



# Influência de diferentes bandas de rodagem na caracterização de modelo de pneu de pequeno porte

Universidade Estadual de Campinas  
Faculdade de Engenharia Mecânica

*Aluno:* Davi Alves de Mendonça - RA:169729

*Orientador:* Franco Giuseppe Dedini

*Co-orientador:* Fabio Mazzariol Santiciolli

## 1. Introdução

O pneu é um componente de grande importância na dinâmica veicular. Responsável pelo contato entre o veículo e o solo, suas características possuem grande influência no desempenho do veículo. O comportamento do veículo, o conforto, o desempenho de tração e frenagem estão relacionados fortemente à dinâmica dos pneus. A precisão da análise de desempenho dinâmico e a realização do sistema de controle do chassi dependem intensamente do modelo dinâmico do pneu e sua caracterização. [1]

No cenário atual o estudo e a modelagem do pneu vêm se tornando cada vez mais importantes com o avanço de veículos e robôs autônomos. Para isso é necessário conhecer o comportamento dinâmico dos pneus para otimizar os esforços de controle. [2] Até agora, os problemas de modelagem do sistema pneu-solo foram abordados principalmente do ponto de vista dos requisitos dos veículos automotivos, que ao longo dos anos resultaram no desenvolvimento de vários modelos de pneus com diversas capacidades. No entanto, verifica-se que os robôs móveis com rodas, especialmente os robôs leves, diferem significativamente dos veículos automotivos em termos de aplicações, manobras realizadas, tipos de terreno, design do veículo e parâmetros dos pneus. Há proporcionalmente pouco trabalho até agora no campo da modelagem da interação pneu-estrada para robôs de rodas leves. [3]

Neste contexto, este trabalho continua a iniciação científica realizada pelo autor sob financiamento do CNPq durante o período de agosto de 2018 a agosto de 2019. Uma vez que a parametrização de um pneu de pequeno porte quanto ao escorregamento puro e combinado através da metodologia de Pacejka já foi realizada, o objetivo presente nessa iniciação científica é analisar a influência de uma diferente banda de rodagem, de mesmas dimensões, na caracterização do modelo de pneu de Pacejka.

## 2. Características dos pneus

Esse estudo focou-se na parte estrutural do pneu, levando em consideração a construção dos pneus e as diferentes bandas de rodagem. A parte da dinâmica do pneu é abordada pelo modelo de Pacejka que encontra as forças no pneu através da parametrização do mesmo. A construção do pneu é formada basicamente por uma carcaça, talão, paredes laterais, cintas metálicas ou estabilizadoras e a banda de rodagem.

Os sulcos na banda de rodagem possuem um papel fundamental no desempenho do pneu. Para veículos *onroad* sua principal função é evitar a aquaplanagem promovendo um fluxo de água pelos sulcos e auxiliar na garantia de durabilidade do pneu. Já para veículos *offroad* sua principal função é aumentar a aderência em solos macios por meio de uma maior penetração no solo. Heisler [4] divide as bandas de rodagem em alguns padrões comuns que estão apresentadas na Figura 1.

Outro conceito importante sobre os pneus é a relação de aspecto, representada na Figura 2, que é definida como uma razão entre a altura da seção do pneu e a sua espessura. Alguns dos principais efeitos que acontecem com a diminuição da relação de aspecto são: aumento da capacidade de carga vertical do pneu; o maior contato permite a realização de curvas em velocidades mais altas devido à maiores forças laterais; menor deflexão do pneu e assim há uma menor perda de energia pela resistência a rolagem que gera uma economia de combustível e maior durabilidade do pneu; maior dificuldade de drenagem da água principalmente na região central, porém isso pode ser evitado com as tecnologias no design dos sulcos. [4]

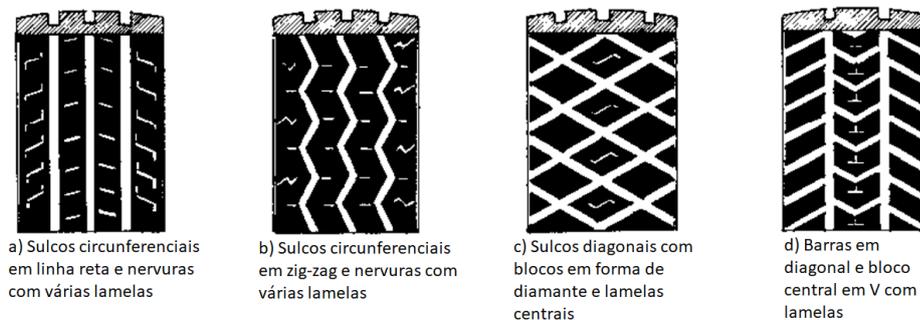


Figura 1: Padrões de bandas de rodagem. [4]

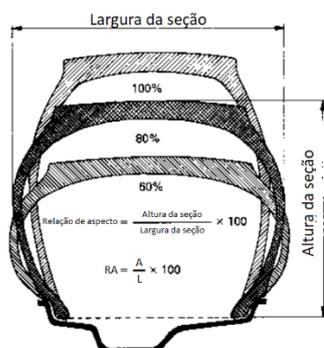


Figura 2: Perfil de pneus com diferentes relações de aspecto. [4]

### 3. Modelo de Pacejka

Hans Bastiaan Pacejka propôs o principal modelo empírico de pneu conhecido como Fórmula Mágica. Esse modelo é baseado em uma função do tipo  $\text{sen}(\arctan)$  que não só proporciona um ajuste excelente para curvas  $F_x$ ,  $F_y$  e  $M_z$ , como possui coeficientes que têm relações claras com fatores de forma e magnitude das curvas a serem ajustadas. A fórmula geral é mostrada nas Equações 1, 2 e 3. [5]

$$y = D \sin [C \arctan(Bx - E(Bx - \arctan(Bx)))] \quad (1)$$

$$Y(X) = y(x) + S_V \quad (2)$$

$$x = X + S_H \quad (3)$$

Onde  $Y$  pode ser, alternativamente, a Força Lateral ( $F_y$ ) ou o Momento de Alinhamento ( $M_z$ ) com  $X$  sendo o ângulo de deriva  $\alpha$ . Também pode-se tomar  $Y$  como a Força Longitudinal ( $F_x$ ) com  $X$  sendo o escorregamento longitudinal  $\kappa$ .

Para facilitar a análise, Pacejka divide o movimento do pneu em duas condições, com escorregamento puro e com escorregamento combinado. Além disso, inclusos nas equações estão os fatores de escalas que são uma importante ferramenta desenvolvida por Pacejka.

O escorregamento puro trata-se do movimento da roda quando o ângulo de deriva é zero e existe apenas o escorregamento longitudinal ou quando o escorregamento longitudinal é zero e existe apenas ângulo de deriva. Para esta condição são utilizadas as equações 1, 2 e 3 onde cada um dos coeficientes é formado por subcoeficientes que são os parâmetros do pneu. Assim na iniciação científica anterior obteve-se as curvas de força lateral e longitudinal e todos os parâmetros do pneu para o escorregamento puro. Já o escorregamento combinado trata-se da variação do ângulo de deriva juntamente com o escorregamento longitudinal. Para esta condição Pacejka propõe uma função de ponderação que indica a influência de  $\alpha$  na força longitudinal e de  $\kappa$  na força lateral.

Uma ferramenta utilizada pelo modelo de Pacejka 2002 são os fatores de escala que permitem investigar as mudanças de coeficiente de atrito, rigidez em curva, rigidez de forma, etc., para diferentes pisos e pneus. A vantagem dessa ferramenta é a possibilidade de obter a modelagem para outras condições de pneu, clima, pressão, carga e pista sem a necessidade de realizar uma parametrização completa. [5]

Uma forma de obter os fatores de escala empiricamente é identificar os coeficientes e subcoeficientes apenas para um teste de referência e para os outros testes apenas os fatores de escala são identificados assumindo os mesmos coeficientes. Esse método foi utilizado nesta pesquisa pelo fato de apresentar uma menor dispersão e porque já tem-se os coeficientes e subcoeficientes bem definidos para o pneu 4PR Imsa obtido das pesquisas anteriores. [6]

#### 4. Materiais e Métodos

Para a realização dos testes experimentais foi utilizado a bancada, a qual possui patente junto ao INPI de número PI1004332-2A2. A disposição da bancada atual é basicamente uma mesa de Honeycomb, três células de carga, sendo duas delas transversais e uma longitudinal, dois motores elétricos, onde um é um motor de passo responsável pela translação da roda e outro é um motor CC responsável pela rotação da roda. Com a combinação dos dois motores é possível impor o escorregamento longitudinal. A bancada contém também um atuador pneumático vertical controlado por uma válvula pneumática proporcional, pelos quais é possível impor a força vertical sobre a roda, e alguns sensores como extensômetros e encoders.

Os pneus utilizados nesta pesquisa foram o 4PR Imsa e o 4PR Shioppa, ambos de tamanho 6" x 2" (diâmetro x largura), utilizados para paletes de tração humana, mas podendo ser também utilizados para veículos robóticos. A relação de aspecto, anteriormente apresentada, do pneu 4PR Imsa é de 60% e do pneu 4PR Shioppa é 70%. Além disso a principal diferença entre eles é a banda de rodagem. Os pneus estão representados na Figura 5.

Uma vez que todos os parâmetros do pneu 4PR Imsa já foram encontrados no trabalho que esta iniciação continua, os testes foram realizados com o novo pneu 4PR Shioppa. Porém, como agora apenas os fatores de escala seriam encontrados, que são em quantidade bem menor que os parâmetros, foi realizado uma quantidade menor de experimentos.



Figura 5: Pneu a serem comparados: 4PR Imsa (A) e 4PR Shioppa (B).

Para a realização de um experimento o ângulo de deriva é regulado através de uma rótula e verificado por meio de um escâner, ajusta-se a pressão do pneu, a carga vertical é imposta através do LabVIEW® que comanda um atuador vertical e o teste é realizado variando o escorregamento longitudinal automaticamente. Esses experimentos são feitos de forma recursiva. Após isso, iniciou-se a rotina computacional utilizando o algoritmo genético de otimização (IOA) para encontrar os fatores de escala propostos por Pacejka. Primeiro foi feito a otimização dos fatores para o escorregamento puro e posteriormente do combinado.

#### 5. Resultados e Discussão

Para o escorregamento puro após a realização dos testes foi feita a otimização dos fatores de escala. Todos os fatores de escala para as forças longitudinais e laterais foram encontrados. Alguns fatores foram mantidos como unitários pois multiplicam o ângulo de cambagem que nessa pesquisa foi regulado em zero para todos os testes.

Na Tabela 1 estão representados os fatores de escala para o escorregamento puro. Com isso, foi possível pós processar os dados e formar as curvas a partir da equação de Pacejka com os parâmetros encontrados. As curvas e os pontos experimentais para o pneu 4PR Imsa e para o pneu 4PR Shioppa escalado estão representados na Figura 6.

Tabela 1: Resultado da otimização dos fatores de escala para o escorregamento puro.

FORÇA LONGITUDINAL						
$\lambda_{C_x}$	$\lambda_{\mu_x}$	$\lambda_{E_x}$	$\lambda_{K_{xx}}$	$\lambda_{H_x}$	$\lambda_{V_x}$	
0,3000	1,4916	0,6539	0,9071	0,0388	0,4403	
FORÇA LATERAL						
$\lambda_{C_y}$	$\lambda_{\mu_y}$	$\lambda_{E_y}$	$\lambda_{K_{y\alpha}}$	$\lambda_{K_{yy}}$	$\lambda_{H_y}$	$\lambda_{V_y}$
0,8972	0,3396	0,9989	6,6122	1,0000	0,1445	1,2352

Com os fatores de escala para a condição de escorregamento puro foi possível encontrar os fatores para o escorregamento combinado. A Tabela 2 apresenta os fatores de escala para a força longitudinal e lateral, onde o primeiro é da força longitudinal e os outros dois são da força lateral.

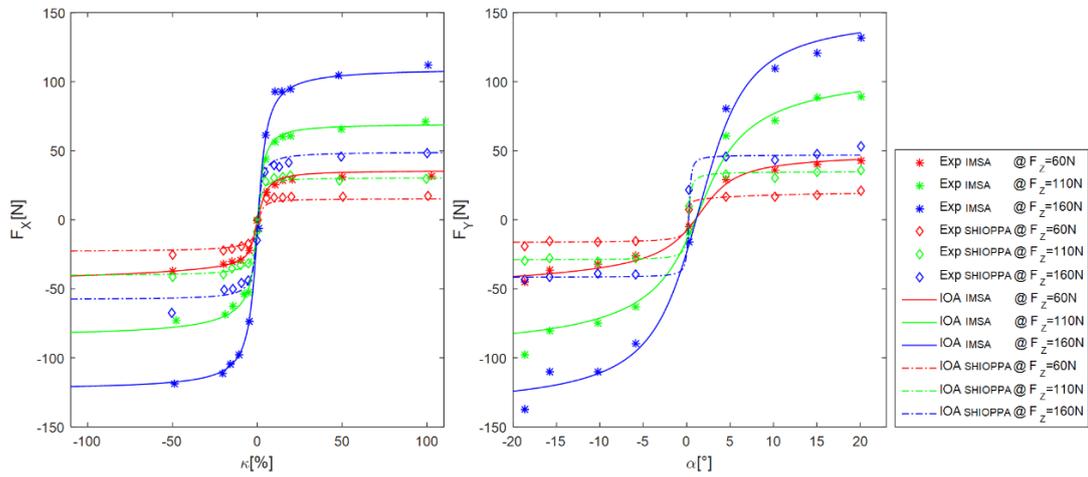


Figura 6: Forças longitudinal e lateral para escorregamento puro de ambos os pneus.

Tabela 2: Resultado da otimização dos parâmetros para o escorregamento combinado.

$\lambda_{x\alpha}$	$\lambda_{y\kappa}$	$\lambda_{y\alpha}$
1,6764	1,6945	0,8964

O pós processamento para a condição de escorregamento combinado foi feito com uma superfície variando o ângulo de deriva e o escorregamento longitudinal para que seja possível identificar a influência de ambos na força longitudinal e lateral. Assim uma malha foi criada variando o  $\alpha$  de  $-20^\circ$  a  $20^\circ$  com uma discretização mínima de  $5^\circ$ ; e variando o  $\kappa$  de  $-110\%$  a  $110\%$  com uma discretização mínima de  $4\%$ . Juntamente com as superfícies estão os pontos experimentais, onde cada cor indica um teste realizado.

A Figura 7 representa os resultados do pós processamento pra uma determinada força vertical (160N) explorada nos testes para o pneu Shioppa com a utilização dos fatores de escala para os três diferentes níveis de força selecionados. É possível notar que utilizando apenas a ferramenta dos fatores de escala as curvas convergiram com sucesso aos pontos experimentais sem a necessidade de encontrar novamente todos os parâmetros do pneu.

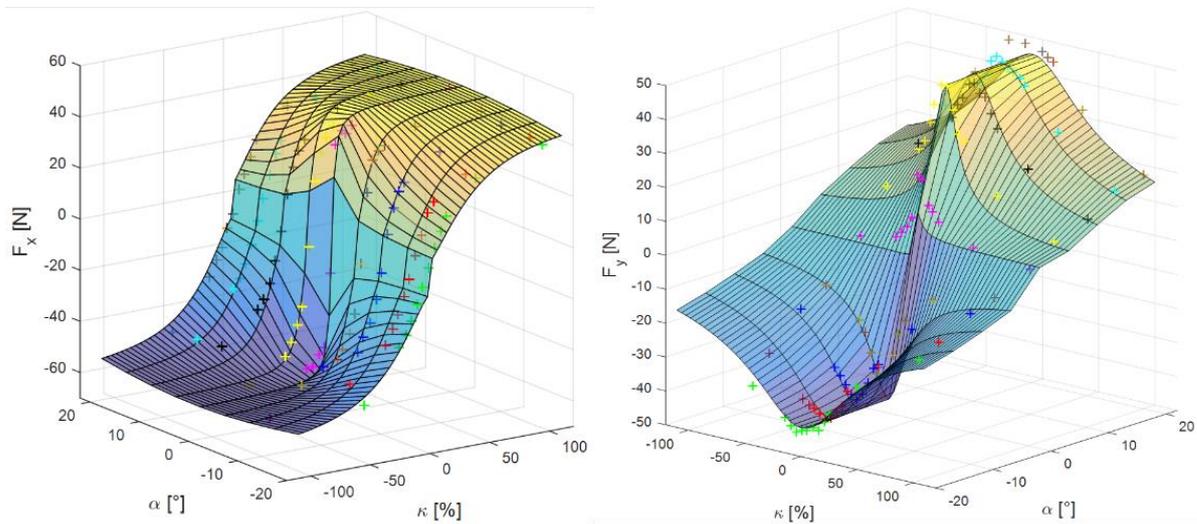


Figura 7: Superfícies do pneu 4PR Shioppa para  $F_z$  de 160N e pressão de 30 psi.

Já a Figura 8 apresenta as superfícies para o pneu 4PR Imsa. Esses pontos experimentais e superfícies foram obtidos no estudo anterior e servem como comparação com o novo pneu 4PR Shioppa. A primeira grande diferença entre os dois pneus é a intensidade das forças longitudinais e laterais muito menor que o pneu Imsa, assim como para o escorregamento puro. A intensidade das forças para o pneu Shioppa é aproximadamente 50% menor que o pneu Imsa. Outra observação importante é a diferença na estabilização da força lateral para ângulos de deriva mais intensos. Para o pneu Shioppa a força lateral tende a ficar constante, já para o pneu Imsa a força lateral continua a aumentar de forma suave.

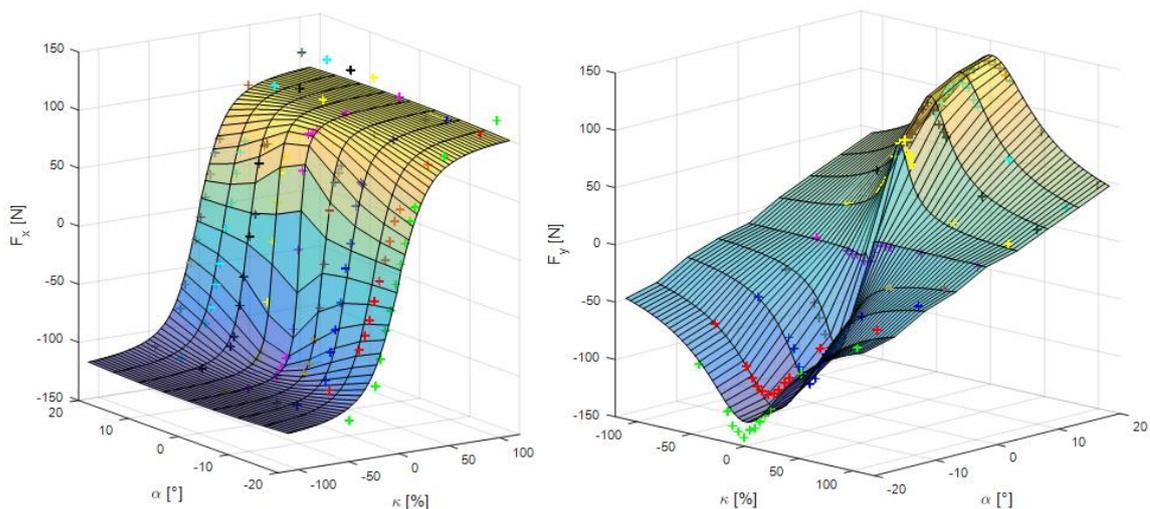


Figura 8: Superfícies do pneu 4PR Imsa para  $F_z$  de 160N e pressão de 30 psi. [7]

Analisando a literatura a tendência para o pneu Shioppa era apresentar uma força lateral mais intensa devido aos sulcos circunferenciais. Já o pneu Imsa tenderia a ter uma força longitudinal mais intensa devido aos sulcos diagonais. Porém, tanto a força longitudinal quanto a lateral foram mais intensas para o pneu Imsa. A justificativa para isso é que outro conceito que pode ter se destacado enquanto banda de rodagem é a relação de aspecto. Sabe-se que quanto menor a relação de aspecto maior o contato com a superfície e assim as forças longitudinais e laterais são mais intensas. O pneu Imsa apresenta uma relação de aspecto de 60% e o Shioppa de 70%.

## 6. Conclusão

Essa pesquisa propôs-se a estudar a influência de diferentes bandas de rodagem na parametrização de um pneu de pequeno porte. Para isso, uma vez que os parâmetros para as condições de escorregamento puro e combinado para o pneu 4PR Imsa já haviam sido encontrados na pesquisa anterior, fez-se o uso dos fatores de escala para não haver a necessidade de realizar novamente toda a parametrização para um pneu similar 4PR Shioppa. Os pontos experimentais do pneu similar foram adquiridos com sucesso e os fatores de escala apresentaram valores consistentes que ajustaram as curvas aos pontos de forma satisfatória.

Assim, esse trabalho completa uma grande análise sobre pneus de pequeno porte. Analisando o seu comportamento quanto ao escorregamento puro, combinado e também a influência de diferentes pneus. Com isso, foi possível validar por completo o modelo de Pacejka tanto quanto a modelagem dos parâmetros do pneu quanto a utilização dos fatores de escala.

Comparando os dois pneus utilizados nessa pesquisa a característica mais marcante é que o pneu Shioppa possui uma aderência com o solo significativamente menor que o Imsa, cerca de 50% menor. O que leva a concluir que a relação de aspecto teve uma influência mais significativa no resultado em relação a banda de rodagem propriamente dita. Isso se deve ao fato que as forças verticais utilizadas não eram muito altas, assim a área de contato total possível do pneu na superfície não foi facilmente explorada. Porém os valores de força vertical foram escolhidos simulando uma aplicação em robótica móvel leve dos pneus utilizados.

## Referências

- [1] A. H. Ahangarnejad, “Integrated control of active vehicle chassis control systems,” Ph.D. dissertation, Politecnico Di Milano, Milan, Italy, 2018.
- [2] R.A.Cordeiro,S.S.Bueno,J.R.Azinheira,E.C.dePaiva,P.S.Meirelles,R.Vivan,H.Azevedo,and M. F. Koyama, “Determinação experimental de parâmetros para a modelagem dinâmica deum veículo robótico terrestre”, International Journal of Refrigeration, vol. 29, no. 1, pp. 81–91,2011.
- [3] P. Dąbek and M. Trojnecki, “Requirements for tire models of the lightweight wheeled mobile robots”, in Mechatronics: Ideas, Challenges, Solutions and Applications, Warsaw, Poland, 2016.
- [4] H. Heisler, Advanced vehicle technology, 2nd ed. Oxford: Elsevier, 2002.
- [5] H. B. Pacejka, Tire and Vehicle Dynamics, 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012.
- [6] D. Arosio, F. Braghi, F. Cheli, and E. Sabbioni, “Identification of Pacejka’s scaling factors from full-scale experimental tests” Vehicle System Dynamics, vol. 43, no. sup1, pp. 457–474, 2005.
- [7] D. A. Mendonça, F. M. Santiciolli, L. C. A. Silva, J. J. Eckert, and F. G. Dedini, “Parameterization of tire model for light weight vehicle regarding the combined slip” International Congress of Mechanical Engineering - COBEM, 2019.