

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA

CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL MECÂNICA

HEITOR NOGAROLLI CORDEIRO

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO PARA CARACTERIZAÇÃO  
DE PNEUS AUTOMOTIVOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

(Tcc 2)

CURITIBA

2014

HEITOR NOGAROLLI CORDEIRO

## **DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO PARA CARACTERIZAÇÃO DE PNEUS AUTOMOTIVOS**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Maro Rogér Guérios, Eng. Esp.

CURITIBA

2014

## TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa "DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO PARA CARACTERIZAÇÃO DE PNEUS AUTOMOTIVOS", realizado pelo aluno Heitor Nogarolli Cordeiro, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Industrial Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Maro Rogér Guérios, Eng. Esp.

DAMEC, UTFPR

Orientador

Prof. Jorge Luiz Erthal, Dr.

DEMEC, UFPR

Avaliador

Prof. João Carlos Roso, Me.

DAMEC, UTFPR

Avaliador

Curitiba, 21 de março de 2014.

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho de conclusão de curso aos meus pais e àqueles que já passaram e ainda passarão pela Equipe de Baja e Fórmula desta Universidade, um grupo que tanto me ensinou e do qual tenho muito orgulho de ter feito parte.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço aos meus pais pelo apoio e tudo que fizeram em minha vida permitindo a conclusão da graduação;

Aos mestres, por todos os ensinamentos repassados ao longo destes cinco anos;

À banca, em especial ao Prof. Maro Rogér Guérios, orientador deste trabalho e responsável pela Equipe Imperador UTFPR, ao Prof. Jorge Luiz Erthal, orientador da equipe de Baja, da UFPR e ao Prof. João Carlos Roso, ex-orientador da equipe de Fórmula SAE, da UTFPR;

Aos amigos e familiares, pelos incentivos e momentos de descontração que auxiliam no bom andamento do estudo;

À Equipe Imperador de Baja e Fórmula, por gentilmente ceder sua estrutura, peças e materiais para a montagem do protótipo, além de compartilhar seus fornecedores.

*“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.”*

Ayrton Senna

## RESUMO

CORDEIRO, Heitor Nogarolli. Desenvolvimento de dispositivo para caracterização de pneus automotivos. 2014. 50f. Monografia – Graduação em Engenharia Industrial Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014.

Todo projeto de sistema de suspensão e direção veicular deve ter início com o conhecimento das curvas de comportamento dos pneus a serem empregados, pois serão somente estes os componentes em contato com o solo, ou seja, os únicos responsáveis em gerar aderência para o controle do automóvel. Fabricantes de pneus não tem o hábito de fornecer esses dados aos interessados em fazer uso de seus produtos, tornando-se primordial o levantamento das características do pneumático com ensaio próprio ou através de empresas especializadas. Tendo em vista o alto custo de uma caracterização através de terceiros, objetiva-se o desenvolvimento de um dispositivo, do tipo trenó, que permita conhecer a capacidade do pneu gerar força lateral com diferentes ângulos de deriva e cargas normais. Além disso, deve-se desenvolver um equipamento com custo inferior a R\$600, se adequando à realidade da maioria das equipes de Baja SAE do Brasil.

**Palavras-chave:** Pneu. Caracterização. Trenó.

## ABSTRACT

CORDEIRO, Heitor Nogarolli. Desenvolvimento de dispositivo para caracterização de pneus automotivos. 2014. 50f. Monografia – Graduação em Engenharia Industrial Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2014.

The design of any suspension and steering system should start having the knowledge of the behavior data of the tires that are going to be used. These are the only components in contact with the ground. This means they are responsible exclusively in giving adherence and control to the vehicle. Tire manufacturers rarely provides such data to automobile designers, which gives great importance to the task of acquiring the characteristics of the tire, either by contracting specialized companies or by experimenting the tire with own means. Due to the high costs of third party companies it was developed a sled type device to evaluate the lateral force tire capacity with different normal loads and drift angles. Should develop a machine with less than R\$600 cost, adapting to the reality of most Baja SAE Brazil teams.

**Key words:** Pneumatic. Tyre. Characterization. Sled.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Sistema de coordenadas do veículo. FONTE: (MILLIKEN, 1995)	18
Figura 2.2 - Sistema de coordenadas de pneus (SAE). FONTE: (GILLESPIE, 1992)	19
Figura 2.3 - Exemplo de variação de força lateral em função da carga normal e diversos ângulos de deriva. FONTE: (MILLIKEN, 1995)	21
Figura 2.4 - Mecanismo de geração de aderência sobre solos rígidos. FONTE: (GILLESPIE, 1992)	22
Figura 2.5 - Exemplo de pneu com cravos, próprio ao uso fora de estrada. FONTE: < <a href="http://www.maxxis.com/catalog/tire-366-109-front-pro">http://www.maxxis.com/catalog/tire-366-109-front-pro</a> >	23
Figura 2.6 - Pneu deformado quando submetido a força lateral em solo rígido (a) e em solo plástico (b). FONTE: (AGEIKIN, 1987)	24
Figura 2.7 - Cilindro rotativo usado para caracterização de pneus. FONTE: < <a href="http://www.michelin.pt">www.michelin.pt</a> >	26
Figura 2.8 - Caracterização através de esteira. FONTE: < <a href="http://www.edccorp.com">www.edccorp.com</a> >	27
Figura 2.9 - Trenó utilizado para caracterização de pneus. FONTE: < <a href="http://www.research.vt.edu">www.research.vt.edu</a> >	27
Figura 3.1 - Visão global do protótipo. FONTE: Autoria própria	29
Figura 3.2 - Troca do ângulo de deslizamento. FONTE: Autoria própria	30
Figura 3.3 - Acoplamento do trenó com o veículo e sistema de medição de força. FONTE: Autoria própria	31
Figura 3.4 - Diagrama de corpo livre do trenó. FONTE: Autoria própria	33
Figura 4.1 - Situação do solo com metade dos ensaios realizados. FONTE: Autoria própria	35
Figura 5.1 - Plotagem dos resultados dos ensaios. FONTE: Autoria própria	38
Figura 6.1 - Fluxograma para determinação do tamanho da amostra. FONTE: Autoria própria	43

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 5.1 - Custos facilmente contornáveis com componentes de equipe.</b> .....	40
<b>Tabela 5.2 - Custos inevitáveis na produção do trenó.....</b>	40
<b>Tabela 6.1 - Erro admissível na balança para satisfazer a condição de erro máximo no cálculo de força lateral.....</b>	42
<b>Tabela 6.2 - Desvio padrão obtido nas três medições iniciais. ....</b>	44
<b>Tabela 6.3 - Amostragem necessária para cada configuração a fim de obter 95% de confiança nos resultados.....</b>	44

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

**ATV** – *All Terrain Vehicle*;

**SAE** – Sociedade dos Engenheiros da Mobilidade, *Society of Automotive Engineers*;

**UTFPR** – Universidade Tecnológica Federal do Paraná;

**C<sub>y</sub>** – Coeficiente de fricção;

**F<sub>d</sub>** – Força no dinamômetro;

**F<sub>res</sub>** – Força resistiva;

**F<sub>x</sub>** – Força trativa no sistema do pneu;

**F<sub>y</sub>** – Força lateral no sistema do pneu;

**F<sub>z</sub>** – Força normal no sistema do pneu;

**M<sub>x</sub>** – Momento anti tombamento;

**M<sub>y</sub>** – Momento de resistência ao rolamento;

**M<sub>z</sub>** – Momento alinhante;

**n** – Tamanho da amostra;

**s** – Desvio padrão da amostra;

**z<sub>c</sub>** – Constante da distribuição normal;

**α** – Ângulo de deriva;

**ε** – Erro admissível nas medições;

**γ** – Ângulo de inclinação – Cambagem;

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>1.1 Contexto do Tema</b> .....	15
<b>1.2 Caracterização do Problema</b> .....	15
<b>1.3 Objetivo Geral</b> .....	16
<b>1.4 Objetivos Específicos</b> .....	16
<b>1.5 Justificativa</b> .....	17
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	18
<b>2.1 Sistema de coordenadas do veículo</b> .....	18
<b>2.2 Sistema de forças e momentos em pneus</b> .....	18
2.2.1 Força Normal ( $F_z$ ).....	19
2.2.2 Ângulo de Deriva ( $\alpha$ ).....	19
2.2.3 Força Lateral ( $F_y$ ).....	20
2.2.4 Momento de Resistência ao Rolamento ( $M_y$ ).....	20
2.2.5 Ângulo de Inclinação ( $\gamma$ ).....	20
<b>2.3 Coeficiente de Fricção</b> .....	20
<b>2.4 Mecanismos para geração de aderência</b> .....	21
2.4.1 Solos Rígidos.....	21
2.4.2 Solos plásticos.....	22
<b>2.5 Outros Efeitos sobre o Pneu</b> .....	24
2.5.1 Pressão de Inflação.....	24
2.5.2 Temperatura do pneu.....	25
2.5.3 Velocidade.....	25
<b>2.6 Ensaio para Caracterização</b> .....	25
2.6.1 Cilindro Rotativo.....	25
2.6.2 Esteira.....	26
2.6.3 Trenó.....	27

<b>3. METODOLOGIA</b> .....	28
<b>3.1 Escolha da Metodologia</b> .....	28
<b>3.2 Descrição da Metodologia</b> .....	28
3.2.1 Diferentes forças normais.....	29
3.2.2 Diferentes ângulos de deslizamento.....	30
3.2.3 Sistema de medição de forças.....	30
3.2.4 Acoplamento ao veículo .....	32
3.2.5 Solo .....	32
3.2.6 Parâmetros dos ensaios .....	32
3.2.7 Cálculo dos resultados .....	32
<b>4. DESENVOLVIMENTO DOS ENSAIOS</b> .....	35
<b>4.1 Considerações sobre o solo</b> .....	35
<b>4.2 Considerações sobre o sistema de medição de forças</b> .....	36
<b>4.3 Considerações sobre o veículo/forma de tração</b> .....	36
<b>4.4 Método para determinação de medições</b> .....	36
<b>5. RESULTADOS</b> .....	38
<b>5.1 Gráfico obtido</b> .....	38
<b>5.2 Custo</b> .....	39
<b>6. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS</b> .....	41
<b>6.1 Determinação do tamanho da amostra</b> .....	41
<b>6.2 Amostragem requerida</b> .....	43
<b>7. LIMITAÇÕES DO ESTUDO</b> .....	45
<b>7.1 Sistema de medição</b> .....	45
<b>7.2 Sistema de tração</b> .....	45
<b>7.3 Caracterização com outras variáveis</b> .....	46
<b>7.4 Medição direta versus indireta</b> .....	46
<b>8. CONCLUSÕES</b> .....	47

<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>48</b>
<b>APÊNDICE A – Valores medidos através da balança digital .....</b>	<b>49</b>
<b>APÊNDICE B – Forças atuantes lateralmente ao pneu .....</b>	<b>49</b>
<b>ANEXO A – Distribuição normal .....</b>	<b>50</b>

# 1. INTRODUÇÃO

Anualmente temos no Brasil a organização de quatro competições estudantis universitárias denominadas Baja SAE, sendo uma delas no âmbito nacional e as outras três divididas em seções regionais. O objetivo desses eventos é proporcionar aos estudantes de engenharia situações com as quais irão se deparar ao longo de suas carreiras, dessa forma, auxiliando na formação de profissionais diferenciados no mercado de trabalho. Como pretexto para esse aprendizado, se lança o desafio de projetar e construir um veículo protótipo, fora de estrada, monoposto e capaz de transpor terrenos acidentados nas condições climáticas mais adversas. (COMITÊ BAJA SAE BRASIL, 2013)

## 1.1 Contexto do Tema

Partindo do princípio que os participantes do evento devem fazer uso de um propulsor padrão e projetar seus protótipos dentro das limitações impostas pelo regulamento (ibidem), são necessários amplos estudos nos sistemas do veículo para que resultem em desempenho superior aos dos concorrentes, assim, permitindo a produção de um produto com maior valor agregado. Sabendo-se que os pneus do veículo são os únicos componentes em contato com o solo, atribui-se a eles toda a responsabilidade de transmitir as forças que resultam em acelerações longitudinais e laterais do protótipo. Sendo assim, equipes que tiverem conhecimento das condições ótimas de uso de seus pneumáticos, estarão em vantagem perante seus concorrentes. Observa-se que é unânime a preferência por pneus de quadriciclos ou *All Terrain Vehicles* (ATV), pois são os que melhor se adaptam ao porte e exigência do protótipo em questão.

## 1.2 Caracterização do Problema

Os fabricantes de pneus tem total conhecimento das características dos seus produtos, mas não tem qualquer interesse em divulgá-las para a construção de um único protótipo. Dessa forma, as equipes devem buscar formas alternativas de conseguir caracterizar seus pneumáticos. Existem empresas que realizam este tipo de serviço, mas o alto custo resultaria na destinação de uma porcentagem muito grande do orçamento do projeto, isto quando a equipe

dispõem de tal quantia. Esta é uma dificuldade da grande maioria das equipes brasileiras que acabam por fazer diversas tentativas unicamente experimentais para extrair um melhor desempenho de seus conjuntos. Eventualmente este tipo de metodologia pode até trazer resultados aceitáveis, mas acaba por contradizer o foco do evento que é formar engenheiros diferenciados.

Analiticamente também seria possível obter o comportamento dos pneus, mas isso exige, no caso de pneus destinados ao uso fora de estrada, rigorosa caracterização do solo, bem como, modelos matemáticos complexos. Com isso, se torna mais fácil e confiável, a caracterização do pneu diretamente em contato com o solo.

### **1.3 Objetivo Geral**

Projetar e construir um dispositivo do tipo trenó que permita quantificar a força lateral gerada pelos pneus, combinando as variáveis força normal e ângulo de deslizamento.

A fim de avaliar a adequação do projeto e metodologia propostos, caracterizar um modelo de pneu como exemplo.

### **1.4 Objetivos Específicos**

Garantir que o dispositivo seja capaz de operar com diferentes cargas normais através da alocação de lastros;

Possibilitar a rápida mudança de posicionamento dos pneus nos diversos ângulos de deslizamento necessários;

Possuir sistema de medição de forças que faça aferições com poucas oscilações;

Garantir que a condição do solo permaneça a mais inalterada possível durante os ensaios, de modo que o mesmo não seja uma variável adicional no experimento;

Buscar desenvolvimento de dispositivo com custo adequado aos orçamentos de equipes brasileiras, com gastos abaixo de R\$600;

Determinar curva dos picos para ter conhecimento dos parâmetros ideais de uso do pneu ensaiado;



Aplicar modelo estatístico para tratamento dos dados, associando confiabilidade aos resultados.

### **1.5 Justificativa**

Para que as forças exercidas pelos pneus sejam maximizadas, os mesmos devem operar em seus parâmetros ótimos. Os sistemas de suspensão e direção do veículo são os responsáveis em adequar os pneus às situações ideais, assim, o projeto destes sistemas são totalmente dependentes do pneumático empregado.

Possibilitar o conhecimento das curvas de comportamento para uma parcela maior de equipes brasileiras, sem dúvida irá elevar o nível dos projetos apresentados no país, servindo de incentivo para o desenvolvimento de novos equipamentos que permitam a completa caracterização de pneus automotivos.

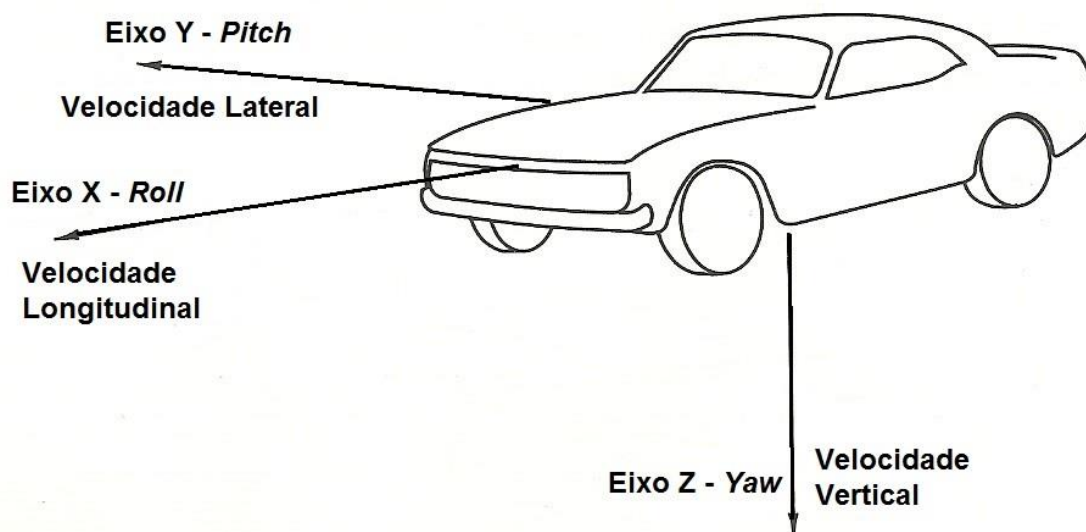
Durante as competições é obrigatório que as equipes apresentem seus projetos a juízes que possuem grande experiência na área em questão. A exigência por projetos efetivamente estudados e justificados está cada vez maior, sendo desvalorizados aqueles protótipos desenvolvidos de forma totalmente experimental, ou seja, veículos que tiveram sua construção iniciando com muitas incertezas na concepção. O maior conhecimento dos pneus possibilita melhores estudos ainda na fase de projetos, deixando para os testes apenas pequenos ajustes.

Por fim, o atual protótipo da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) tem no seu sistema de direção a necessidade de melhoria para aproximar-se do desempenhos dos melhores Baja SAE do Brasil. Esta constatação é feita através de alguns resultados de competições anteriores onde este mesmo protótipo apresenta bons resultados em avaliações de aceleração e velocidade, provas que exigem bom desempenho dinâmico longitudinal, e não tem conseguido concluir avaliações de manobrabilidade, onde a dinâmica lateral é mais exigida.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Sistema de coordenadas do veículo

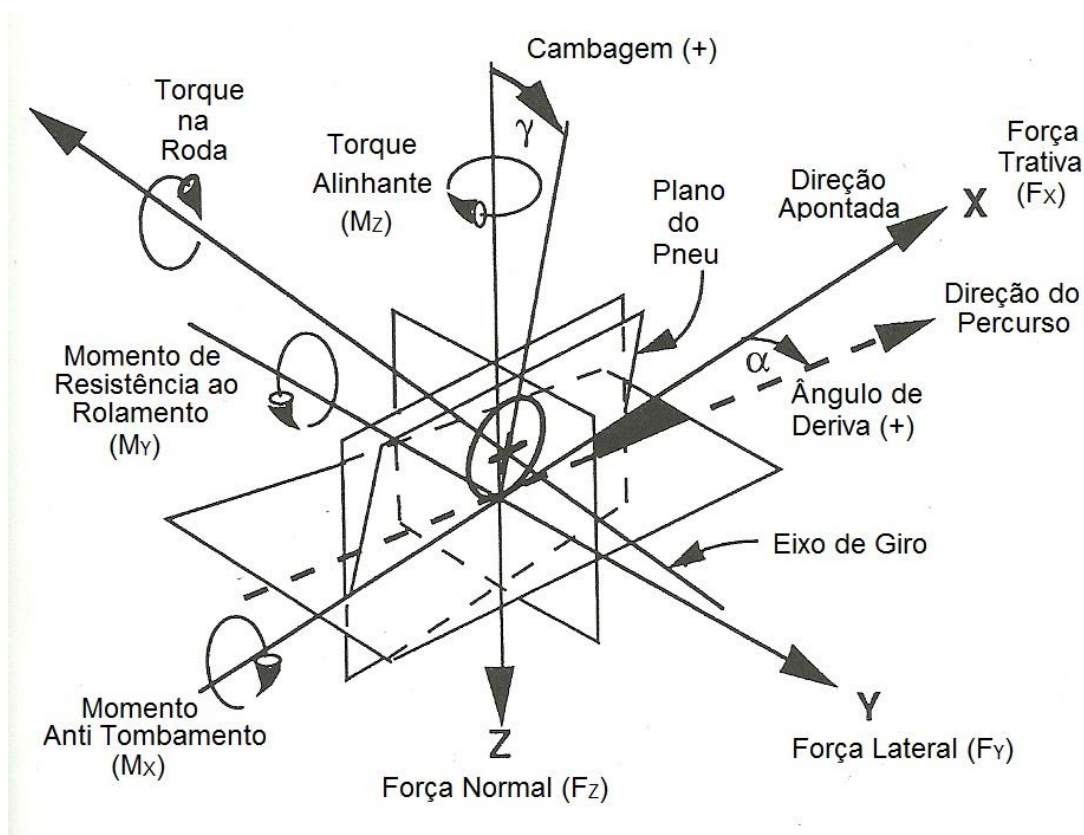
Mostrado na Figura 2.1, este sistema de coordenadas é de fundamental importância para o entendimento dos conceitos subsequentes, pois exhibe a nomenclatura, direção e sentido dos eixos convencionados para um veículo qualquer.



**Figura 2.1 - Sistema de coordenadas do veículo.**  
FONTE: (MILLIKEN, 1995)

### 2.2 Sistema de forças e momentos em pneus

Proposto pela Sociedade dos Engenheiros da Mobilidade (SAE) para descrever os esforços de interação entre pneu e solo, o sistema mostrado abaixo, Figura 2.2, foi convencionado para facilitar análises das reações num sistema de direção/suspensão hipotético.



**Figura 2.2 - Sistema de coordenadas de pneus (SAE).**  
**FONTE: (GILLESPIE, 1992)**

A seguir descreve-se os esforços que serão necessários para o entendimento do restante do estudo.

### 2.2.1 Força Normal ( $F_z$ )

Esta componente atua em direção perpendicular ao solo e sempre será uma variável quando se deseja determinar os demais esforços mostrados na Figura 2.2. A soma das reações de todos os pneus devem resultar no peso do veículo juntamente com a carga aerodinâmica atuante na vertical, (GILLESPIE, 1992).

### 2.2.2 Ângulo de Deriva ( $\alpha$ )

Também chamado de ângulo de deslizamento, é definido pelo ângulo formado entre a trajetória imaginária na qual o pneu está apontado e a trajetória que realmente é descrita pelo mesmo. É fator determinante na capacidade do pneu gerar força lateral, (ibidem).

### 2.2.3 Força Lateral ( $F_y$ )

Esta é a componente responsável em alterar a trajetória de um veículo em qualquer situação, portanto, pode-se dizer que a capacidade de um automóvel realizar curvas está ligada à quanta força lateral o pneu é capaz de gerar. Atua no plano do solo e perpendicularmente à direção apontada pelo pneu, (ibidem).

### 2.2.4 Momento de Resistência ao Rolamento ( $M_y$ )

Compreende-se como um momento resistivo ao giro livre do pneu sobre o solo. É resultado da deformação do pneu na interface com o piso dissipando energia na forma de calor para o interior do pneumático. Considera-se um valor constante até velocidades em torno de 100km/h, (REIMPELL et al., 2001).

### 2.2.5 Ângulo de Inclinação ( $\gamma$ )

Mais conhecido como ângulo de cambagem, é compreendido como a inclinação do pneu em relação ao plano x-y. Valores negativos de cambagem incrementam a força lateral gerada pelo pneu, porém numa taxa entre quatro e seis vezes menor que a força gerada por um ângulo de deriva similar, (GILLESPIE, 1992).

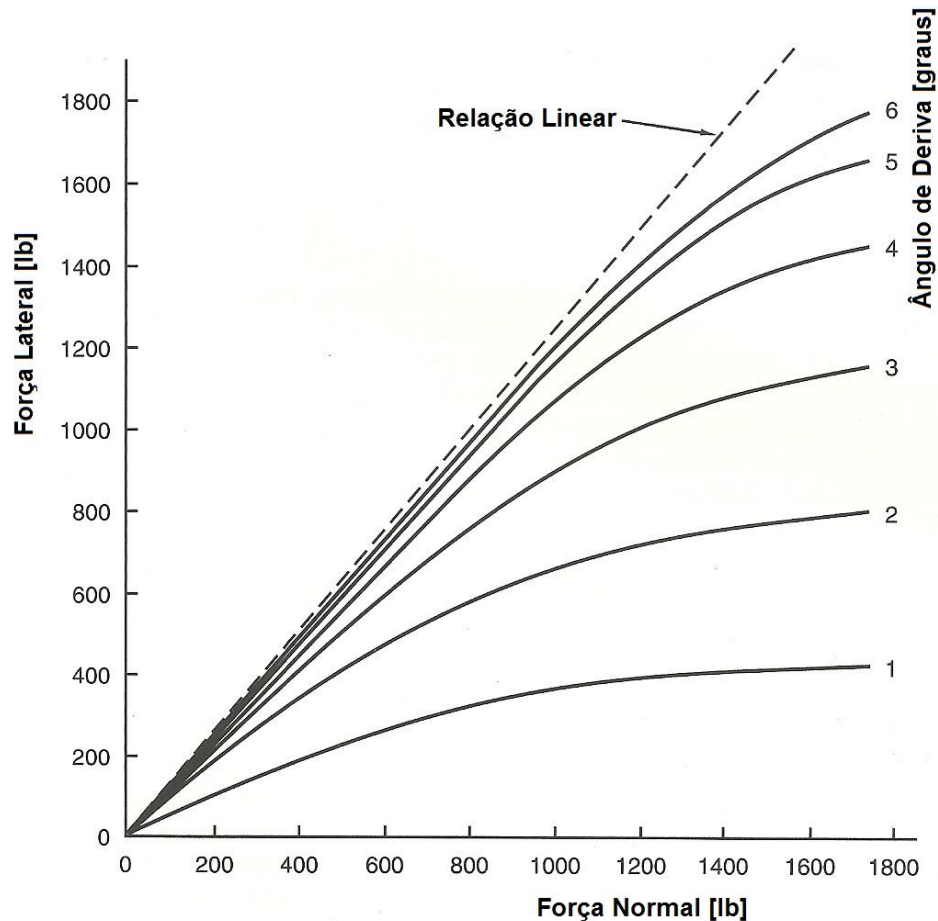
## 2.3 Coeficiente de Fricção

Define-se como a razão entre força lateral gerada pelo pneu ( $F_y$ ) e a carga normal ( $F_z$ ) a qual está submetido, conforme Equação 2.1.

$$C_y = \frac{F_y}{F_z} \quad \text{Eq. 2.1}$$

Diferentemente de coeficientes de atrito, mensurados em contatos entre corpos rígidos, o coeficiente de fricção não é constante com a variação de carga normal. Outros fatores que influenciam este valor, são: pressão de inflação, cambagem, tipo de pneu e composto da borracha. Para ângulos de deriva pequenos pode-se dizer que o coeficiente de fricção se mantém constante quando as demais variáveis já citadas são mantidas inalteradas. Isso fica evidente na Figura 2.3 onde o início das curvas é uma reta, caracterizando o

coeficiente constante. Num certo valor de ângulo de deslizamento a capacidade do pneu aderir-se ao solo começa a saturar, dando início a queda do coeficiente de fricção, (REIMPELL et al., 2001).



**Figura 2.3 - Exemplo de variação de força lateral em função da carga normal e diversos ângulos de deriva.**

**FONTE: (MILLIKEN, 1995)**

## 2.4 Mecanismos para geração de aderência

### 2.4.1 Solos Rígidos

Existem dois fenômenos que ocorrem nos pneus para que os mesmos gerem aderência sobre um solo rígido, conforme Figura 2.4.

O primeiro mecanismo, a histerese, relaciona-se com a deformação do pneu entre os agregados do solo. Com estes agregados gera-se aleatória



seja, aqueles que apresentam cravos em sua banda de rodagem. Vide exemplo na Figura 2.5.



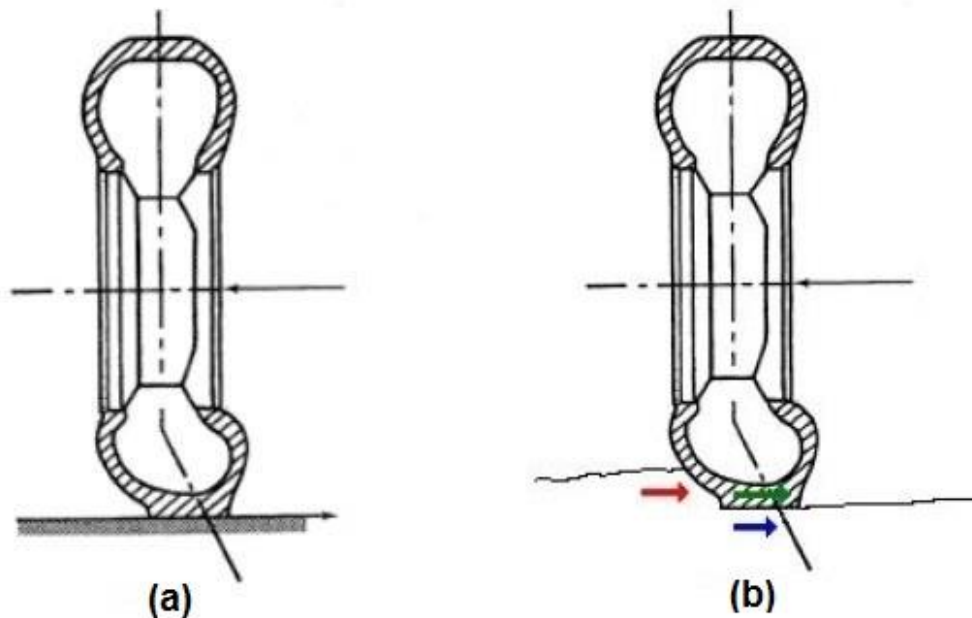
**Figura 2.5 - Exemplo de pneu com cravos, próprio ao uso fora de estrada.**  
FONTE: <<http://www.maxxis.com/catalog/tire-366-109-front-pro>>

Através destes cravos gera-se aderência neste tipo de pneu, pois os mesmos penetram no solo aumentando a capacidade de transmitir forças para o terreno. Sua eficiência pode variar bastante de acordo com a quantidade de cravos, dimensão e disposição dos mesmos. Com este último fator define-se desempenho mais adequado para acelerações longitudinais ou laterais, ou seja, se deve ser usado num eixo responsável em tracionar o veículo ou naquele responsável em guiá-lo, (AGEIKIN, 1987).

Outro fator primordial é a resistência do solo ao cisalhamento, pois esta é a tensão máxima suportada pelo mesmo sem haver deslizamento da camada superficial. Essa tensão pode ser bastante alterada de acordo com o tamanho das partículas, quão compactadas estão e a umidade do terreno (i.e. percentual em massa de água presente no solo), (VARGAS, 1977).

Na Figura 2.6b nota-se que eventualmente podemos ter o apoio do pneu em algum ressalto do terreno, fazendo-se o incremento da força lateral máxima suportada.

Por se tratar, na maioria das vezes, de terrenos compostos por partículas soltas os efeitos da histerese e adesão vistos para solos rígidos tem pouca importância nesse tipo de caso.



**Figura 2.6 - Pneu deformado quando submetido a força lateral em solo rígido (a) e em solo plástico (b).**

FONTE: (AGEIKIN, 1987)

## 2.5 Outros Efeitos sobre o Pneu

Nessa seção exibe-se outras variáveis importantes na geração de aderência de um pneu:

### 2.5.1 Pressão de Inflação

A pressão é certamente o parâmetro mais fácil de ser alterado para atingir o comportamento desejado num veículo. Via de regra, quanto mais inflado o pneumático, mais rígido ele se torna e a transferência de força entre pneu e solo realiza-se com deslizamentos menores. Em outras palavras, pode-se afirmar que existe uma correlação entre pressão de inflação e deslizamento dos pneus, evidenciando a possibilidade de controlar o efeito esterçante de um automóvel apenas com a alteração deste parâmetro. O momento de resistência ao



rolamento é outra variável bastante afetada. Com o aumento da pressão de inflação, menor o momento resistivo ao rolamento, (MILLIKEN, 1995).

### 2.5.2 Temperatura do pneu

Este fator é relevante somente em pneus voltados a pistas de asfalto, principalmente os do tipo *slick*. O aquecimento da banda de rodagem até cerca de 100°C incrementa substancialmente o coeficiente de fricção do pneu. Isso ocorre devido à maior viscoelasticidade da borracha com o aumento da temperatura. Entende-se por viscoelasticidade a ocorrência de deformação elástica e viscosa ao mesmo tempo. Deformação elástica é aquela que ocorre com a aplicação de uma carga insuficiente para a geração de deformação permanente e tem retorno instantâneo com a cessão da carga. Já a deformação viscosa possui um certo tempo para que haja o completo retorno do material no término de aplicação de carga. Existe uma correlação entre a temperatura do pneu e a pressão de inflação, pois com o aquecimento da banda de rodagem o interior do pneu absorve parte do calor gerado, resultando num aumento da pressão. Solos com umidade elevada tendem a ter uma troca térmica eficiente, dessa forma, permitindo que esse efeito seja desprezado, (ibidem).

### 2.5.3 Velocidade

Estudos apontam que com o aumento da velocidade o pneu pode apresentar certa perda na capacidade de gerar força lateral. Este fenômeno não é consistente para todos os tipos de pneus, portanto não pode ser generalizado. Existem tentativas de ensaios para entender o fato, mas o grande aquecimento do pneumático durante sua realização acaba tornando os resultados inconclusivos, (ibidem).

## 2.6 Ensaios para Caracterização

Atualmente existem três tipos de dispositivos distintos voltados à caracterização de pneus. Abaixo mostra-se as peculiaridades de cada um:

### 2.6.1 Cilindro Rotativo

É a forma menos utilizada atualmente por não representar exatamente o arco de contato entre pneu e solo. Isso ocorre pelo fato do cilindro possuir uma superfície com raio relativamente pequeno, como pode ser visto na Figura 2.7, diferentemente da realidade onde temos solos planos. Alguns modelos permitem

a utilização tanto da superfície interna, quanto da externa. Uma terá um arco de contato superior e outra inferior a realidade. Este ensaio dificulta a caracterização de pneus voltados a terrenos fora de estrada por não permitir a simulação de solos plásticos em sua superfície.



**Figura 2.7 - Cilindro rotativo usado para caracterização de pneus.**  
FONTE: :<[www.michelin.pt](http://www.michelin.pt)>

### 2.6.2 Esteira

Mostrado na Figura 2.8, este é o dispositivo mais utilizado atualmente. O problema do arco de contato não existe com esse equipamento e o pneu pode ser ensaiado em diversas velocidades, analisando a influência da mesma. Por ser um ensaio feito em laboratório torna-se mais fácil o controle das diversas variáveis envolvidas na caracterização, gerando resultados mais confiáveis. Permite a simulação de diversos terrenos através de dispositivos que depositam as partículas numa extremidade da esteira e, após passarem pelo pneu testado, são recolhidas. Sua desvantagem é o alto custo dos equipamentos, sendo viável somente a grandes fabricantes de pneus ou institutos especializados.



**Figura 2.8 - Caracterização através de esteira.**  
FONTE: <[www.edccorp.com](http://www.edccorp.com)>.



**Figura 2.9 - Trenó utilizado para caracterização de pneus.**  
FONTE: <[www.research.vt.edu](http://www.research.vt.edu)>

### 2.6.3 Trenó

Das três opções é o mais barato e fácil de ser construído. Sua grande vantagem é que todo ensaio pode ser feito no solo exato que o pneu será utilizado. Os dispositivos comerciais costumam utilizar uma carroceria de ônibus adaptada para caracterizar o pneu desejado, nesse caso, os pneus do ônibus contrapõem as forças geradas pelo pneu ensaiado. Outra maneira de reagir a força gerada pelo pneu é adicionando outro exatamente igual, mas posicionando com ângulo de deslizamento contrário. Um exemplo de trenó pode ser visto na Figura 2.9.

### **3. METODOLOGIA**

#### **3.1 Escolha da Metodologia**

Como mostrado no item 2.6, são três os tipos de ensaio designados ao mesmo fim. Tendo como objetivo desenvolver um dispositivo simples e economicamente viável, não podemos considerar a hipótese de construir dispositivos baseados nos dois primeiros tipos, pois são equipamentos bastante elaborados e com diversos sistemas de controle e medições, o que tornaria seu custo elevado. Além disso, os pneus a serem caracterizados são de uso fora de estrada e o único tipo de ensaio realizado em campo é o do trenó, razão pela qual optamos pelo desenvolvimento deste tipo de dispositivo. Com essa escolha, é possível substituir todos os acionamentos hidráulicos, que teríamos nos outros tipos de equipamento, por cargas normais atingidas por meio de lastro e ângulos de deslizamento atingidos através de mecanismos mais simples, muito semelhantes aos de direção veicular.

Além disso, pode-se realizar a caracterização indiretamente, ou seja, em função da força trativa aplicada no reboque é calculada quanta força lateral está sendo gerada. Haveria a possibilidade de se medir essa força diretamente na sua direção de atuação, no entanto essa escolha tornaria o dispositivo mais oneroso financeiramente.

#### **3.2 Descrição da Metodologia**

O trenó desenvolvido possui corpo tubular, montantes e demais braços de suporte ao montante em aço, com regulagens de cambagem e convergência para corrigir eventuais erros de fabricação. Componentes que exercem grande influência no posicionamento dos pneus foram concebidos em chapas cortadas a laser a fim de minimizar ao máximo defeitos no processo produtivo. O trenó desenvolvido não possui qualquer tipo de suspensão para efeitos de simplificação. O único amortecimento existente é feito pelo próprio pneu.

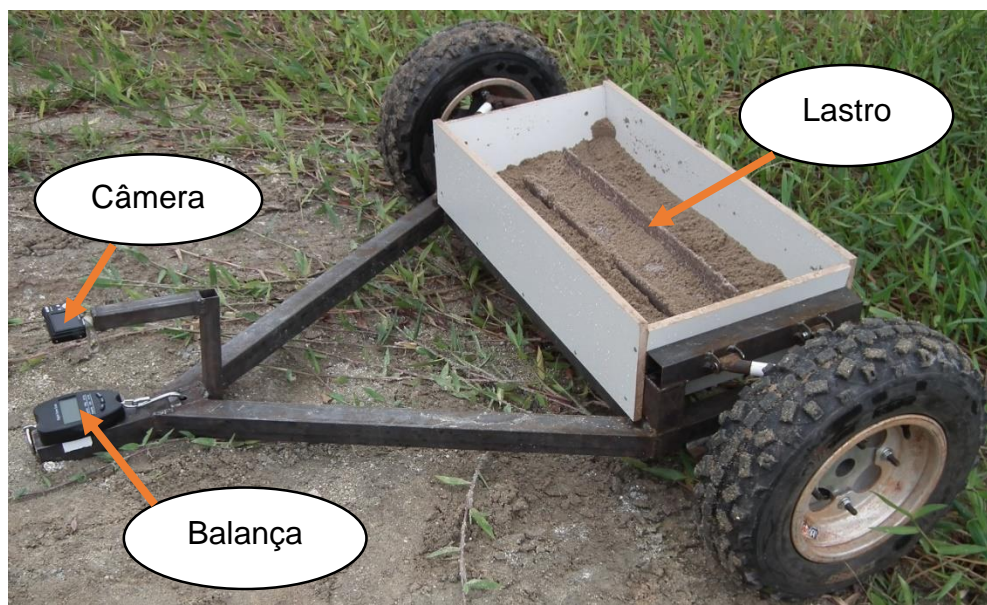
Como hipótese simplificadora atribui-se somente a massa do Baja a responsabilidade de gerar força normal na interface pneu-solo, ou seja, despreza-se quaisquer efeitos aerodinâmicos.

A seguir são descritos os sistemas fundamentais que designam o dispositivo.

### 3.2.1 Diferentes forças normais

As cargas normais necessárias ao experimento são atingidas alocando areia no compartimento desenvolvido entre o par de pneus, como visto na Figura 3.1. Com o uso de balanças domésticas, usadas na medição de massa de pessoas, afere-se qual a reação do pneu ao solo. A carga nos dois lados do protótipo devem ser iguais para proporcionar ao par de pneumáticos a mesma condição. Cargas diferentes devem proporcionar deslizamentos diferentes, adicionando erros ao experimento. Recomenda-se fazer essa aferição de carga com o dispositivo já acoplado ao veículo para evitar variações na reação do pneu com diferentes inclinações do trenó.

Ressalta-se que as cargas devem ser definidas com base no peso do Baja de cada equipe, considerando as variações de reação que ocorrem na presença de aceleração lateral no veículo.



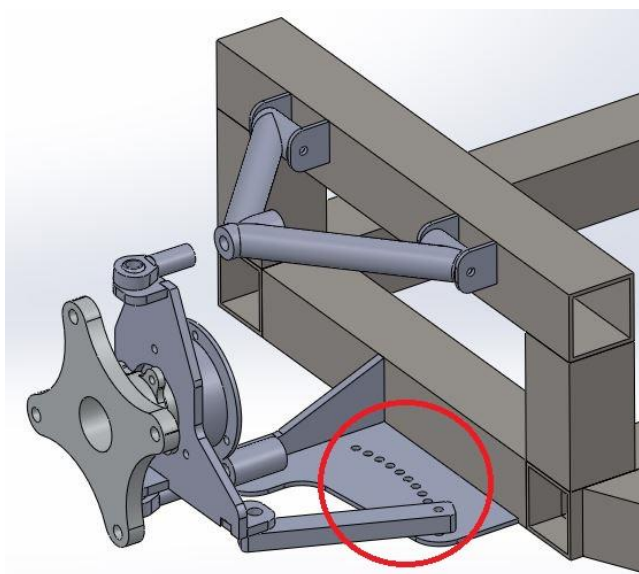
**Figura 3.1 - Visão global do protótipo.**  
FONTE: Autoria própria.



### 3.2.2 Diferentes ângulos de deslizamento

Para atingir o objetivo de se construir um equipamento que permita a rápida mudança nos ângulos de deriva, se utiliza onze opções de fixação das barras de direção, que por sua vez, resultam em onze ângulos de deslizamento diferentes em incrementos de 1,5 graus, iniciando em zero. Assim, a troca desse ângulo depende somente da retirada de um parafuso de cada lado no dispositivo e sua recolocação no furo seguinte, como destaca-se na Figura 3.2.

O posicionamento dos pneus nos ângulos corretos é garantido apenas com a ferramenta de desenho assistido por computador (CAD), em conjunto com o preciso processo de fabricação de corte a laser, além da gabaritação relativamente simples de todo corpo do trenó. Recomenda-se a conferência dos ângulos reais no dispositivo, desde que sejam feitas com instrumentos adequados e que retornem valores confiáveis.



**Figura 3.2 - Troca do ângulo de deslizamento.**  
FONTE: Autoria própria.

### 3.2.3 Sistema de medição de forças

O sistema de medição é constituído de uma balança de tração digital com capacidade para 150 kgf (AGROZOOTEC, cód. 05.01.1250). Embora os valores medidos não devam ultrapassar o valor de 50 kgf, optou-se por um equipamento

que suporte sobrecarga de 200% devido aos esforços dinâmicos oriundos das irregularidades do solo e da própria aceleração do protótipo. A limitação desse aparelho é que ele somente exhibe os valores medidos instantaneamente em seu visor. Assim, é necessário o uso de uma câmera, logo acima do visor da balança, para gravar todas as medições ao longo dos 25 metros do ensaio. A câmera utilizada é uma Fuji Finepix J10. A disposição da balança e da câmera podem ser vistos nas Figuras 3.1 e 3.3.

A balança não possui certificado de calibração e não se realiza nenhum processo semelhante. A falta de calibração tem influência no perfeito posicionamento da curva, mas não deve acarretar mudanças em seu formato e, conseqüentemente, na localização dos picos, dados mais importantes do estudo. Almejando um grande refino no experimento, deve-se calibrar o equipamento antes de qualquer medição.



**Figura 3.3 - Acoplamento do trenó com o veículo e sistema de medição de força.**

**FONTE: Autoria própria.**

#### 3.2.4 Acoplamento ao veículo

É feito com dois tubos de aço, um fixo no automóvel e outro no protótipo, um adentrando ao outro. Toda força axial aos tubos é sustentada pela balança, como visto na Figura 3.3, fazendo a medição de força trativa.

#### 3.2.5 Solo

Considerando que o pneu a ser ensaiado é de uso fora de estrada, usa-se um solo plástico como base para o experimento. Devido a mais fácil disponibilidade e a aparente semelhança com algumas situações de competições organizadas pela SAE, optou-se por um terreno que possui fundações bastante compactas (barro) e uma fina camada superficial de areia grossa, muito semelhante à usada em construções de alvenaria. Obviamente devem ocorrer deformações no solo a cada passada do trenó, podendo se fazer necessário a uniformização do terreno entre as diversas passagens. Além disso, projetou-se o dispositivo com a mesma bitola do carro que faz o reboque do trenó, no caso um Chevrolet Classic dotado de motor com 1000 centímetros cúbicos. Dessa forma, espera-se maior homogeneidade entre as passadas com a prévia compactação do solo pelo veículo.

#### 3.2.6 Parâmetros dos ensaios

Dos 25 metros de deslocamento, os 15 metros iniciais se destinam a aceleração do veículo/protótipo e os 10 metros posteriores são transpostos em velocidade constante para a realização de três medições de força. Definiu-se a velocidade de 10 km/h para os experimentos, adequada ao espaço e ao terreno disponível. O controle de velocidade é feito visualmente através do velocímetro ou do conta-giros do automóvel. A aferição de velocidade não é exatamente precisa, porém como este parâmetro não deve influenciar nos resultados dos ensaios, é aceitável que o controle seja feito desta forma.

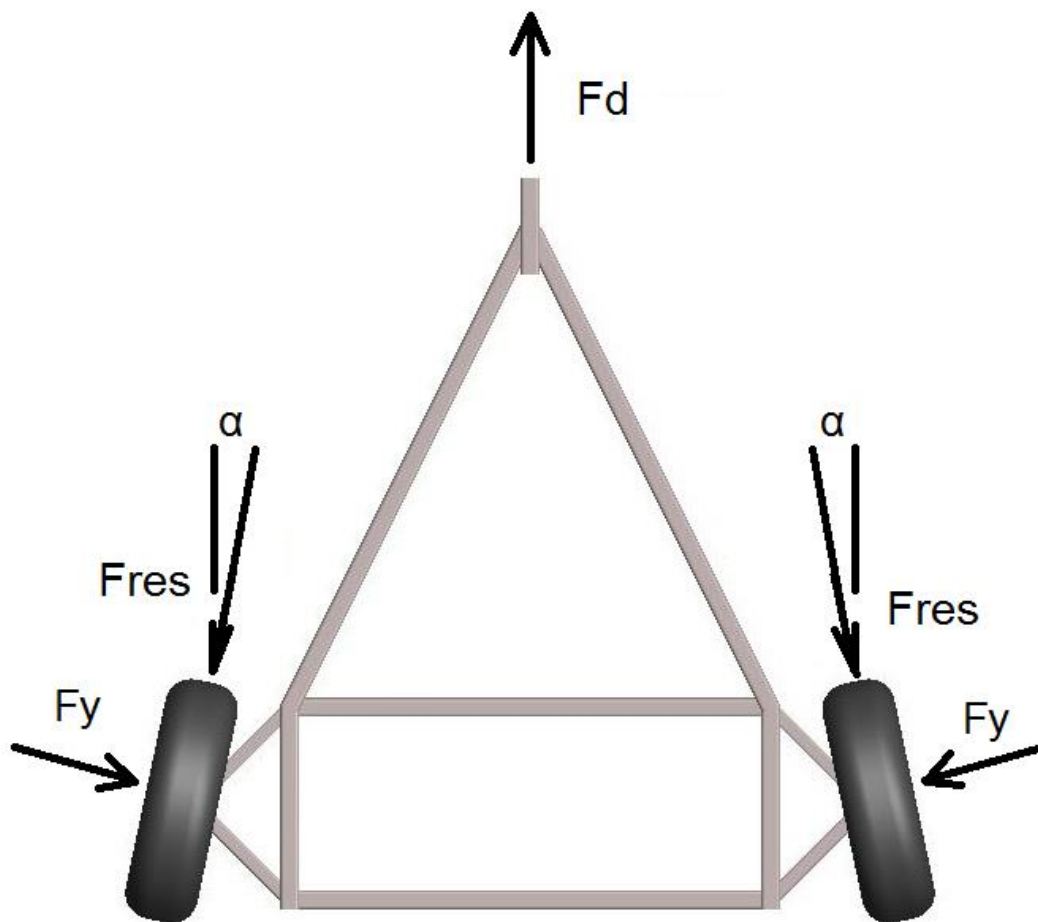
Os pneumáticos escolhidos (Maxxis Razr Cross AT20x6-10) tem características mistas, ou seja, podem ser empregados tanto em eixos de tração como de direção e são inflados com 8psi.

#### 3.2.7 Cálculo dos resultados

Havendo medições precisas em todas as situações, pode-se determinar as curvas de força lateral do pneu empregado. É definida uma curva de



tendência para cada uma das cargas normais utilizadas e os picos dos gráficos são calculados através da derivada da curva obtida. Tendo estes pontos de máximo determinados, plota-se a curva de tendência que liga os picos das curvas e tem-se as situações ideais de operação do pneu em questão.



**Figura 3.4 - Diagrama de corpo livre do trenó.**  
 FONTE: Autoria própria.

A medição de força lateral é feita indiretamente através de um dinamômetro pelo qual o trenó é puxado, como visto na Figura 3.4. Desenvolvendo as expressões de equilíbrio para todo o corpo, chega-se na Equação 3.1. A força lateral gerada ( $F_y$ ) por cada um dos pneus é expressa em função da medição do dinamômetro ( $F_d$ ), da força resistiva do conjunto ( $F_{res}$ ) e do ângulo de deriva ( $\alpha$ ). A força resistiva substitui o momento de resistência ao

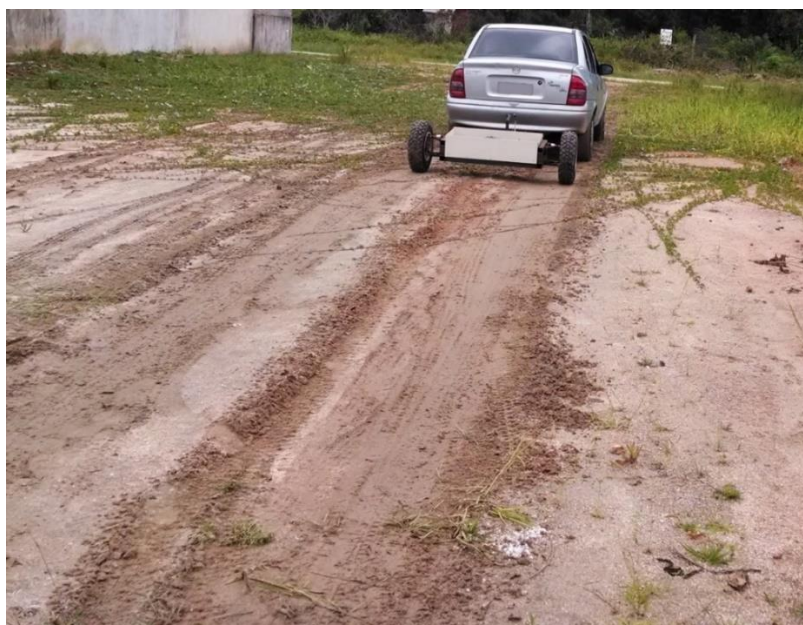
rolamento dos pneus de modo a facilitar o equacionamento, dessa forma, todo expresso em unidades de força. Para determiná-la, é feita uma medição inicial com deslizamento nulo e, como não haverá força lateral nesse caso, pode-se facilmente extrair a força resistiva que usa-se para todas as outras medições, com a mesma carga normal em questão. Para o perfeito entendimento da Equação 3.1, ressalta-se que o valor obtido nas medições com deslizamento nulo se referem as resistências do par de pneus. Quando se faz o diagrama de corpo livre do sistema, são usadas as forças resistivas em cada um dos pneus separadamente, ou seja, para a correta utilização da expressão abaixo, entra-se com o valor de força resistiva ( $F_{res}$ ) de somente um dos pneumáticos.

$$F_y = \frac{F_d}{2 \cdot \sin(\alpha)} - \frac{F_{res}}{\tan(\alpha)} \quad \text{Eq. 3.1}$$

## 4. DESENVOLVIMENTO DOS ENSAIOS

### 4.1 Considerações sobre o solo

Os ensaios ocorrem em solo compacto e com fina camada superficial de areia grossa. Embora a camada não fosse muito espessa, mostrou-se suficiente para não haver grandes mudanças entre todas as 33 passagens do trenó (onze ângulos de deslizamento, com três cargas distintas). Devido à grande quantidade de chuva que precedeu os ensaios e a baixa permeabilidade do solo, pode-se ter por período suficiente (em torno de quatro horas) o terreno em condição bastante homogênea. Era esperada a formação de sulcos no solo devido ao arraste do pneu, o que acabou não se confirmando. Acredita-se que a decisão de manter a bitola do trenó igual à do veículo tenha tido grande influência na não ocorrência de cavas, pois antes mesmo dos pneus passarem arrastando, o carro compacta o solo. Não se fez necessário a uniformização do terreno a cada passagem do dispositivo, ao contrário do que se previa. Na Figura 4.1, pode ser visto a situação do solo com a realização de metade dos ensaios. Não se observa alterações significativas no terreno durante todo o experimento.



**Figura 4.1 - Situação do solo com metade dos ensaios realizados.**  
FONTE: Autoria própria.

## **4.2 Considerações sobre o sistema de medição de forças**

Inicialmente tinha-se a ideia de usar um dinamômetro de molas, e com o intuito de reduzir a amplitude das oscilações, associá-lo com um amortecedor automotivo. No entanto, ao se avaliar o custo do conjunto e as opções de balança digital no mercado, preferiu-se o segundo tipo, por possuir uma visualização de medição mais prática, além de permitir leituras mais constantes, uma vez que, o dinamômetro de mola poderia apresentar grandes oscilações devido às irregularidades do solo.

A balança digital também apresenta variações nas medidas, porém com amplitudes pequenas, oriundas, principalmente, da variação de velocidade do veículo. Em caso de velocidade constante, os dados devem se apresentar bastante estáveis.

## **4.3 Considerações sobre o veículo/forma de tração**

O uso de um veículo de rua como forma de tração mostra-se adequado em ensaios realizados em campo, devido à grande versatilidade de terrenos que se atinge. No entanto, como a velocidade é baixa (em torno de 10km/h) e o automóvel permanece nas marchas mais reduzidas, torna-se bastante complicado manter velocidade constante no trecho de medição, principalmente em terreno irregular. Qualquer oscilação do pedal do acelerador, é refletido nas medições da balança, como já comentado no item anterior.

## **4.4 Método para determinação de medições**

Ao unir os três aspectos mencionados acima (solo irregular, sistema de medição e sistema de tração), chega-se na maior dificuldade encontrada durante os ensaios: a elaboração de um método para se ler três valores aleatórios na balança durante o trecho de medição.

Inicialmente, foi definido que as três medições seriam exatamente nos mesmos locais demarcados no chão e que posteriormente poderiam ser vistos no vídeo, tendo-se assim o valor de cada uma das medições. Porém, com o uso do veículo de rua, é difícil a manutenção de velocidade constante e pequenas oscilações impossibilitam a tomada de valores confiáveis.

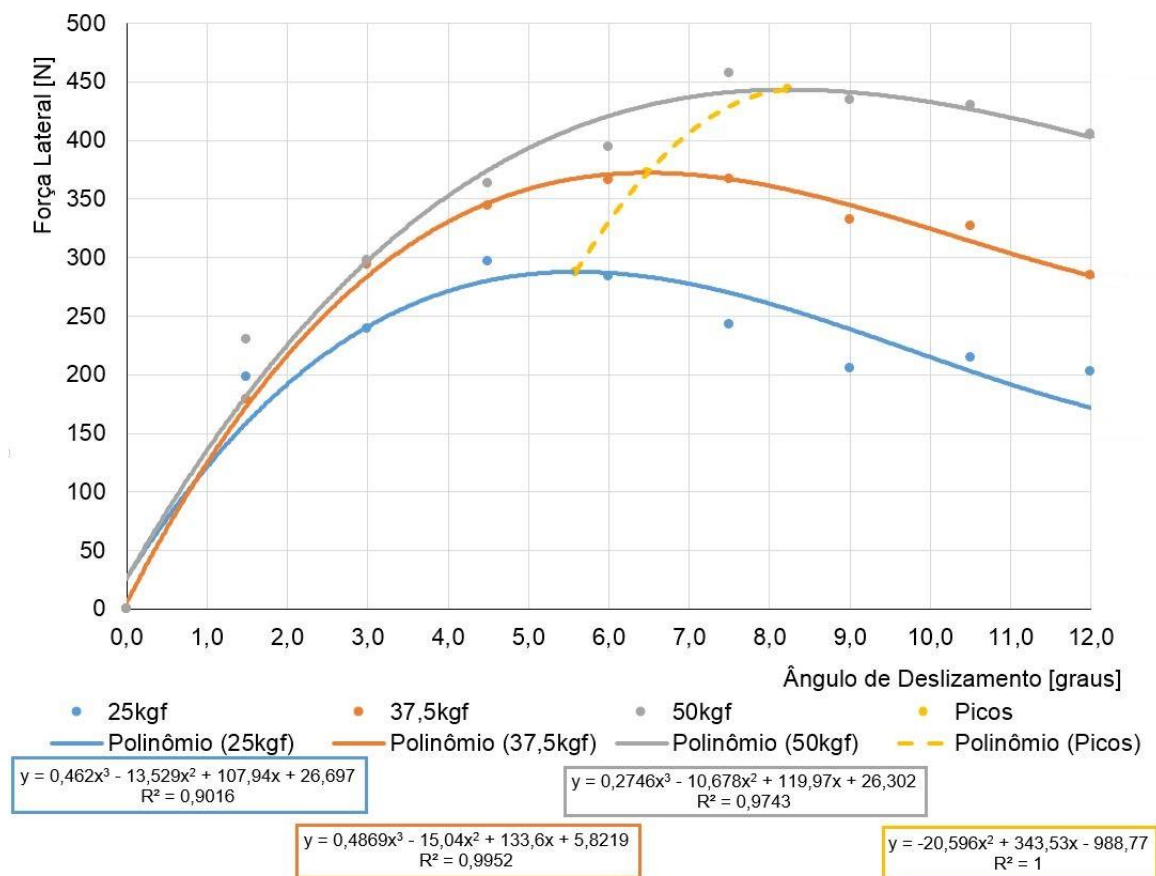
Devido ao insucesso do primeiro método, foi arbitrado um segundo que se baseia na observação visual da filmagem, determinando o momento em que

as medições estabilizam, assim, toma-se os três valores com intervalos de meio segundo. Esse método se mostra bem mais eficaz, visto que é curto o intervalo de tempo para manter velocidade constante e posteriormente é fácil analisar os vídeos em velocidade reduzida através da tela do computador.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Gráfico obtido

Para a plotagem do gráfico pretendido, tomou-se somente a média de cada uma das 33 configurações testadas. As curvas podem ser vistas abaixo na Figura 5.1. Já os valores de cada uma das configurações são apresentados no Apêndice B. Ressalta-se que o gráfico não mostra os resultados para deslizamentos superiores a 12°, pois nesse intervalo a curva de tendência passa a ter comportamento diferente da realidade, além de não ter qualquer utilidade, uma vez que, os picos foram identificados com ângulos de deriva menores (entre 5,5° e 8,5°).



**Figura 5.1 - Plotagem dos resultados dos ensaios.**  
**FONTE: Autoria própria.**

Em seguida, é determinada uma linha de tendência que melhor atenda aos pontos inseridos. Define-se todas as curvas por meio de um polinômio de terceiro grau.

Notou-se grande sensibilidade da expressão utilizada nos cálculos, Equação 3.1, para pequenos valores de deslizamento, pois para estas situações temos nos denominadores valores muito pequenos (tendendo à zero), ou seja, pequenas oscilações nas medições geram variações bastante grandes no cálculo de força lateral. Também é observado que a força resistiva – calculada com deslizamento nulo - é maior do que se previa, ou seja, pode exercer influência grande em toda a curva e em hipótese alguma pode ser desprezada. Os valores das medições podem ser conferidos no Apêndice A.

No geral, o gráfico apresenta-se com forma semelhante ao mostrado na literatura: inicia de forma linear, curva-se até um pico de força e decai, conforme revisado no item 2.3, (MILLIKEN, 1995). Como utiliza-se linha de tendência polinomial não fica claro o comportamento linear inicial. Focando no pico de força gerado pelo pneu, determinar essa reta, e conseqüentemente o coeficiente de fricção, não é tão fundamental.

Outro comportamento esperado e que se observa no gráfico é em relação à sensibilidade à carga. É esperado que com o aumento de carga normal haja a redução do coeficiente de fricção, (MILLIKEN, 1995). Embora não se tenha conseguido a determinação do coeficiente das três curvas, esse fato fica evidenciado pela maior proximidade entre as duas curvas superiores. Em outras palavras, aplicando-se um incremento de carga normal constante nos pneus, consegue-se aumentos de força lateral, porém em taxas menores que a taxa de aumento da carga normal. Assim, consegue-se compreender porquê transferência de carga (i.e. alterações de reações normais nos pneus quando o veículo está sujeito a aceleração lateral) nunca é algo bem visto em estudos de dinâmica veicular.

## **5.2 Custo**

Os custos com a construção do protótipo e realização dos ensaios são separados em duas partes: despesas que podem ser evitadas com a utilização

de peças do próprio protótipo Baja e gastos que terão que ser realizados exclusivamente para o trenó.

O custo total do experimento é orçado em torno de R\$2480, sendo que desta quantia, R\$2020 serão usados com o protótipo Baja propriamente dito ou podem deixar de ser gastos utilizando-se equipamentos pessoais, da equipe ou da instituição de ensino. Os itens em questão são apresentados na Tabela 5.1.

**Tabela 5.1 - Custos facilmente contornáveis com componentes de equipe.**

Item	Custo
Câmera	R\$ 250,00
Balança doméstica	R\$ 120,00
Montante	R\$ 300,00
Rolamentos	R\$ 300,00
Cubos	R\$ 200,00
Rodas	R\$ 350,00
Pneus	R\$ 500,00
<b>TOTAL</b>	<b>R\$ 2.020,00</b>

Os R\$460 restantes, mostrados na Tabela 5.2, são itens primordiais para a produção do trenó e que são utilizados apenas para este fim. Desta forma, considera-se este o custo da execução do estudo para uma equipe de Baja SAE, público alvo do experimento.

**Tabela 5.2 - Custos inevitáveis na produção do trenó.**

Item	Custo
Tubos de aço	R\$ 50,00
Parafusos	R\$ 40,00
Cortes a laser	R\$ 120,00
Caixa de lastro	R\$ 30,00
Balança digital	R\$ 220,00
<b>TOTAL</b>	<b>R\$ 460,00</b>



## 6. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

A aplicação de uma ferramenta estatística tem como objetivo dar confiança aos resultados adquiridos de maneira experimental. Neste estudo, também permite que seja descoberto o comportamento do pneu de maneira aproximada e, após definidos os pontos de interesse, realiza-se novas medições com tamanho amostral que o método indicar necessário.

### 6.1 Determinação do tamanho da amostra

É proposto um modelo estatístico que calcula o tamanho mínimo da amostra para cada configuração testada, mostrado na Equação 6.1, (ANDRUSKI, 2011).

$$n \geq \frac{z_c^2 \cdot s^2}{\xi^2} \quad \text{Eq. 6.1}$$

Para a utilização da equação acima, é necessário arbitrar um número de medições iniciais, no caso três. Através desses três valores obtidos é calculado o desvio padrão de cada amostragem(s).

Define-se o nível de confiança em 95% o que retorna uma constante da distribuição normal ( $z_c$ ) igual a 1,96, conforme tabela presente no Anexo A.

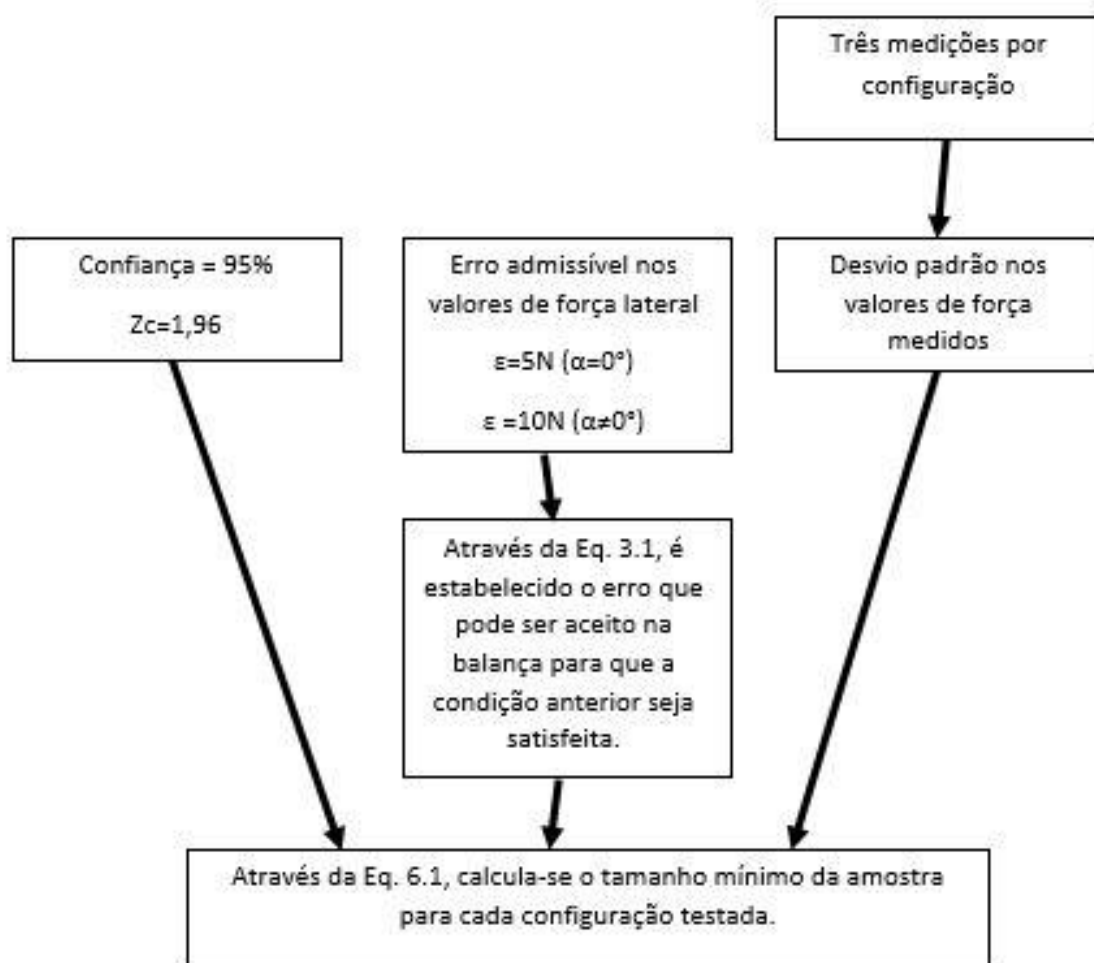
Também se faz necessário arbitrar qual será o erro máximo aceito. Como a medição com deslizamento nulo ( $\alpha=0^\circ$ ) é utilizada em todos os outros cálculos, é admitido um erro de apenas 5N (para cada pneu) nestas configurações. Já para as demais, onde há deslizamento, é aceito erros de 10N (para cada pneu). Este erro se refere ao valor calculado de força lateral, por este motivo é usada a Equação 3.1 para descobrir qual seria o erro admissível na balança para que a condição de erro máximo fixado em 10N seja satisfeita. Os resultados desses cálculos são exibidos na Tabela 6.1.

**Tabela 6.1 - Erro admissível na balança para satisfazer a condição de erro máximo no cálculo de força lateral.**

Deslizamento	$\epsilon$ Balança [N]
0°	10,00
1,5°	0,52
3,0°	1,05
4,5°	1,57
6,0°	2,09
7,5°	2,61
9,0°	3,13
10,5°	3,64
12,0°	4,16
13,5°	4,67
15,0°	5,17

De modo a tornar a explicação mais intuitiva, exibe-se um fluxograma do raciocínio utilizado, na Figura 6.1.

Com o uso desse modelo, pode-se realizar poucas medições inicialmente e idealizar onde estarão localizados os picos das curvas pretendidas. Assim, o maior número de medições posteriores, a fim de atingir a confiança requerida, é feita somente nos pontos de interesse, ou seja, aqueles adjacentes aos picos.



**Figura 6.1 - Fluxograma para determinação do tamanho da amostra.**  
**FONTE: Autoria própria.**

## 6.2 Amostragem requerida

Apresentado no item 6.1, o modelo estatístico tem como objetivo calcular o tamanho da amostra necessária para cada configuração atingir 95% de confiança. Na Tabela 6.2 temos os valores de desvio padrão obtidos em todas as 33 configurações. Com auxílio da Tabela 6.1, que mostra os erros que podem ser aceitos na balança, e da Equação 6.1, calcula-se o tamanho da amostragem necessária em cada configuração. Os resultados são mostrados na Tabela 6.3.

**Tabela 6.2 - Desvio padrão obtido nas três medições iniciais.**

Deslizamento	25kgf	37,5kgf	50kgf
0°	2,52	3,61	1,53
1,5°	1,53	2,08	2,08
3,0°	2,52	2,08	2,31
4,5°	1,53	2,52	1,80
6,0°	2,52	3,00	2,00
7,5°	3,06	2,00	1,15
9,0°	2,65	2,65	2,31
10,5°	2,52	3,06	2,65
12,0°	3,79	2,08	2,89
13,5°	2,00	2,65	3,51
15,0°	3,51	2,52	1,73

**Tabela 6.3 - Amostragem necessária para cada configuração a fim de obter 95% de confiança nos resultados.**

Deslizamento	25kgf	37,5kgf	50kgf
0°	0,2	0,5	0,1
1,5°	32,7	60,8	60,8
3,0°	22,2	15,2	18,7
4,5°	3,6	9,9	5,1
6,0°	5,6	7,9	3,5
7,5°	5,3	2,3	0,8
9,0°	2,7	2,7	2,1
10,5°	1,8	2,7	2,0
12,0°	3,2	1,0	1,9
13,5°	0,7	1,2	2,2
15,0°	1,8	0,9	0,4

Os valores de desvio padrão estão bastante semelhantes uns aos outros, porém o tamanho das amostras varia bruscamente. Isso se deve ao erro admissível em cada configuração (Tabela 3.1) e à sensibilidade da expressão utilizada nos cálculos de força lateral (Equação 4.1), conforme já explanado.

## 7. LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Com o intuito de auxiliar às equipes interessadas em realizar tal experimento e para servir de motivação aos futuros interessados em desenvolver e aprimorar o dispositivo, faz-se algumas considerações para melhor rendimento dos ensaios.

### 7.1 Sistema de medição

É visto como o principal equipamento no sucesso do experimento. A obtenção de dados precisos e com pouca dispersão é determinante na obtenção da curva correta e com intervalos de confiança reduzidos.

Embora a balança digital lida através de uma câmera tenha aplicação aceitável, recomenda-se a utilização de uma célula de carga que realize o envio de todas as leituras para um computador, para posterior filtragem dos dados. Essa mudança não necessariamente acarreta em acréscimo no custo, uma vez que, tal equipamento pode ser disponibilizado pela instituição de ensino ou parceiros.

Por fim, a utilização de um sistema de amortecimento mecânico pode vir a ser uma solução para dados mais constantes, assim como, a troca do sistema de tração.

### 7.2 Sistema de tração

Conjuntamente com o sistema de medição, o de tração é outro que pode ter grande interferência no resultado. Pode-se dizer que havendo maior constância na velocidade de deslocamento do trenó, também haverá menor variação nas leituras de força.

O conjunto impulsionado por um veículo de combustão está muito suscetível a acelerações bruscas. Mesmo num solo pouco irregular, observa-se alguns solavancos refletidos no pedal do acelerador, logo, também na velocidade do trenó.

Assim, sugere-se que a propulsão seja realizada com motor elétrico, muito mais fácil de ser controlado quando comparado a um de combustão interna, em conjunto com um redutor que faria a tração de um cabo e do dispositivo,

consequentemente. Dessa forma, fica mais fácil garantir velocidade constante para todas as configurações e durante toda a faixa de medição.

É bem verdade que essa opção diminui a versatilidade do equipamento, mas ainda assim, torna-se possível a execução de ensaios em campo, necessidade da caracterização de pneus fora de estrada.

### **7.3 Caracterização com outras variáveis**

Não se pode descrever o comportamento completo do pneu somente com a curva obtida. Caso se almeje maior nível de refino no projeto, sugere-se a análise da sensibilidade à cambagem, à variação de pressão de inflação do pneumático e momento auto alinhante, com diversos valores de cáster. A construção do protótipo é praticamente a mesma, tornando-se apenas necessário a realização de um número maior de configurações a serem aferidas.

### **7.4 Medição direta versus indireta**

Optou-se pela medição de força lateral feita de modo indireto pela maior facilidade de execução. No entanto, como já comentado, a equação utilizada no cálculo é extremamente sensível para pequenos ângulos de deslizamentos. Deve ser avaliada a possibilidade de realizar medições diretamente no eixo de atuação da força lateral do pneu (Eixo Y, Figura 2.2.).

Essa sugestão ganha grande importância quando é esperado um pneumático que atinja picos de força com pequenos ângulos de deriva.

## 8. CONCLUSÕES

Embora tenha-se tido algumas dificuldades não previstas inicialmente, o estudo mostra-se viável e executável para qualquer equipe iniciante em competições Baja SAE. No geral os objetivos relacionados ao protótipo e à metodologia foram cumpridos, mas deve-se aperfeiçoá-los. A dificuldade em manter velocidade constante precisa ser extinta, possibilitando medições com oscilações menores, que por sua vez, reduz a dispersão dos dados e adiciona confiança ao estudo.

A construção do trenó é trivial para pessoas que já tenham alguma experiência com sistemas automotivos e fabricação de componentes mecânicos, como é o caso de integrantes do projeto Baja SAE. Quanto ao custo, conclui-se que é possível realizar a caracterização com menos de R\$500, viável a muitas das equipes brasileiras, desde que as mesmas façam o aproveitamento dos componentes de seus protótipos.

A aplicação do modelo estatístico é fundamental para obter confiança no estudo e refinar o posicionamento dos picos de força lateral. Neste caso, cerca de 30 medições adicionais seriam necessárias para obter 95% de confiança no posicionamento da curva dos picos. Estas aferições são realizadas nas configurações adjacentes aos picos de cada uma das três curvas.

Considerando a necessidade de se realizar projetos e estudos cada vez mais elaborados num protótipo Baja, o trenó proposto resulta numa forma barata de se extrair dados importantíssimos em estudos de comportamento dinâmico do veículo, atendendo aos objetivos específicos do trabalho.

## REFERÊNCIAS

AGEIKIN, Iakov Semenovich. **Off-the-road Mobility of Automobiles**. EUA, 1987. Universidade Cornell.

ANDRUSKI, Inácio Guimarães. **Estatística** – Notas de Aulas. Curitiba, 2011.

COMITÊ BAJA SAE BRASIL. **RBSB 1** – Definições. Disponível em: <[http://saebrasil.org.br/eventos/programas\\_estudantis/bajaregional2013/Default.aspx](http://saebrasil.org.br/eventos/programas_estudantis/bajaregional2013/Default.aspx)> Acesso em: 27 de julho de 2013.

GILLESPIE, Thomas D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. EUA, 1992. SAE.

MILLIKEN, William F.; MILLIKEN, Douglas L. **Race Car Vehicle Dynamics**. EUA, 1995. SAE.

NICOLAZZI, Lauro Cesar. **Apostila de Veículos**. Florianópolis, 2005. Apostila do Curso de Engenharia Mecânica, UFSC.

REIMPELL, Jornsens; BETZLER, Jurgens W.; STOLL, Helmut. **The Automotive Chassis: Engineering Principles**. EUA, 2001. SAE.

VARGAS, Milton. **Introdução à Mecânica dos Solos**. São Paulo, 1977. McGraw Hill.



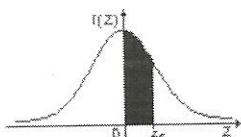
## APÊNDICE A – Valores medidos através da balança digital

Ângulo de deriva	Carga Normal: 25kgf				Carga Normal: 37,5kgf				Carga Normal: 50kgf			
	#1	#2	#3	Média	#1	#2	#3	Média	#1	#2	#3	Média
0°	53,0	48,0	50,0	50,3 N	84,0	77,0	79,0	80,0 N	116,0	119,0	117,0	117,3 N
1,5°	62,0	61,0	59,0	60,6 N	91,0	90,0	87,0	89,3 N	131,0	127,0	130,0	129,3 N
3,0°	78,0	73,0	75,0	75,3 N	109,0	113,0	110,0	110,6 N	147,0	147,0	151,0	148,3 N
4,5°	98,0	97,0	95,0	96,6 N	131,0	136,0	134,0	133,6 N	174,5	175,5	172,0	174,0 N
6,0°	112,0	107,0	109,0	109,3 N	159,0	156,0	153,0	156,0 N	201,0	197,0	199,0	199,0 N
7,5°	110,0	114,0	116,0	113,3 N	173,0	175,0	177,0	175,0 N	237,0	235,0	235,0	235,6 N
9,0°	111,0	115,0	116,0	114,0 N	181,0	186,0	182,0	183,0 N	253,0	249,0	253,0	251,6 N
10,5°	130,0	128,0	125,0	127,6 N	201,0	197,0	195,0	197,6 N	274,0	269,0	273,0	272,0 N
12,0°	135,0	136,0	129,0	133,3 N	199,0	196,0	195,0	196,6 N	285,0	280,0	285,0	283,3 N
13,5°	131,0	133,0	129,0	131,0 N	203,0	202,0	207,0	204,0 N	299,0	296,0	292,0	295,6 N
15,0°	116,0	119,0	123,0	119,3 N	212,0	217,0	214,0	214,3 N	291,0	288,0	288,0	289,0 N

## APÊNDICE B – Forças atuantes lateralmente ao pneu

Ângulo de deriva	Carga Normal: 25 kgf				Carga Normal: 37,5 kgf				Carga Normal: 50kgf			
	#1	#2	#3	Média	#1	#2	#3	Média	#1	#2	#3	Média
0°	0,0	0,0	0,0	0 N	0,0	0,0	0,0	0 N	0,0	0,0	0,0	0 N
1,5°	223,3	204,2	166,0	197,8 N	210,7	191,6	134,3	178,9 N	261,9	185,5	242,8	230,1 N
3,0°	265,1	217,3	236,4	239,6 N	278,2	316,5	287,8	294,2 N	285,1	285,1	323,3	297,8 N
4,5°	304,9	298,5	285,8	296,4 N	326,7	358,6	345,9	343,7 N	366,8	373,2	350,9	363,6 N
6,0°	296,4	272,5	282,1	283,7 N	380,2	365,8	351,5	365,8 N	403,5	384,3	393,9	393,9 N
7,5°	230,3	245,7	253,3	243,1 N	359,1	366,7	374,4	366,7 N	462,5	454,8	454,8	457,4 N
9,0°	196,0	208,8	212,0	205,6 N	326,1	342,1	329,3	332,5 N	438,5	425,7	438,5	434,2 N
10,5°	221,0	215,5	207,3	214,6 N	335,8	324,8	319,4	326,7 N	435,5	421,7	432,7	430,0 N
12,0°	206,4	208,8	191,9	202,3 N	290,5	283,3	280,9	284,9 N	409,6	397,6	409,6	405,6 N
13,5°	175,8	180,1	171,6	175,8 N	268,3	266,2	276,9	270,5 N	396,2	389,8	381,2	389,1 N
15,0°	130,2	136,0	143,8	136,7 N	260,4	270,1	264,3	264,9 N	343,4	337,6	337,6	339,5 N

## ANEXO A – Distribuição normal



$$P(0 \leq Z \leq z_c)$$

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA  
DEPARTAMENTO DE ESTATÍSTICA

TABELA 1 - Distribuição Normal Padrão  $Z \sim N(0,1)$

$z_c$	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,0000	0,0040	0,0080	0,0120	0,0160	0,0199	0,0239	0,0279	0,0319	0,0359
0,1	0,0398	0,0438	0,0478	0,0517	0,0557	0,0596	0,0636	0,0675	0,0714	0,0753
0,2	0,0793	0,0832	0,0871	0,0910	0,0948	0,0987	0,1026	0,1064	0,1103	0,1141
0,3	0,1179	0,1217	0,1255	0,1293	0,1331	0,1368	0,1406	0,1443	0,1480	0,1517
0,4	0,1554	0,1591	0,1628	0,1664	0,1700	0,1736	0,1772	0,1808	0,1844	0,1879
0,5	0,1915	0,1950	0,1985	0,2019	0,2054	0,2088	0,2123	0,2157	0,2190	0,2224
0,6	0,2257	0,2291	0,2324	0,2357	0,2389	0,2422	0,2454	0,2486	0,2517	0,2549
0,7	0,2580	0,2611	0,2642	0,2673	0,2704	0,2734	0,2764	0,2794	0,2823	0,2852
0,8	0,2881	0,2910	0,2939	0,2967	0,2995	0,3023	0,3051	0,3078	0,3106	0,3133
0,9	0,3159	0,3186	0,3212	0,3238	0,3264	0,3289	0,3315	0,3340	0,3365	0,3389
1,0	0,3413	0,3438	0,3461	0,3485	0,3508	0,3531	0,3554	0,3577	0,3599	0,3621
1,1	0,3643	0,3665	0,3686	0,3708	0,3729	0,3749	0,3770	0,3790	0,3810	0,3830
1,2	0,3849	0,3869	0,3888	0,3907	0,3925	0,3944	0,3962	0,3980	0,3997	0,4015
1,3	0,4032	0,4049	0,4066	0,4082	0,4099	0,4115	0,4131	0,4147	0,4162	0,4177
1,4	0,4192	0,4207	0,4222	0,4236	0,4251	0,4265	0,4279	0,4292	0,4306	0,4319
1,5	0,4332	0,4345	0,4357	0,4370	0,4382	0,4394	0,4406	0,4418	0,4429	0,4441
1,6	0,4452	0,4463	0,4474	0,4484	0,4495	*0,4505	0,4515	0,4525	0,4535	0,4545
1,7	0,4554	0,4564	0,4573	0,4582	0,4591	0,4599	0,4608	0,4616	0,4625	0,4633
1,8	0,4641	0,4649	0,4656	0,4664	0,4671	0,4678	0,4686	0,4693	0,4699	0,4706
1,9	0,4713	0,4719	0,4726	0,4732	0,4738	0,4744	0,4750	0,4756	0,4761	0,4767
2,0	0,4772	0,4778	0,4783	0,4788	0,4793	0,4798	0,4803	0,4808	0,4812	0,4817
2,1	0,4821	0,4826	0,4830	0,4834	0,4838	0,4842	0,4846	0,4850	0,4854	0,4857
2,2	0,4861	0,4864	0,4868	0,4871	0,4875	0,4878	0,4881	0,4884	0,4887	0,4890
2,3	0,4893	0,4896	0,4898	0,4901	0,4904	0,4906	0,4909	0,4911	0,4913	0,4916
2,4	0,4918	0,4920	0,4922	0,4925	0,4927	0,4929	0,4931	0,4932	0,4934	0,4936
2,5	0,4938	0,4940	0,4941	0,4943	0,4945	0,4946	0,4948	0,4949	*0,4951	0,4952
2,6	0,4953	0,4955	0,4956	0,4957	0,4959	0,4960	0,4961	0,4962	0,4963	0,4964
2,7	0,4965	0,4966	0,4967	0,4968	0,4969	0,4970	0,4971	0,4972	0,4973	0,4974
2,8	0,4974	0,4975	0,4976	0,4977	0,4977	0,4978	0,4979	0,4979	0,4980	0,4981
2,9	0,4981	0,4982	0,4982	0,4983	0,4984	0,4984	0,4985	0,4985	0,4986	0,4986
3,0	0,4987	0,4987	0,4987	0,4988	0,4988	0,4989	0,4989	0,4989	0,4990	0,4990
3,10 ou +	0,4999									

NOTA: Para valores de Z acima de 3,09, use 0,4999 como área.

