



Otimização de uma Suspensão *Double Wishbone* para um Protótipo de Formula SAE

PAIM CHC, TREML AE

Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu.

Resumo. A competição Formula SAE (FSAE) é um desafio proposto aos acadêmicos de engenharia em todo o mundo, no qual estes são submetidos ao trabalho de desenvolver um protótipo de competição, desde sua concepção até a construção. Sendo a dinâmica veicular uma das áreas críticas no desempenho de um veículo, o *Formula SAE Tire Test Consortium (FSAE TTC)* surgiu para disponibilizar às equipes uma série de dados característicos de pneus, visando avançar os estudos relacionados à dinâmica veicular. Buscando otimizar o desempenho do protótipo da equipe Cataratas Formula SAE na prova de *skid pad*, o presente trabalho aborda uma análise detalhada de dados experimentais do pneu, aplicados em uma condição de regime permanente, sendo a velocidade e o raio de curva constantes, tratados em MATLAB®, onde buscou-se identificar a melhor faixa de operação do pneu, que corresponde à maximização de sua área de contato com a pista. A partir daí foi desenvolvida a cinemática de uma suspensão *double wishbone*, de modo que possibilite ao pneu operar em sua faixa ótima de geração de força lateral, melhorando a manobrabilidade do protótipo e reduzindo assim o tempo necessário para se completar o percurso da prova. Adicionalmente, com a definição da faixa ótima de operação do pneu, foi desenvolvida uma geometria de suspensão com braços convergentes e de comprimento desigual, o qual possibilita ao pneu alcançar um melhor ganho de cambagem quando submetido à um aumento da carga vertical atuante devido à rolagem da massa suspensa do veículo, maximizando sua área de contato e atingindo maiores valores de ângulo de deriva. Com isso, foi definido a geometria da suspensão sendo do tipo *double wishbone*, pois esta possui mais versatilidade quanto aos seus parâmetros de ajuste visando alterar suas características cinemáticas e também por ser um conjunto de baixo peso.

Palavras-chave. *Palavras-chave: Dinâmica Veicular, Cinemática, Suspensão, Pneu, Formula SAE.*

Introdução. Quando se diz respeito à um veículo de competição, o que se busca é atingir uma configuração que seja capaz de atingir o maior desempenho possível, ou seja, aumentar a velocidade média do veículo, possibilitando que este cumpra um determinado traçado no menor tempo, respeitando-se as regras ao qual a competição impõe. Na literatura, é possível encontrar diversas metodologias para se avaliar o comportamento dinâmico de um carro de competição. Dentre os métodos utilizados, existe a avaliação subjetiva, no qual um piloto profissional

quantifica o desempenho dinâmico do veículo e a avaliação objetiva, que consiste na instrumentação do veículo para coleta e análise dos dados. Sendo assim, buscando-se atingir um projeto confiável e eficaz, foi realizado uma análise objetiva, onde foi necessário apontar um número limitado de configurações da suspensão visando fazer com que o pneu opere na faixa ótima de desempenho, reduzindo assim o tempo necessário para realizar o acerto da suspensão. Sabendo-se que os quatro pneus são os únicos pontos de contato entre o carro e o asfalto, esta é sem dúvida a melhor referência de partida para se iniciar um projeto de dinâmica veicular. De acordo com SEGERS (2014), dados de qualidade são um aspecto crítico no desenvolvimento de um veículo de competição, uma vez que o comportamento não linear dos pneus em função do carregamento vertical é o responsável último pelo balanço do veículo. O estudo da dinâmica veicular começou por volta do ano de 1920, quando Broullhiet (1925) introduziu o conceito de ângulo de deriva. O ângulo de deriva surge quando o pneu sofre uma deformação elástica em sua carcaça quando este é submetido à ação de uma força lateral, no momento em que o veículo está em regime de curva. Assim, foi possível notar que a trajetória no qual a roda aponta é diferente da direção que o pneu percorre devido à sua deformação. Esse fenômeno ocorre instantaneamente na interface do pneu com o asfalto, como é possível notar na figura 1. Segundo MILLIKEN (1995), é importante ressaltar que não ocorre deslizamento na área de contato do pneu com o solo, desde que o pneu esteja operando em sua faixa linear, exceto em uma pequena porção inferior, onde a força vertical atuante é baixa. De acordo com NICOLAZZI (2008), o ângulo de deriva não é simplesmente o deslizamento da área de contato do pneu com o solo (contact patch), mas um mecanismo que envolve a deformação elástica da borracha, uma vez que o pneu não é um corpo rígido e não pode ser tratado como tal.

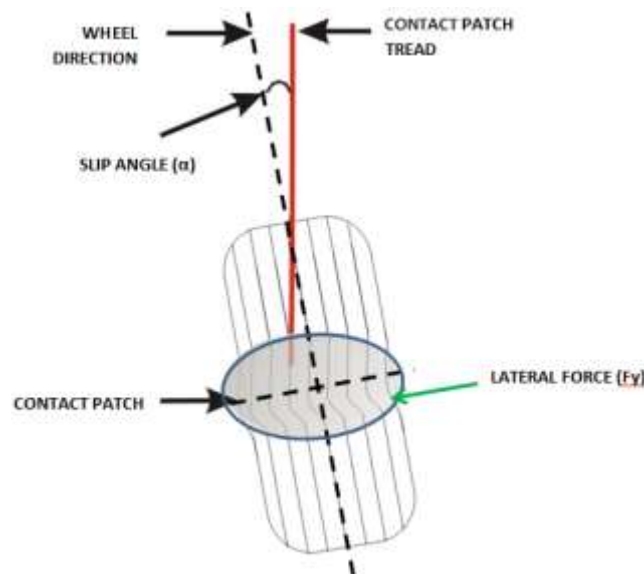


Figura 1: Vista superior do ângulo de *deriva* e da área de contato do pneu

Em muitos aspectos, a forma como o pneu gera força lateral é semelhante a maneira como a força longitudinal também é gerada. Antes de analisarmos como o pneu se comporta submetido às forças acima mencionadas, precisamos entender como o carro se comporta em uma curva à certa velocidade. Considerando um veículo percorrendo uma curva de raio R à uma velocidade V , para que o mesmo seja capaz de superar a força centrífuga e manter-se percorrendo a trajetória desejada, a estrada deve aplicar uma força lateral F_y em cada um dos pneus. Assim, a aceleração lateral A_y submetida ao carro, é descrita conforme a equação 1 e 2.

$$A_y = \frac{V^2}{R} \quad (1)$$

$$F_y = -m * A_y \quad (2)$$

Sendo assim, para ter-se um equilíbrio, cada um dos quatro pneus produzem uma força lateral, que somadas resultam na força lateral total, conforme equação 3 e representadas na figura 2.

$$F_y = F_{yfr} + F_{yfl} + F_{yrr} + F_{yrl} \quad (3)$$

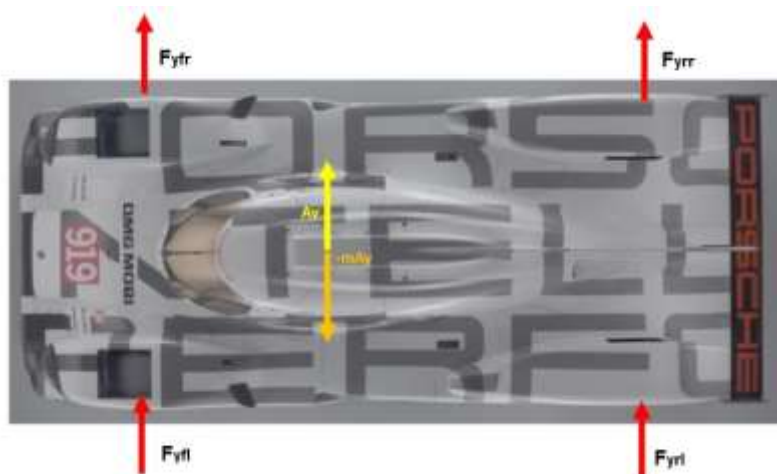


Figura 2: Forças laterais dos pneus

Objetivo. Desenvolver um sistema de suspensão que explore o máximo desempenho dos pneus, visando a otimização do desempenho dinâmico de um protótipo Formula SAE na prova de *Skid Pad*. Os objetivos específicos foram definidos como:

- (1) Analisar e identificar por meio dos dados experimentais do Formula SAE *Tire Test Consortium* (FSAE TTC), as principais características do pneu Hoosier 18.0/6.0-10";
- (2) Quantificar por meio da transferência lateral de carga, os valores de carga vertical a que os pneus serão submetidos;
- (3) Definir os gradientes de rolagem da suspensão, visando obter valores que contribuam para obter o comportamento dinâmico desejado no veículo;
- (4) Desenvolver a geometria da suspensão e direção para que operem em uma faixa minimizando o ganho de *camber* adverso indesejado;

Metodologia. Todos os parâmetros coletados nos testes do FSAE TTC foram armazenados em canais nos formatos ASCII ou MAT, sendo que os 22 parâmetros para a condição de forças laterais estão armazenados em 89551 linhas de dados. Os dados analisados são do pneu *Hoosier* 16.0x6.0-10" R25B, calçados em rodas de alumínio com tala de 6", testados no round 5 em fevereiro de 2012. Foram coletados neste *round* também os dados de força longitudinal para o pneu em análise, além de realizados seções de coleta para outros 4 tipos de pneus. Sendo assim, foram plotados as variáveis de pressão, carga vertical, ângulo de inclinação e ângulo de deriva, onde é possível identificar o intervalo de tempo em que os dados para cada uma das situações foram coletados. Para isso, foi necessário a localização das células que correspondem ao início e término de cada *sweep*, e os respectivos parâmetros.

Na figura 3 é possível observar como foi realizado o mapeamento dos dados nos gráficos de ângulo de deriva, ângulo de inclinação, pressão do pneu e força vertical. No ângulo de deriva, apenas os valores decrescentes compuseram os intervalos de tempo selecionados, pois apenas estes ângulos decrescentes são contínuos e uniformes. No primeiro gráfico, identifica-se que todo o teste até 1268 segundos foi realizado com a pressão dos pneus em 12 psi. No segundo gráfico da Figura 2, um determinado *sweep* inicia em 1012 segundos e termina em 1037 segundos, no qual, este intervalo de tempo compreende a carga vertical de 222N. Este intervalo de tempo é confrontado com o terceiro gráfico, no qual observa-se que neste intervalo de tempo, ocorreu o teste para um ângulo de inclinação de um grau. Deste modo, este *sweep* foi completamente realizado de acordo com os parâmetros testados.

Através do mapeamento dos intervalos de tempo organizados em planilhas vistas na seção anterior, foi possível utilizá-los como dados de entrada para a elaboração de *scripts* realizados no *software* MATLAB. Na figura 4, foi gerado um gráfico que apresenta os dados para uma condição de ângulo de inclinação de 0 graus e pressão de 10 psi, variando-se apenas o carregamento vertical.

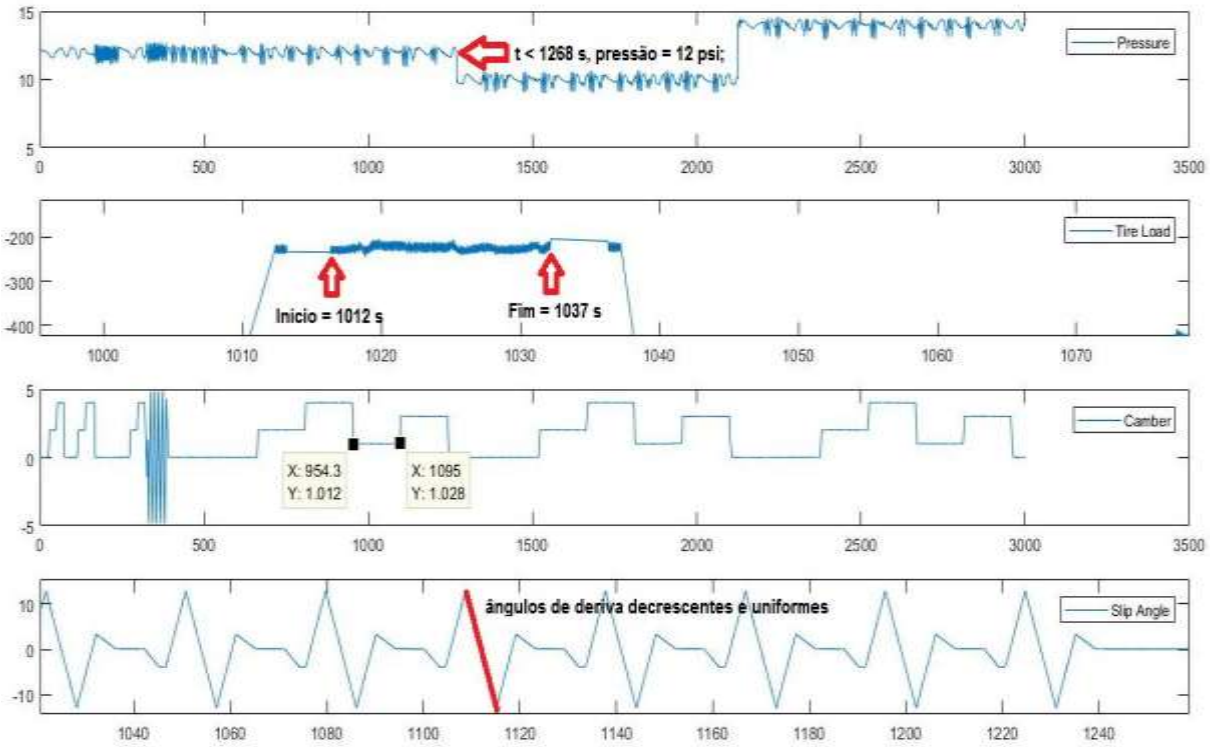


Figura 3: Mapeamento dos dados do teste

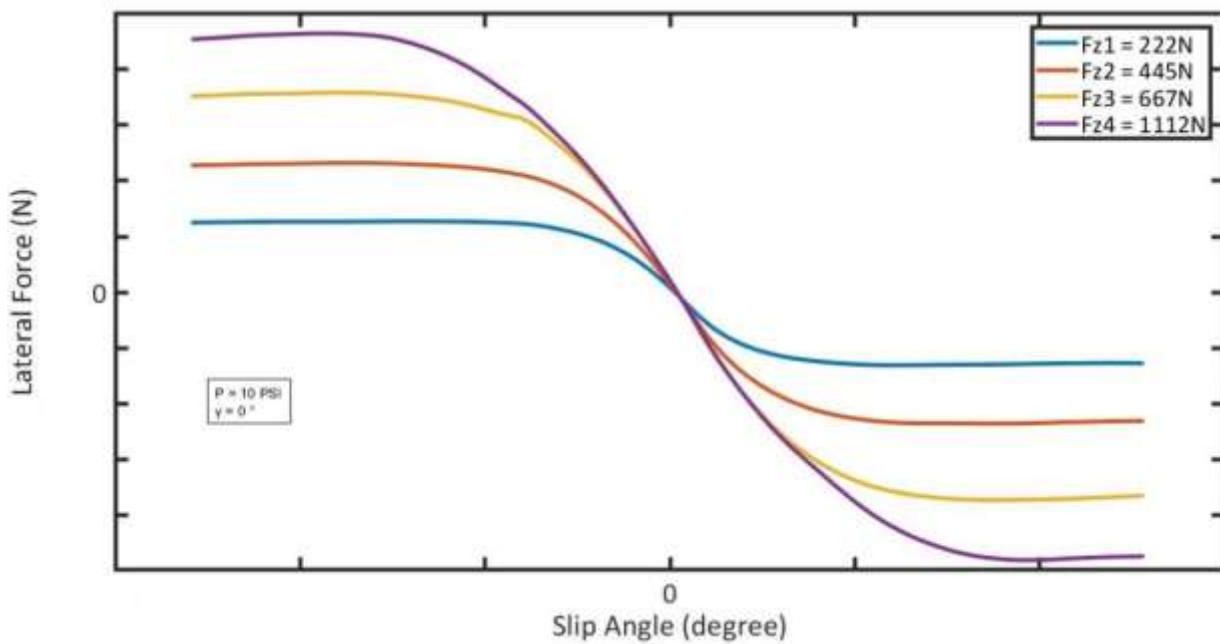


Figura 4: Força lateral versus ângulo de deriva para diferentes cargas verticais

O gráfico da figura 4, é uma das formas mais tipicamente usuais para se representar os dados de teste de um pneu. É possível notar que, com o aumento da carga vertical aplicada no pneu, ocorre consequentemente um aumento na força lateral gerada.

De acordo com Milliken (1995), um pneu produzirá força lateral na direção de seu ângulo de inclinação. Quando essa força ocorre em ângulo de deriva zero, esse acréscimo de força lateral é conhecido como *camber thrust*. Ainda segundo Milliken (1995), pneus de corrida atingem maiores valores de força lateral em ângulos de cambagem negativos ou inclinação positiva para valores pequenos. No entanto, como pode ser visto no gráfico da figura 5, para o pneu de construção diagonal (*bias-ply*) em análise, obteve-se maiores valores de força lateral para um ângulo de inclinação ou *camber* negativo nulo (0 graus), ou seja, comportamento um pouco distinto do que se esperava. Essa conclusão, forma a base principal para o desenvolvimento da geometria da suspensão que será vista a seguir.

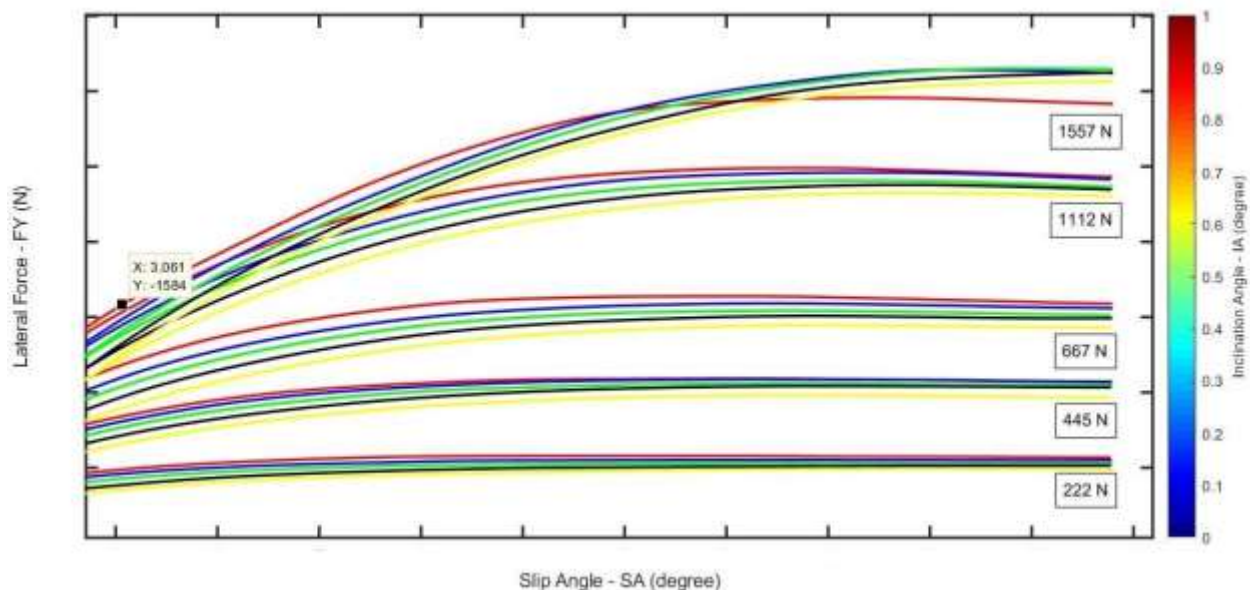


Figura 5: Aproximação visual da influência do ângulo de *camber* nas forças laterais

Dentre os fatores que afetam a transferência de carga, o gradiente de rolagem é um importante parâmetro que influencia no balanço *understeer/oversteer* do veículo, podendo este ser alterado para se obter o comportamento dinâmico desejado. Como função da rigidez à rolagem, altura do centro de gravidade e altura dos centros de rolagem da suspensão, o gradiente de rolagem pode ser calculado pela equação 4.

$$\frac{\phi}{A_Y} = K_{\phi} = \frac{-WH}{K_{\phi F} + K_{\phi R}} \quad (4)$$

A tabela 1 mostra os parâmetros do protótipo CFS-1.1, o qual foram utilizados como base para o cálculo das transferências laterais de carga.

Tabela 1 – Parâmetros do protótipo

Parâmetro (Unidade)	Eixo Dianteiro	Eixo Traseiro
t (mm)	1180	1180
l (mm)	1625	1625
x (mm)	877,5	747,5
Z _{RC} (mm)	12	14
Z _{ua} (mm)	229,87	229,87
h _S (mm)	246,9	246,9
W _S (N)	2959,68	2959,68
W _{ua} (N)	155	217,78
A _Y (g = 9,81 m/s ²)	1,1	1,1
K _{φa} (Nm/rad)	54631	54631
K _{φF} (Nm/rad)	28407	---
K _{φR} (Nm/rad)	---	26224

Com os dados da tabela 1, definidos na fase de projeto e mensurados na oficina depois do protótipo construído, é possível realizar o cálculo da transferência lateral de carga nos eixos dianteiro e traseiro pela equação 5.

$$\Delta W_a = \frac{W_S A_Y}{t} \left(h_S \left[\frac{K_{\phi a} + (l-x)W_S h_S / l}{K_{\phi F} + K_{\phi R} - W_S h_S} \right] + \frac{l-x}{l} Z_{RC} \right) + \frac{W_{ua} A_Y}{t} Z_{ua} \quad (5)$$

Com o objetivo de medir a capacidade ou habilidade de um carro em realizar curvas, a prova de *Skid Pad* é um dos testes dinâmicos que compõe as provas dinâmicas das competições Formula SAE, levando o veículo a atingir o limite de aderência dos pneus. Na competição Formula SAE, a prova de *Skid Pad* é constituída por dois círculos com diâmetro de 18.25m cada e largura da pista de 3m. O veículo inicia a manobra percorrendo a linha radical dos círculos a uma certa distância da interseção entre eles, percorrendo duas voltas à direita e duas voltas à esquerda. Na figura 6, é possível observar o layout da prova definida pelo regulamento da competição.

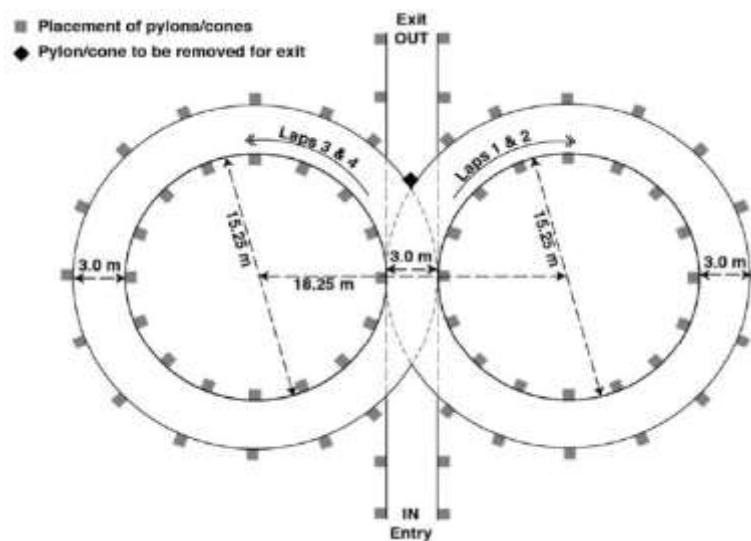


Figura 6. Layout da prova *Skid Pad* na competição Fórmula SAE. Fonte: *FSAE Rules*, 2018.

Após calculadas as transferências de carga em cada um dos eixos, obteve-se as cargas verticais em cada uma das rodas, conforme apresenta tabela 2.

Tabela 2 – Cargas verticais

Fz - Carga Vertical (N)
316 (roda dianteira interna)
457 (roda traseira interna)
1029 (roda dianteira externa)
1158 (roda traseira externa)

No entanto, para se realizar o cálculo das cargas verticais em cada roda, foi necessário que antes fossem definidos os gradientes de rolagem em cada eixo bem como a altura dos centros de rolagem da suspensão. Tendo conhecimento da pouca experiência dos pilotos como sendo fator limitante no balanço dinâmico do protótipo, optou-se por definir parâmetros que conferissem ao protótipo um comportamento o mais próximo de possível de neutro. Com base nos dados de peso coletados na oficina do protótipo atual, conseguiu-se chegar a uma distribuição de peso de 48/52 nos eixos dianteiro e traseiro, respectivamente, e altura do centro de gravidade de 260 mm, o que já contribui significativamente para se obter um balanço neutro. A partir daí, foi definido uma distribuição de transferência de carga, sendo de 48% na traseira e 52% na dianteira, ou seja, valores opostos à distribuição de peso do protótipo, visando minimizar o efeito da sensibilidade à carga vertical e obtendo um comportamento neutro.

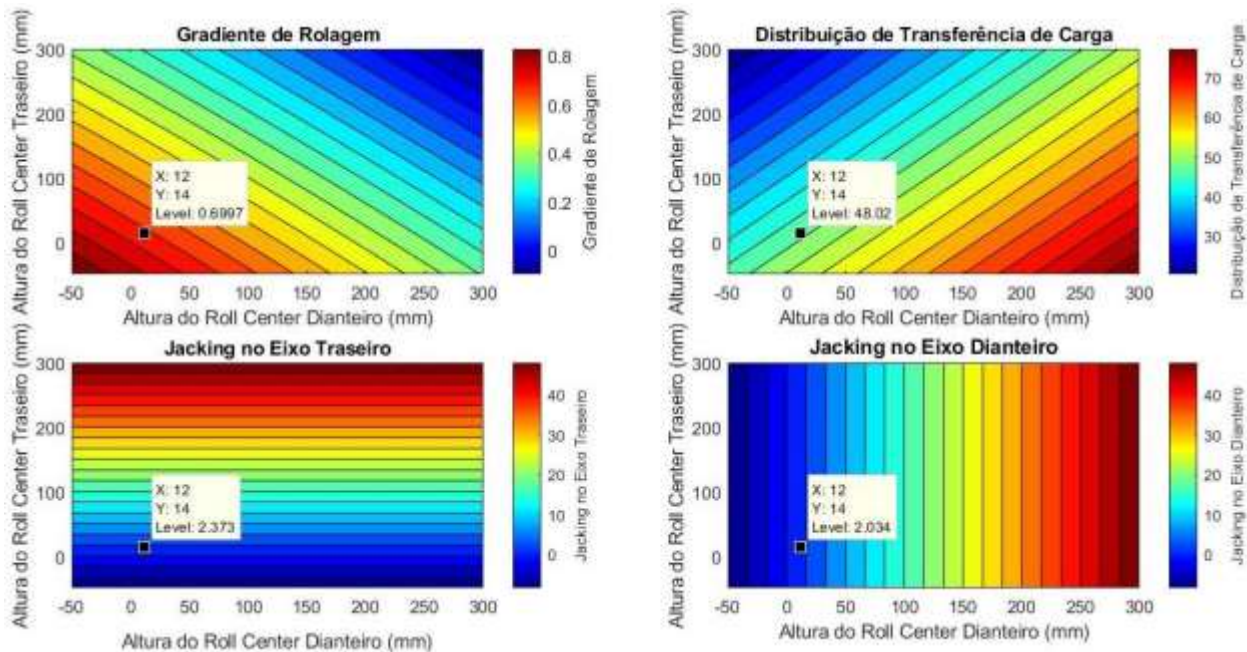


Figura 7. Gradiente de rolagem e altura dos centros de rolagem da suspensão

Conforme pode ser observado na figura 7, para se obter a distribuição de transferência de carga desejada entre os eixos, as alturas dos centros de rolagem foram definidas com 12 mm e 14 mm na dianteira e traseira, respectivamente. Consequentemente, obteve-se um gradiente de rolagem de $0.69^\circ/\text{G}$, ou seja, quando em regime de curva para a situação de *skid pad*, a massa suspensa do protótipo terá um ângulo de rolagem de 0.69° por unidade de aceleração lateral, medida em G. Para a condição máxima prevista de aceleração lateral de 1.1G, o ângulo de rolagem foi calculado em 0.77° .

Resultados e Discussões. Após identificada a melhor faixa de operação do pneu, ou seja, as condições em que apresentaram a melhor geração de força lateral, o qual foi obtida para ângulos de inclinação próximos à zero grau na pressão de inflação de 10 psi, desenvolveu-se ambas as geometrias da suspensão dianteira e traseira do protótipo, que podem ser vistas nas figura 8 e 9.

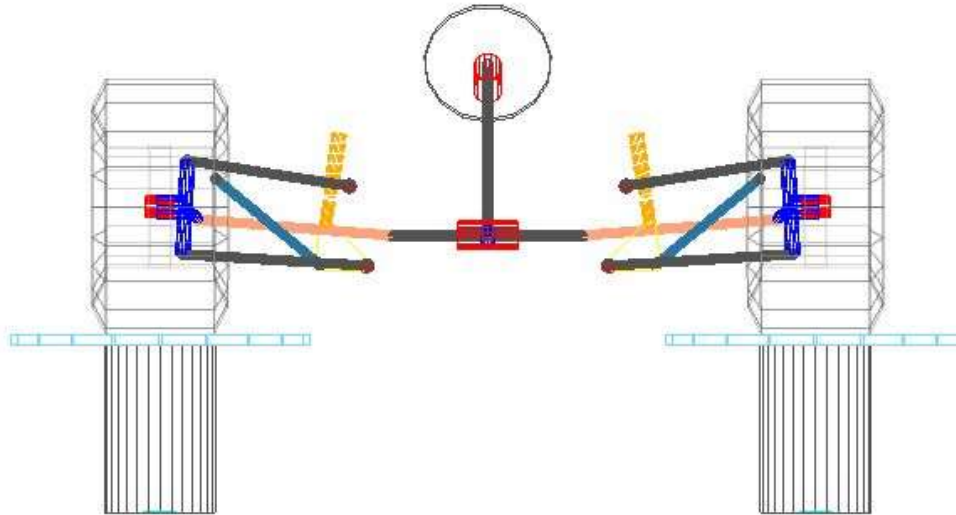


Figura 8. Geometria da suspensão dianteira

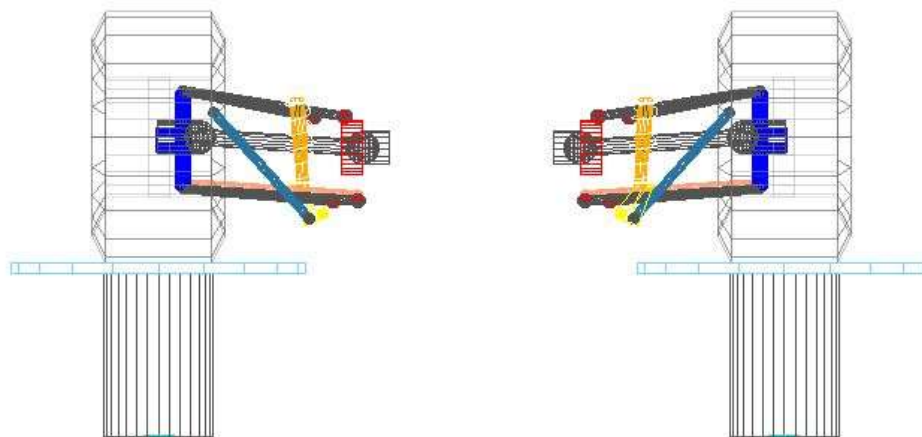


Figura 9. Geometria da suspensão traseira



Ambas as geometrias, apresentam braços duplos triangulares, o qual se caracterizam por possuírem comprimentos desiguais e convergentes, o que possibilitam que quando articulados em torno de sua fixação à estrutura do protótipo, submetidos à ação de uma aceleração lateral, descrevam uma trajetória que possibilite os pneus trabalharem com sua área de contato de forma mais plana possível, maximizando assim a área de contato com o solo e consequentemente alcançando maiores gerações de força lateral.

Conclusões. Com os dados de desempenho do pneu obtidos através do consórcio FSAE TTC, foi possível desenvolver geometrias de suspensão que otimizem ao máximo o uso do pneu em regime de curva, contribuindo também para o aumento de sua vida útil. Sem dúvidas, os dados de teste foram um grande aliado no desenvolvimento do projeto e formaram a base principal para que se obtenha um bom projeto. É importante ressaltar que, para se completar os estudos iniciados neste trabalho, são necessárias baterias de teste com o protótipo e coleta de dados através de sensores embarcados para se validar de forma mais eficiente os estudos aqui aplicados.

Agradecimentos. À UNIOESTE por possibilitar o desenvolvimento do projeto e aos patrocinadores e apoiadores da equipe por possibilitarem toda a manufatura do protótipo. Ao FSAE TTC também por se dispor a realizar o grande trabalho de apoio às equipes com a coleta e fornecimento de dados fundamentais.

Divulgação. Os autores relatam não haver conflitos de interesse neste trabalho.

Referências.

- (1) MILLIKEN, William F.; MILLIKEN, Douglas L.. *Race Car Vehicle Dynamics*. Pittsburgh: Society Of Automotive Engineers, Inc., 1995.
- (2) PUHN, Fred. *How to Make your Car Handle*. Nova York: Hp Books, 1976.
- (3) SANTOS, Rodrigo. A Discussion on Steady-State Lateral Weight Transfer and How to Use It in Setup, 2015. Disponível em: <<http://racingcardynamics.com/weight-transfer/>>. Acesso em: 02 de set. 2017.
- (4) SEWARD, Derek. *Race Car Design*. Londres: Palgrave, 2014.