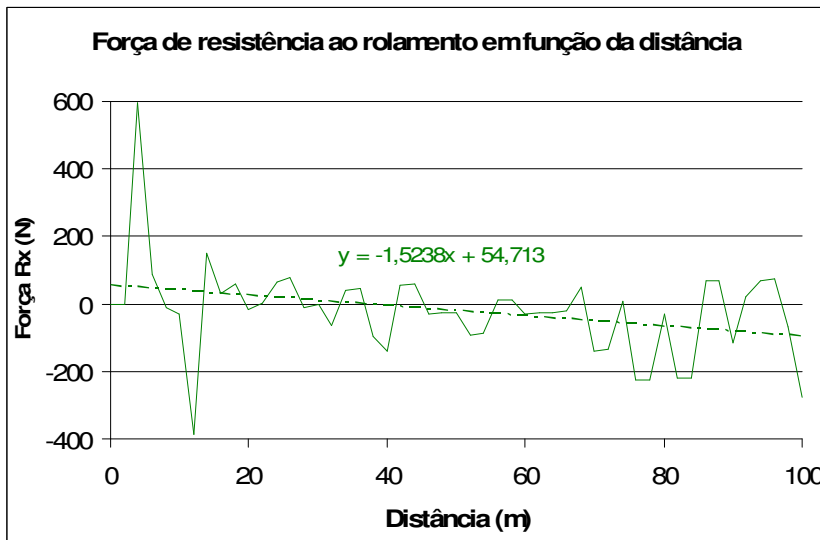


Figura 10 – Gráfico da comparação da força trativa entre simulação e teste para uma aceleração



Os resultados da comparação para uma aceleração foram unidos aos resultados de teste de rampa e chega-se à força de resistência à curva de força de resistência ao rolamento em função da distância:

Figura 11 – Gráfico da força de resistência do rolamento em função da distância



Conclui-se por meio da comparação que o fator de resistência ao rolamento encontrado é 10 vezes menor que os fatores calculados teoricamente. A principal causa identificada foi o local de medição dos testes. Para determinação das rotações dos eixos do motor e do pneu, os testes foram realizados em solos pouco ou indeformáveis (gramado no teste de rampa e asfalto no teste de aceleração).

6. Conclusões do estudo de interação pneu-solo

Os coeficientes obtidos neste trabalho estão descritos na tabela abaixo:

Tabela 6 – Coeficientes de resistência ao rolamento obtidos para o Mini Baja

Fonte	Valor de f_r	Observação
Bekker	0,190	Mini Baja em solo de baixa dureza
Ageikin	0,2216	Mini Baja sobre solo de média dureza com camada compacta
Ageikin	0,2284	Mini Baja sobre solo de média dureza sem camada compacta
Comparação	0,016	Mini Baja sobre solo indeformável

A obtenção dos fatores de resistência ao rolamento teóricos foi baseada em terrenos apresentados nas bibliografias e suas condições. Tais terrenos possuem semelhança com os terrenos transitados pelo veículo Mini Baja. O resultado do método semi-empírico de Bekker foi obtido para a movimentação do veículo em solo de baixa dureza e os resultados de Ageikin para solos de dureza média. O tipo de solo que melhor representa o terreno enfrentado pelo Mini Baja é o solo de dureza média, portanto os resultados de Ageikin estão mais próximos do valor do coeficiente de resistência real.

Portanto, coeficiente de resistência ao rolamento obtido neste estudo e que pode ser aplicado para realizar o projeto do Mini Baja é $f_r=0,2216$. Tal fator pode ser usado no dimensionamento da transmissão do veículo com a garantia de que o veículo enfrentará o terreno presente nas pistas de competição.

O valor do fator de resistência ao rolamento encontrado por meio da comparação entre simulação e teste ($f_r=0,016$) é útil para um veículo Mini Baja sobre superfícies não deformáveis como o asfalto e pode ser usado no desenvolvimento do veículo para a prova de aceleração da competição nacional que tem usado pistas pavimentadas para sua execução nos últimos anos.

7. Conclusões da capacidade trativa do Mini Baja

De acordo com a teoria de GILLESPIE sobre limites de tração, tem-se a seguinte fórmula, que relaciona propriedades geométricas do veículo, seu peso e o coeficiente de atrito pneu-solo:

$$F_{x\text{MÁX}} = \frac{\mu \cdot \frac{W \cdot c}{L}}{1 + \frac{h}{L} \cdot \mu} \text{ eq. (12)}$$

Onde: μ – coeficiente de atrito pneu-solo;
 h – altura do CG;
 W – peso do veículo;
 c – distância entre o eixo de tração e o CG;
 L – entre eixos do veículo.

O valor da força máxima trativa teórica que um veículo Mini Baja pode desenvolver é de 318,75 N.

Para verificar a diferença entre o cálculo teórico e a prática, foi realizado um teste de capacidade trativa com o veículo onde se mediu o comportamento do veículo de acordo com a Fig. (12).

Figura 12 – Teste de capacidade trativa do Mini Baja



O valor de 318,75 N calculado está bem abaixo do valor de 230 kgf obtido experimentalmente. Durante o teste, observou-se claramente que os blocos da banda de rodagem dos pneus trativos realizaram o trabalho de escavação do solo. Caso os pneus fossem lisos, ocorreria somente o deslizamento entre as superfícies. No entanto, o trabalho de escavação proporcionou um aumento significativo da capacidade trativa do veículo. A diferença encontrada entre o teste e o cálculo teórico comprova a necessidade de haver uma disposição dos blocos nos pneus que otimize a capacidade trativa do veículo.

8. Conclusões do estudo de pneus

A observação de pneus agrícolas trouxe à tona a diferença essencial entre os pneus dianteiros (direcionais) e traseiros (trativos). A partir desta observação realizada nos pneus agrícolas da marca Pirelli foi possível determinar com segurança a forma construtiva dos blocos dos pneus da Equipe POLI.

A partir de abril de 2006, optando-se por otimizar a dirigibilidade do veículo, remoldou-se os blocos da banda de rodagem dos pneus dianteiros. Após submetê-la a um processo de usinagem, foram alocados blocos no sentido paralelo ao sentido de rotação da roda dispostos continuamente no centro e espaçados na periferia. Além disto, optou-se por adicionar sulcos para expurgo de material aderente do solo, proporcionando a capacidade de autolimpeza ao pneu, como mostra a Fig. (13). Esta configuração reduziu a resistência ao rolamento dos pneus e proporcionou bom desempenho do veículo em solos com alto teor de umidade, ou seja, próximos ao limite de liquidez. Portanto, a escolha da configuração correta da forma construtiva externa dos pneus atingiu os requisitos de projeto do veículo, pois obteve o desempenho e dirigibilidade esperados.

Figura 13 – Pneu remoldado usado na dianteira do protótipo 2006



9. Referências Bibliográficas

- AGEIKIN, Ia. S., "Off-the-road Wheeled and Combined Traction Devices: Theory and Calculation", A.A. Balkema, Rotterdam, 1988.
- BEKKER, M. G., "Theory of Land Locomotion", The University of Michigan Press, Michigan, 1956.
- CANALE, A. C., "Automobilística: dinâmica, desempenho", Livros Érica Editora LTDA, São Paulo, 10ª ed., 1993.
- FENTON, J., "Handbook of Automotive Powertrains and Chassis Design", Professional Engineering Publishing, London, 1998.
- GILLESPIE, T.D., "Fundamentals of Vehicle Dynamics", Society of Automotive Engineers, Inc., Nova York, 1992.
- KARAFIATH L. L., "Soil Mechanics for Off-Road Vehicle Engineering", Trans Tech Publications, Clausthal, 1978.
- WONG, J. Y., "Terramechanics and Off-Road Vehicles", Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, 1989.

OFF-ROAD VEHICLES WHEEL-SOIL INTERACTION STUDY AND PARAMETERS DETERMINATION FOR THE MINI BAJA PROJECT DEVELOPMENT

Artur Filipe Rempel

artur.rempel@gm.com

Abstract

The main objective of this study is to reach the rolling resistance factor for the Mini Baja off-road vehicle.

Firstly, typical automotive bibliographies are studied. The rolling resistance factor is shown in a simplified way that doesn't have the desired precision.

Mechanics of grounds is introduced in order to basis the vehicle-soil interaction study. In the interaction study, the main principles are shown in three different methods: empirical method, used in military vehicles, semi-empirical method developed by Bekker, that assumes the tire as a rigid wheel, and the Ageikin method, which has the most detailed approach. With these methods, theoretical rolling resistance factors are calculated with more precision than the obtained on the automotive bibliographies.

In order to verify the theoretical and bibliographical factors, a simulation-test comparison is made. The vehicle is simulated without the rolling resistance force and the result is compared with the real measured force vs. distance graphic. The comparison is done for the acceleration and ramp conditions and the experimental rolling resistance factor is obtained.

The bibliographical, theoretical and experimental rolling resistance factors are compared and the final conclusions reached.

At the same time, the tires used in the soil where the Mini Baja vehicle runs are shown. Conclusions about the external architecture of the tire are made. The importance of the tire-soil contact optimization is also discussed by a traction capacity test.

Keywords: *Tire-soil interaction, off-road vehicles, rolling resistance coefficient, dynamic simulation, Mini Baja.*