

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**  
**CENTRO TECNOLÓGICO**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**André Effgen de Amorim**

**Wanderson dos Santos Alves**

**Estudo de viabilidade de execução de teste simulando o  
comportamento do protótipo baja em estado estacionário em uma  
trajetória curvilínea**

**VITÓRIA**

**2013**

**Estudo de viabilidade de execução de teste simulando o  
comportamento do protótipo baja em estado estacionário em uma  
trajetória curvilínea**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Geraldo R. Sisquini, Dr.  
Coorientador: Carmen F. Santos, Me.

VITÓRIA

2013

AMORIM, André Effgen & ALVES, Wanderson dos Santos.

Estudo de viabilidade de execução de teste simulando o comportamento do protótipo BAJA em estado estacionário em uma trajetória curvilínea – 2013.

Orientador: Geraldo Rossoni Sisquini.

Coorientador: Carmen Faria Santos.

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Equações de esterçamento. 2. Teste de skid pad. 3. Gradientes de esterçamento. 4. Condições para o teste. 5. Viabilidade do teste I. AMORIM, André Effgen. II. ALVES, Wanderson dos Santos. III. Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica. IIII. Estudo de viabilidade de execução de teste simulando o comportamento do protótipo BAJA em estado estacionário em uma trajetória curvilínea.

**André Effgen de Amorim**

**Wanderson dos Santos Alves**

**Estudo de viabilidade de execução de teste simulando o comportamento do protótipo baja em estado estacionário em uma trajetória curvilínea**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em 26 Abril de 2013.

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

Prof. Dr. Geraldo Rossoni Sisquini  
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES  
Orientador

Prof.Me. Carmen Faria Santos  
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES  
Coorientador

---

Prof. Dr. Antônio Bento Filho  
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES  
Examinador

---

Prof. Doutorando Elias Dalvi  
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES  
Examinador

*...dedicamos este trabalho a toda nossa  
família, especialmente às nossas  
esposas...*

## AGRADECIMENTOS

A Deus em primeiro lugar, por ter nos protegido e guiado durante toda essa caminhada e por ter nos permitido chegar ao fim de mais um desafio.

A toda nossa família, especialmente nossos pais, Luiz Paulo Amorim e Ana Schirley Effgen de Amorim (André) e Edilio Gomes Alves e Rozeni dos Santos Alves (Wanderson), por todo o sacrifício e confiança que nos fizeram chegar até aqui.

Agradecemos também ao nosso Professor e Orientador, Dr. Geraldo Rossoni Sisquini tutor do PET, pela oportunidade, por todos os ensinamentos e por sua disponibilidade que foram de fundamental importância em nosso aprendizado e no desenvolvimento deste trabalho.

A professora Carmen Faria Santos pela disponibilidade e conselhos que nos permitiram realizar este trabalho.

Ainda aos amigos e companheiros de curso, especialmente as integrantes do BAJA pela presteza que foi de fundamental importância para realizarmos este trabalho, pois sem eles as dificuldades seriam enormes devido à necessidade de um conhecimento minucioso do protótipo BAJA, objeto de nosso estudo.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma participaram desta etapa de nossas vidas, mesmo que porventura, sequer notaram que contribuíram.

## RESUMO

A maioria das forças existentes no plano horizontal em um carro são originadas nos pneus devido às forças de atrito. Além disso, os pneus são as fontes primárias das forças e torques que proporcionam controle e estabilidade do veículo. As poucas áreas onde os pneus tocam a superfície da pista são a chave de tudo que o acontece nos testes e simulações. Estas pequenas áreas são conhecidas como "área de contato". Forças aplicadas durante as curvas e forças de frenagem são transmitidas a todas as quatro áreas de contato, podendo alterar a estabilidade do veículo durante a execução da curva. Por isso a necessidade de se conhecer os fenômenos que ocorrem nos pneus durante uma curva.

Em velocidades bem abaixo do limite de curva, o pneu se move pela pista na mesma direção imposta pelo esterçamento do volante. Porém, quando as velocidades de curva aumentam e a pressão lateral sobre o pneu é ampliada, a área do pneu em contato com a pista é ligeiramente deformada, como um elástico. Isso faz com que o resto do pneu e o veículo em geral, movam-se ligeiramente "de lado", na direção externa da curva, traçando uma curva com um raio maior do que aquela traçada pelo esterçamento do volante. O presente trabalho propõe-se a realizar estudos que viabilizem a execução do teste de Skidpad, para auxiliar a equipe do BAJA a promover melhorias no protótipo BAJA, pois as informações obtidas com o Skidpad fornecem valores que, auxiliam na compreensão do comportamento do veículo em trajetórias curvilíneas.

**Palavras-Chave:** Forças de atrito, estabilidade do veículo, áreas de contato dos pneus, protótipo BAJA, teste de Skid Pad e trajetórias curvilíneas.

## ABSTRACT

Most existing forces in the horizontal plane in a car tire are caused due to the friction forces. Moreover, the tires are the primary sources of the forces and torques which provide control and stability of the vehicle. The few areas where the tires touch the track surface are the key to everything that happens in tests and simulations. These small areas are known as "contact area". Forces applied during cornering and braking forces are transmitted to all four contact areas, altering the stability of the vehicle during the execution of the curve. Hence the need to know the phenomena that occurs in the tires during a turn.

At speeds well below the curve, the tire moves around the track in the same direction imposed by the steering wheel. But when speeds increase curve and lateral pressure on the tire is enlarged, the areas of the tires in contact with the track are slightly deformed, like a rubber band. This causes the rest of the vehicle tire and in general, move sideways slightly "", towards the outside of the curve, plotting a curve having a radius greater than that drawn by steering the wheel. This paper proposes to conduct studies that allow the execution of test skid pad, to assist staff BAJA in making improvements BAJA prototype because the information obtained from the skid pad provide values that help in understanding the behavior of the vehicle in curvilinear trajectories.

.

**Keywords:** Friction forces, vehicle stability, tire contact areas, BAJA prototype, test skid pad and curvilinear trajectories.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Representação do ângulo de esterçamento das rodas dianteiras.....	17
Figura 2 - Geometria de Ackerman. ....	17
Figura 3 – Representação do comportamento de um veículo realizando uma curva em alta velocidade. ....	18
Figura 4 –Gráfico que correlaciona a força lateral desenvolvida com o ângulo de escorregamento nos pneus .....	19
Figura 5 - Variáveis que afetam a rigidez de esterço do pneu. ....	20
Figura 6 - Representação do pneu e de seus componentes. ....	21
Figura 7 - Esquema de pneu radial e diagonal, à esquerda e à direita, respectivamente .....	23
Figura 8 - Esterçamento de um modelo de bicicleta.....	24
Figura 9 - Mudança do ângulo de esterçamento com velocidades .....	27
Figura 10 - Ganhos da velocidade de guinada como função da velocidade.....	30
Figura 11 - Ângulo de escorregamento lateral em uma curva de baixa velocidade .....	31
Figura 12 - Ângulo de escorregamento lateral em uma curva de alta velocidade.....	31
Figura 13 - Linha de esterçamento neutro em um veículo .....	32
Figura 14 - Exemplo de medição de gradiente de subesterçamento pelo método do raio constante.	34
Figura 15 - Exemplo de medição de gradiente de subesterçamento pelo método de velocidade .....	37
Figura 16 - Estacionamento próximo ao terminal de laranjeiras na Serra-ES, a presença de poças após o dia chuvoso denuncia irregularidades e presença de buracos na pavimentação, também é visível a presença de vegetação.....	51
Figura 17 - Estacionamento do Shopping Vitória na Enseada do Suá. Devido a presença de inclinação no terreno, e dos objetos utilizados para facilitação do estacionamento, a realização do teste é inviável neste local. ....	52
Figura 18 - Layout gráfico do painel do protótipo.....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - condições de execução para o teste em estado estacionário.....	38
Tabela 2 - variáveis, seus intervalos de operação típicas e erros máximos .....	40
Tabela 3 - velocidades para um raio de 30 m e incremento de 0,1 g de aceleração lateral.....	54

## Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1 Motivação.....	14
1.2 Objetivos.....	14
<b>2 HISTÓRICO .....</b>	<b>15</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
3.1 Curvas em baixas velocidades .....	16
3.2 Curvas em altas velocidades .....	18
3.3 Forças laterais dos pneus .....	19
3.3.1 Pneus E Seus Componentes .....	21
3.3.1.1 Carcaça .....	22
3.3.1.2 Talões.....	22
3.3.1.3 Banda de rodagem .....	22
3.3.1.4 Flancos.....	22
3.3.2 Principais tipos de pneus.....	22
3.3.2.1 Pneus diagonais.....	22
3.3.2.2 Pneu radial.....	23
3.4 Equações de Esterçamento .....	23
3.4.1 Gradiente de subesterçamento.....	25
3.4.1.1 Esterçamento Neutro .....	25
3.4.1.2 Subesterçamento .....	26
3.4.1.3 Sobre-esterçamento.....	26
3.5 Velocidade característica .....	27
3.6 Velocidade crítica .....	28
3.7 Ganho de aceleração .....	28
3.8 Ganho na velocidade de guinada .....	29
3.9 Ângulo de escorregamento lateral.....	30
3.10 Margem estática.....	32
<b>4 O TESTE DE SKIDPAD .....</b>	<b>33</b>
4.1 Medição experimental do gradiente de subesterçamento (Gillespie,1992).....	33
4.1.1 Método do raio constante.....	33
4.1.2 Método da velocidade constante.....	36
4.2 Condições de execução pela norma ISO 4138:2012 .....	37
4.2.1 Equivalência entre os métodos de teste .....	37

4.2.2 Variáveis do teste de Skid Pad.....	39
4.2.2.1 Sistema de Referência .....	39
4.2.2.2 Medição.....	39
4.2.3 Equipamento de medição .....	39
4.2.3.1 Descrição .....	39
4.2.3.2 Instalação dos transdutores :.....	40
4.2.3.3 Processamento dos dados :.....	40
4.2.3.4 Condições do Teste : .....	40
4.2.4 Procedimento do teste.....	41
4.2.4.1 Método do raio constante.....	41
4.2.4.2 Procedimento .....	41
4.2.4.3 Velocidades de teste discretas .....	42
4.2.4.4 Aumento de velocidade contínua .....	42
4.2.5 Método ângulo de volante constante .....	42
4.2.5.1 Descrição .....	42
4.2.5.1 Procedimento .....	42
4.2.5.2 Velocidade de teste discreta .....	43
4.2.5.3 Aumento de velocidade contínua .....	43
4.2.6 Método da velocidade constante.....	43
4.2.6.1 Descrição .....	43
4.2.6.2 Procedimento .....	44
4.2.6.3 Método controlando raio de curva .....	44
4.2.6.4 Método controlando ângulo do volante .....	44
4.2.7 Análise dos dados .....	44
4.2.8 Aceleração lateral.....	45
4.2.9 Raio da curva .....	45
4.2.10 Validação dos dados e apresentação dos resultados.....	45
4.2.11 Plotagem de resultados.....	46
4.2.12 Avaliação dos valores característicos .....	46
4.2.13 Avaliação dos gradientes - Diferenciação.....	46
4.2.13.1 Gradiente de ângulo do volante.....	46
4.2.13.2 Gradiente de curvatura de trajetória .....	46
4.2.13.3 Gradiente do ângulo de escorregamento .....	47
4.2.13.4 Gradiente de ângulo de escorregamento/ volante.....	47

4.3 Normatização de resultados - Comparação dos resultados em diferentes veículos .....	47
4.3.1 Normatização com respeito à relação de esterçamento .....	48
4.3.2 Gradiente de subesterçamento.....	48
4.3.3 Gradiente de subesterçamento/ escorregamento.....	49
<b>5 ESTUDO DE VIABILIDADE DE EXECUÇÃO DO TESTE DE SKID PAD .....</b>	<b>49</b>
5.1 Etapas de Execução do teste .....	49
5.2 Escolha dos métodos .....	49
5.3 Variáveis a serem escolhidas.....	50
5.4 Seleção da pista para execução do teste de skid pad .....	50
5.5 Dificuldades encontradas para executar os testes.....	51
5.5.1 Local para execução dos testes .....	51
5.6 Sistema de aquisição de dados .....	52
5.7 O Protótipo .....	53
5.7.1 Aceleração lateral x velocidade máxima .....	53
5.7.2 Sistema de direção .....	54
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>55</b>
<b>7 REFENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>	<b>56</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Motivação

Um critério importante na hora de avaliarmos um automóvel é seu comportamento durante uma curva, ou seja, um automóvel possui boa estabilidade quando consegue fazer uma curva a uma velocidade relativamente alta sem que “rode na pista”. A essa característica damos o nome de dirigibilidade, um termo comumente usado nos dias de hoje para avaliar o desempenho de um automóvel ao realizar uma curva. Em outras palavras a dirigibilidade designa a capacidade de resposta que um veículo possui à entrada imposta pelo seu condutor, ou a facilidade de controle do veículo. Por isso o conhecimento de como o veículo irá se comportar ao realizar uma curva é de fundamental importância, e pode fazer a diferença em uma competição.

### 1.2 Objetivos

Realizar um estudo que viabilize a aplicação do teste de skidpad no protótipo BAJA, para que com os resultados obtidos com o teste, a equipe possa trabalhar no aperfeiçoamento do protótipo para futuras competições.

## 2 HISTÓRICO

O projeto Baja SAE foi criado na Universidade da Carolina do Sul, Estados Unidos, sob a direção do Dr. John F. Stevens, sendo que a primeira competição ocorreu em 1976. No Brasil, a competição foi realizada pela primeira vez em 1995 e desde então tem crescido gradativamente, tornando-se uma das mais importantes atividades extracurriculares para estudantes de engenharia.

Competem Instituições de Ensino Superior que têm seus estudantes de engenharia desafiados por meio da simulação de um caso real de desenvolvimento de projeto, com todas as atividades que envolvem o mesmo, visando a aplicação prática dos conhecimentos adquiridos em sala de aula.

O objetivo de cada equipe é projetar e construir um protótipo recreativo, fora de estrada (offroad), monoposto, robusto, visando sua comercialização ao público entusiasta e não profissional. O veículo deve ser seguro, facilmente transportado e de simples manutenção e operação. Deve ser capaz de vencer terrenos acidentados em qualquer condição climática sem apresentar danos.

Cada equipe compete para ter seu projeto aceito por um fabricante fictício. Para isso, os alunos devem trabalhar em equipe para projetar, construir, testar, promover e competir com um veículo que respeite as regras impostas além de conseguir suporte financeiro para o projeto. Tudo deve ser feito respeitando sempre as prioridades acadêmicas.

Todos os carros têm o mesmo motor, regulado de acordo com as normas da SAE, igualando todas as equipes e restando a cada equipe desenvolver o tipo de transmissão a ser utilizada, os freios, a suspensão, a direção entre outros dispositivos necessários para um veículo Baja.

Iniciada por alunos de Engenharia Mecânica, hoje a equipe é formada por alunos da Engenharia Mecânica, Elétrica e Computação da UFES. A Equipe Vitória Baja possui integrantes que estão começando o curso de graduação e também aqueles que estão finalizando, passando aos novos membros da equipe todo conhecimento de Baja que adquiriram durante sua permanência no projeto. Composta por 16 membros, no desenvolver do protótipos a equipe se divide em duas, com 8 alunos para cada carro.

Para ser integrante da Equipe Vitória Baja, não é necessário ter experiência em alguma área automobilística, ou estar cursando algum período como pré-requisito. O importante é que este futuro membro esteja disposto a enfrentar desafios que lhe serão muito úteis durante sua futura vida como engenheiro.

Nos seus 15 anos de existência, muitos alunos já passaram pela equipe e sempre retornam para saber como a mesma está, trazendo conselhos e informações para que os atuais membros empreguem no projeto de modo a engrandecê-lo.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os conceitos necessários para realizar o teste de skidpad. Primeiramente a abordagem é analisar o comportamento em curvas a baixas velocidades, e posteriormente considerar as diferenças que surgem para curvas em altas velocidades. As propriedades dos pneus serão de extrema importância em curvas em altas velocidades, e irão influenciar no comportamento do veículo durante a curva.

#### 3.1 Curvas em baixas velocidades

Ao realizar um estudo dinâmico de um veículo automotor durante uma curva, o primeiro passo é analisar esse veículo executando curvas em baixas velocidades. Como numa manobra de estacionamento aonde os pneus não sofrem deformação, pois em baixas velocidades os pneus não desenvolvem forças laterais. Os pneus devem fazer a curva de raio idêntico ao raio de esterçamento (raio traçado seguindo os comandos do volante). Como as rodas traseiras não tem ângulo de deformação, o centro da curva deve coincidir com a projeção prolongada do eixo das rodas traseiras. Da mesma forma ao traçarmos uma linha perpendicular às rodas dianteiras elas devem se cruzar no mesmo ponto, ou seja, no centro da curva por onde também passa a linha de projeção das rodas traseiras. Caso isso não aconteça, durante a curva cada roda terá um ângulo de escorregamento dificultando a realização da mesma.

Assumindo que existam pequenos ângulos (o ângulo tem valor aproximado ao valor de sua tangente), podemos considerar os ângulos de esterçamento, de acordo com as equações 1 e 2:

$$\delta_o \cong \frac{L}{R + \frac{t}{2}} \quad (1)$$

$$\delta_i \cong \frac{L}{R - \frac{t}{2}} \quad (2)$$

Os ângulos médios de esterçamento, equação (3), ideais para as rodas dianteiras podem ser estabelecidos a partir da geometria de Ackerman:

$$\delta = \frac{L}{R} \quad (3)$$

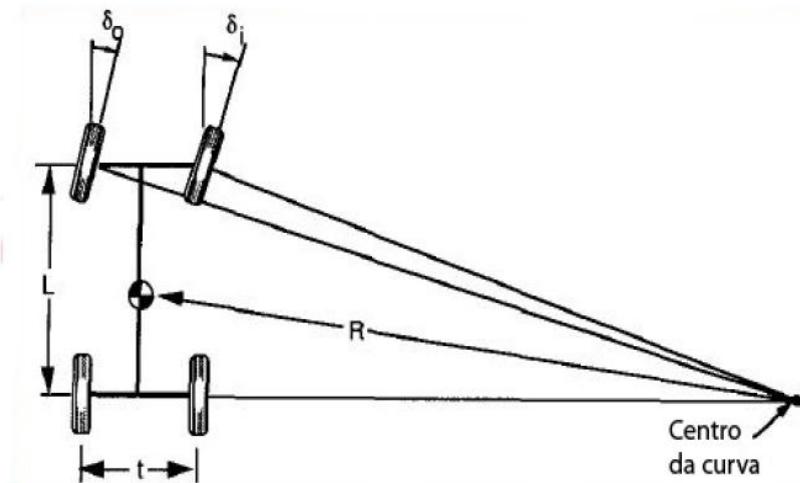


Figura 1- Representação do ângulo de esterçamento das rodas dianteiras. Fonte: (GILLESPIE, 1992).

Esterçamento de Ackerman ou geometria de Ackerman são comumente utilizados para se estabelecer a geometria das rodas dianteiras. Na figura 2 podemos observar o centro próprio de viragem do veículo (bola amarela), ilustrando a Geometria de Ackerman.

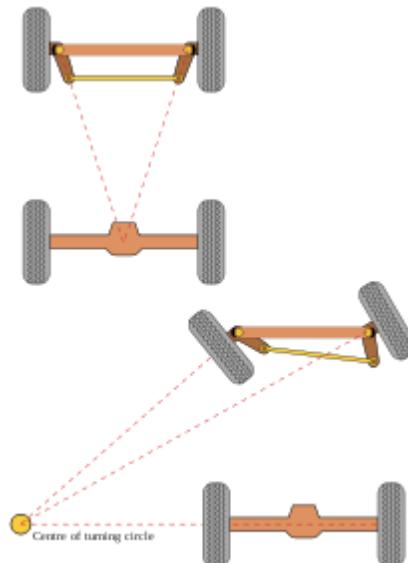


Figura 2 - Geometria de Ackerman. Fonte: (WIKIPEDIA, Disponível em : < [http://pt.wikipedia.org/wiki/Geometria\\_de\\_Ackermann](http://pt.wikipedia.org/wiki/Geometria_de_Ackermann) >, acesso em: 23 de mar. 2013).

Um outro aspecto que deve ser lembrado é o deslocamento das rodas traseiras ao realizar uma curva em baixa velocidade, o deslocamento de trajetória pode ser calculado pela equação (4):

$$\Delta = R \left[ 1 - \cos \left( \frac{L}{R} \right) \right] \quad (4)$$

O deslocamento da trajetória é uma preocupação dos veículos com grandes distâncias entre eixos, como ônibus e caminhões.

### 3.2 Curvas em altas velocidades

Quando um veículo realiza curvas em alta velocidade as equações diferem das equações citadas acima, pois em alta velocidade irá aparecer a aceleração lateral. Para contrapor a aceleração lateral o pneu é obrigado a desenvolver forças laterais para promover o equilíbrio, e na presença dessas forças também haverá deformação nos pneus que por consequência desenvolve o chamado ângulo de escorregamento em cada uma das rodas, fazendo com que haja diferenças entre curva descrita pelo esterçamento do volante e a curva desenvolvida pelos pneus.

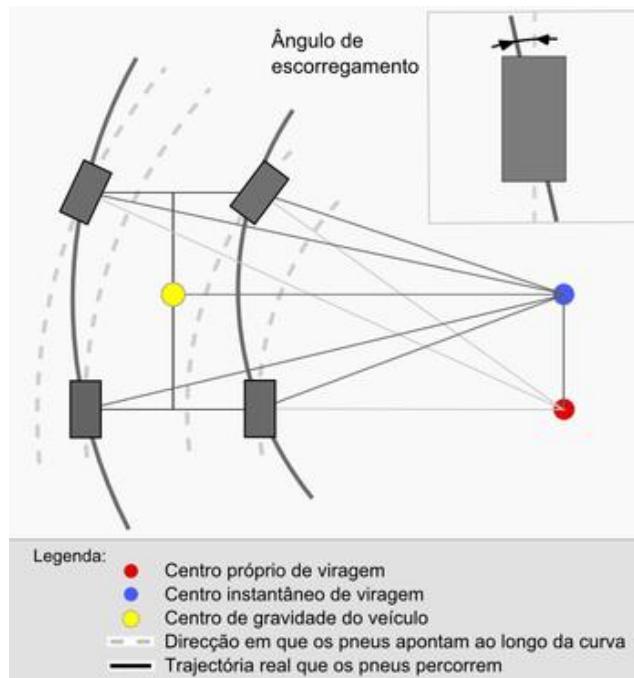


Figura 3 – Representação do comportamento de um veículo realizando uma curva em alta velocidade. Fonte: (WIKIPEDIA, disponível em : <[http://pt.wikipedia.org/wiki/%C3%82ngulo\\_de\\_escorregamento](http://pt.wikipedia.org/wiki/%C3%82ngulo_de_escorregamento)>, acesso em: 23 de mar. 2013).

### 3.3 Forças laterais dos pneus

Durante a execução de uma curva o pneu desenvolve forças laterais, que fazem com que os pneus escorreguem enquanto rolam, ver figura 4. O ângulo entre a trajetória feita pelo pneu e a trajetória que o veículo deveria fazer segundo o esterçamento do volante, chama-se ângulo de escorregamento.

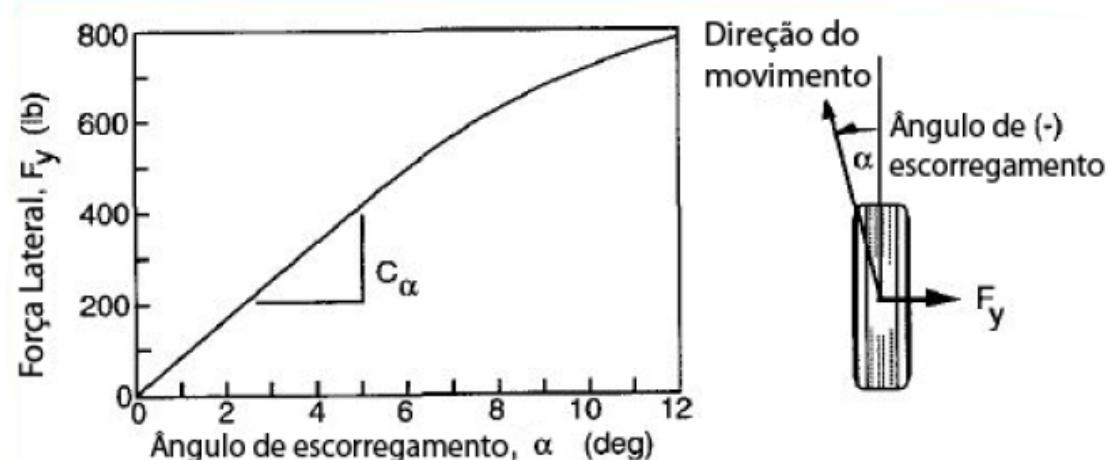


Figura 4 –Gráfico que correlaciona a força lateral desenvolvida com o ângulo de escorregamento nos pneus. Fonte: (GILLESPIE, 1992).

A força lateral representada por  $F_y$  é chamada de força de esterçamento quando o ângulo de cambagem é zero. Quando se tem um determinado carregamento sobre o pneu, a força de esterço aumenta com o ângulo de escorregamento. Podemos ver no gráfico representado pela figura 4, que para ângulos menores que 5 graus essa relação de torna linear. Logo a força de esterçamento é descrita pela equação (5):

$$F_y = C_\alpha \cdot \alpha \quad (5)$$

Onde  $C_\alpha$  é denominada como constante de proporcionalidade, conhecida como rigidez de esterço. A constante de proporcionalidade pode ser definida como a inclinação da curva  $F_y$  versus  $\alpha$ , quando  $\alpha=0$ .

A rigidez de esterço depende de muitas variáveis como: tamanho e tipo de pneu utilizado (construção das linhas diagonais ou radiais), número de lonas, ângulos do tecido, largura das rodas e banda de rodagem. A carga sobre os pneus e pressão de inflação (calibragem do pneu) são as variáveis de maior influência. A velocidade não exerce influencia significativa nas forças de esterçamento produzidas nos pneus. Os gráficos na figura 5 demonstram as influências dessas variáveis.

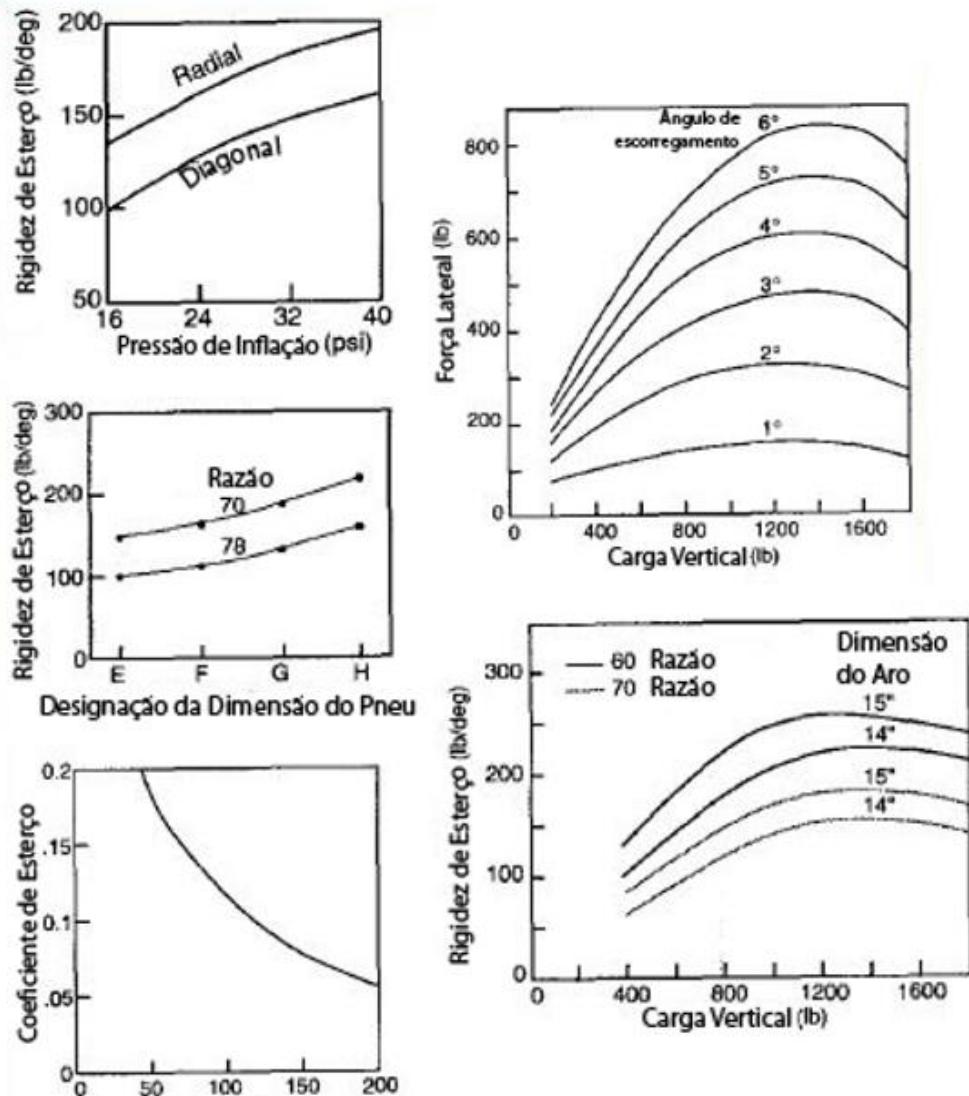


Figura 5 - Variáveis que afetam a rigidez de esterço do pneu. Fonte: (GILLESPIE, 1992).

Devido a grande dependência da força de esterço com a carga sobre os pneus, as propriedades de esterço podem ser descritas como coeficiente de esterço, que nada mais é do que a rigidez de esterço dividida pela carga sobre os pneus. Dessa forma o coeficiente de esterço  $CC_\alpha$  é dado pela equação (6):

$$CC_\alpha = C_\alpha / F_z \quad (6)$$

Como podemos constatar com a fórmula acima o coeficiente de esterço geralmente é maior em cargas leves e vai diminuindo de acordo com aumento da carga. Quando a carga nominal é alcançada o coeficiente de esterço fica na faixa 0.89N de força de esterço por grau de ângulo de escorregamento.

### 3.3.1 Pneus E Seus Componentes

O pneu tem como função suportar a carga exercida pelo veículo, assegurar a transmissão da potência motriz, garantir a dirigibilidade do veículo, oferecer respostas eficientes nas freadas e aceleradas, e contribuir com a suspensão do veículo no conforto.

Para que o pneu possa garantir essas funções é necessário que em sua construção estejam presentes os seguintes elementos : carcaça, talões, cinturas, banda de rodagem e flancos, como mostra a figura 6.

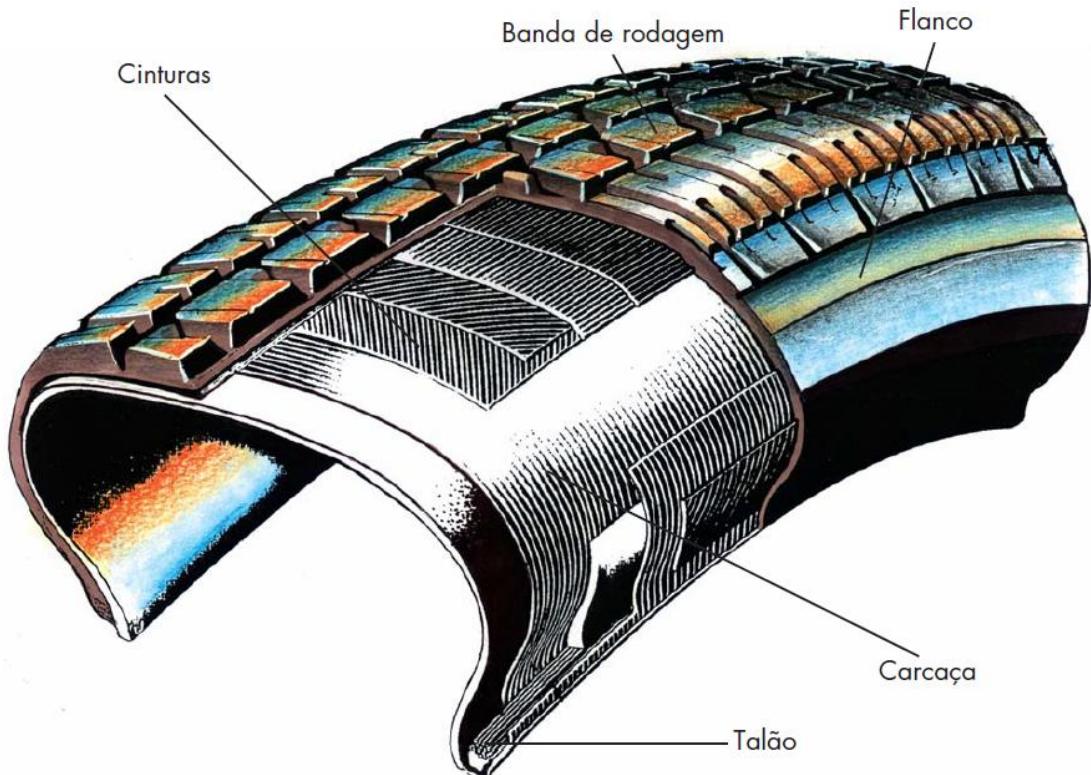


Figura 6 - Representação do pneu e de seus componentes. Fonte : (FIAT, GROUP. Apostila de Rodas e Pneus, 2008).

### ***3.3.1.1 Carcaça***

É a parte resistente do pneu, constituída de lona(s) de poliéster, nylon ou aço. Retém o ar sob pressão que suporta o peso total do veículo. Nos pneus radiais as cinturas complementam sua resistência.

### ***3.3.1.2 Talões***

São constituídos internamente de arames de aço de grande resistência e têm a finalidade de manter o pneu acoplado ao aro.

### ***3.3.1.3 Banda de rodagem***

É a parte do pneu que entra diretamente em contato com o solo. É formada por um composto especial de borracha que oferece grande resistência ao desgaste. Seus desenhos constituídos por partes cheias (biscoitos) e partes vazias (sulcos) oferecem desempenho e segurança ao veículo.

### ***3.3.1.4 Flancos***

Protegem a carcaça de lonas. São dotados de uma mistura especial de borracha com alto grau de flexibilidade.

## **3.3.2 Principais tipos de pneus**

### ***3.3.2.1 Pneus diagonais***

O pneu é chamado diagonal ou convencional quando a carcaça é composta de lonas sobrepostas e cruzadas umas em relação às outras, como visto na figura 7. Os cordonéis que compõem essas lonas são fibras têxteis. Neste tipo de construção, os flancos são solidários à banda de rodagem. Quando o pneu roda, cada flexão dos flancos é transmitida à banda de rodagem, conformando-a ao solo. Sendo mais aplicado para veículos off Road.

### 3.3.2.2 Pneu radial

No pneu radial, a carcaça é constituída de uma ou mais lonas, cujos cordonéis estão paralelos e no sentido radial, também representado na figura 7. Esta estrutura é estabilizada pelas cinturas sob a banda de rodagem. Por ser uma carcaça única, não existe fricção entre lonas - apenas flexão - o que evita a elevação da temperatura interna do pneu. Sendo melhor aplicado para veículos on Road.

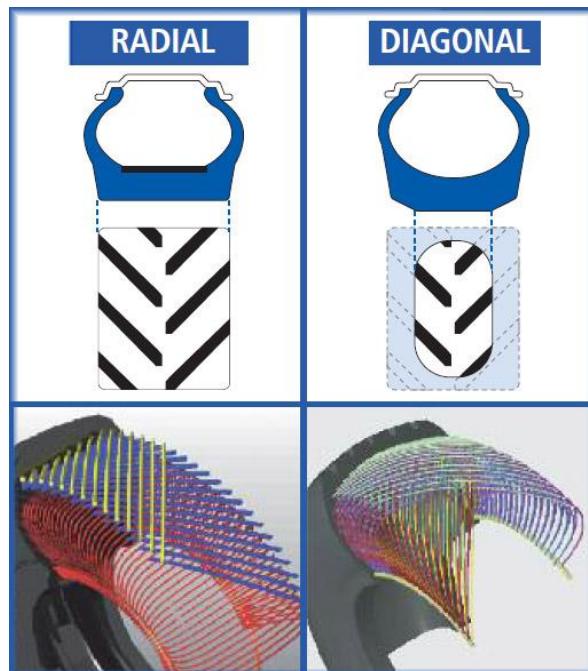


Figura 7 - Esquema de pneu radial e diagonal, à esquerda e à direita, respectivamente. Fonte : (FIAT, GROUP. Apostila de Rodas e Pneus, 2008).

## 3.4 Equações de Esterçamento

Para obtermos as equações de esterçamento, vamos aplicar a segunda lei de Newton juntamente com a equação que descreve a geometria da curva, que foi alterada devido ao ângulo de escorregamento (*slip angle*) dos pneus. Para facilitar nossa análise é conveniente representar o veículo pelo modelo de uma bicicleta (figura 8). Tal aproximação é válida pois, como o raio da curva efetuada pelo veículo é muito maior que a distância entre eixos, a diferença entre os ângulos de escorregamento da roda externa e interna do veículo é bem pequena, de forma que

é razoável a hipótese deles serem iguais. Essa hipótese também é válida para as rodas traseiras.

Vamos aplicar a segunda lei de Newton para um veículo se deslocando para frente com uma velocidade  $v$ . Sabemos que a soma das forças laterais desenvolvidas pelos pneus deverá ser igual a massa do veículo multiplicada pela aceleração centrípeta. Daí temos:

$$\sum F_y = F_{yf} + F_{yr} = M \cdot V^2 / R \quad (7)$$

Onde:

$F_{yf}$  = Força lateral no eixo dianteiro (esterçamento)

$F_{yr}$  = Força lateral no eixo traseiro (esterçamento)

$M$  = Massa do veículo

$V$  = Velocidade à frente

$R$  = Raio da curva

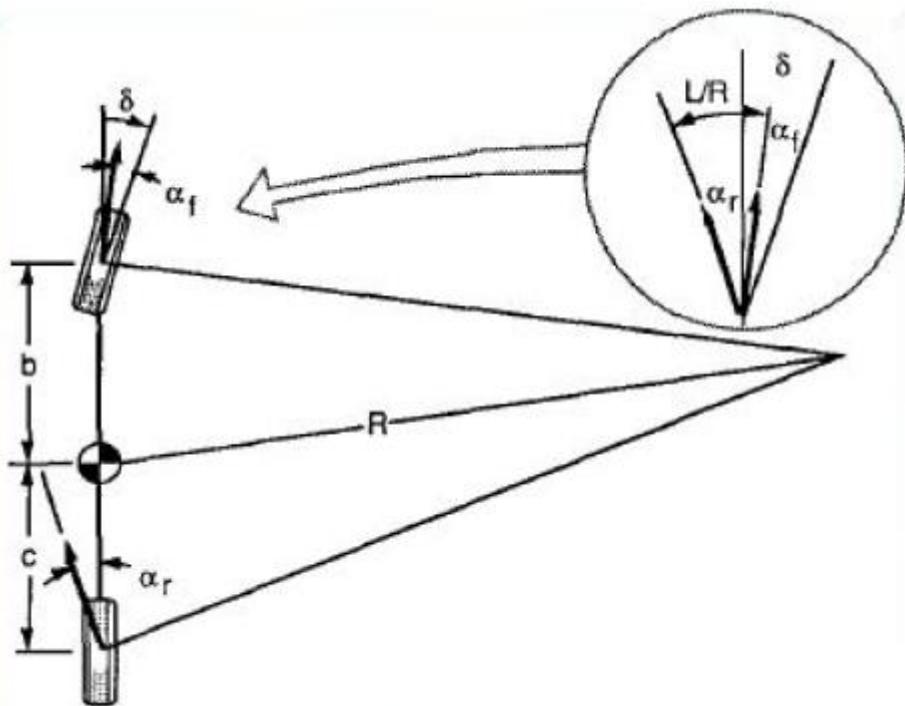


Figura 8 - Esterçamento de um modelo de bicicleta. Fonte: (GILLESPIE, 1992).

Para manter o equilíbrio do veículo em torno do centro de gravidade, a resultante dos momentos das forças laterais, dianteira e traseira, deve ser igual a zero.

### 3.4.1 Gradiente de subesterçamento

A equação reduzida é comumente escrita da seguinte forma:

$$\delta = 57,3L/R + Ka_y \quad (8)$$

Onde :

K= Gradiente de subesterçamento;

$ay$ = aceleração lateral

A equação (8) é de extrema importância, pois a partir dela que podemos saber o comportamento do veículo durante a curva, ou seja, essa equação descreve como o ângulo de esterçamento do veículo deve ser modificado com o raio da curva (R), e a aceleração lateral  $V^2/g \cdot R$ . A expressão  $[ (W_f/C_{af} - W_r/C_{ar}) ]$  determina a magnitude e a direção das entradas de direção requeridas. Esses dois termos existentes são as cargas sobre cada eixo, o dianteiro e o traseiro à rigidez de esterço dos pneus no eixo, a mesma é chamada de gradiente de subesterçamento, sendo representada pela letra K.

Podemos ter as seguintes possibilidades para esse gradiente:

#### 3.4.1.1 Esterçamento Neutro

$$\frac{W_f}{C_{af}} = \frac{W_r}{C_{ar}} \rightarrow K = 0 \rightarrow \alpha_f = \alpha_r \quad (9)$$

Em uma curva com raio constante, ao se aumentar a velocidade nenhuma alteração será requerida no ângulo de esterçamento. Nesse caso o ângulo de esterçamento será idêntico ao ângulo de Ackerman, 57,3 L/R. Uma definição mais física do esterçamento neutro é que ocorre o equilíbrio no veículo de modo que a “força” de aceleração no Centro de Gravidade (CG) causa um aumento idêntico no ângulo de escorregamento nas rodas dianteiras e traseiras.

### 3.4.1.2 Subesterçamento

$$\frac{w_f}{c_{af}} > \frac{w_r}{c_{ar}} \rightarrow K > 0 \rightarrow \alpha_f > \alpha_r \quad (10)$$

Em uma curva de raio constante o ângulo de esterçamento deve aumentar proporcionalmente a  $K$ (graus/g) vezes a aceleração lateral em g. Dessa forma o ângulo aumenta linearmente com a aceleração lateral e o quadrado da velocidade. No caso do subesterçamento a aceleração lateral do CG causa nas rodas dianteiras um escorregamento lateral maior do que nas rodas traseiras. Logo para desenvolver a força lateral suficiente nas rodas dianteiras e manter o raio da curva constante, o ângulo de esterçamento das rodas dianteiras deve ser maior. Caso isso não ocorra o veículo irá rodar na pista, ou como se diz na linguagem popular “perderá a frente”.

### 3.4.1.3 Sobre-esterçamento

$$\frac{w_f}{c_{af}} < \frac{w_r}{c_{ar}} \rightarrow K < 0 \rightarrow \alpha_f < \alpha_r \quad (11)$$

Ao realizar uma curva de raio constante o ângulo de esterçamento deverá diminuir de acordo com o aumento da velocidade e consequentemente da aceleração lateral. No sobre-esterçamento a aceleração lateral no CG causa um aumento do ângulo de escorregamento das rodas traseiras maior que as da roda dianteira, mas nesse caso o ângulo de escorregamento é para dentro da curva fazendo com que o raio da curva diminua. O aumento da aceleração faz com que esse processo continue a menos que o ângulo de esterçamento seja reduzido, ou seja, que o condutor do veículo gire o volante para manter o raio da curva.

A forma como o ângulo de esterçamento muda com a velocidade numa curva de raio constante pra cada um dos casos citados acima é ilustrado na figura 9.

Com o veículo de esterçamento neutro, o ângulo de esterçamento para manter a curva a qualquer velocidade é simplesmente o ângulo de Ackerman. Com o subesterçamento o ângulo aumenta com o quadrado da velocidade alcançando o dobro do ângulo inicial na velocidade característica. Já no caso do sobre-esterçamento o ângulo de esterçamento diminui com o quadrado da velocidade e chega a zero no valor da velocidade crítica.

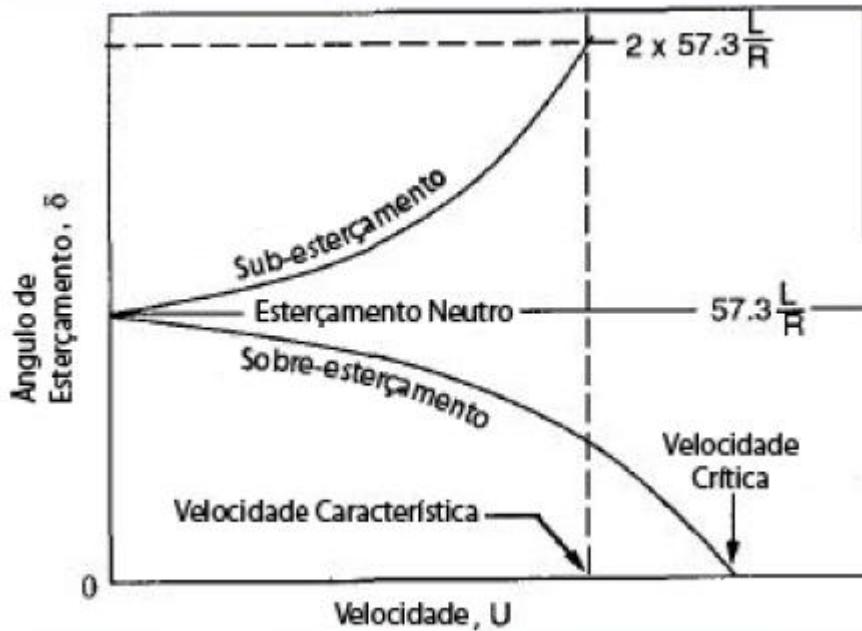


Figura 9 - Mudança do ângulo de esterçamento com velocidades. Fonte: (GILLESPIE, 1992).

### 3.5 Velocidade característica

Quando tivermos um veículo com características subesterçante, seu nível de subesterçamento pode ser quantificado utilizando um parâmetro conhecido como velocidade característica [Bundorf, 1967]. A velocidade característica é simplesmente a velocidade na qual o ângulo necessário para percorrer qualquer curva é o dobro do ângulo de Ackerman. Isso pode ser visto na equação que descreve o gradiente de subesterçamento. Logo temos :

$$Ka_y = 57,3L/R \quad (12)$$

Sendo  $ay$  função do quadrado da velocidade, podemos descrever a velocidade característica como:

$$V_{char} = \sqrt{57,3L \cdot \frac{g}{K}} \quad (13)$$

### 3.6 Velocidade crítica

Quando temos o sobre-esterçamento irá existir uma velocidade na qual qualquer velocidade maior que ela fará com que o veículo fique instável, essa velocidade é denominada velocidade crítica, sendo descrita da seguinte forma:

$$V_{crit} = \sqrt{57,3L \cdot \frac{g}{K}} \quad (14)$$

É importante lembrar que o valor de K é negativo, para que a expressão que descreve a velocidade crítica tenha um valor real.

Podemos notar que a velocidade crítica é dependente da distância entre eixos, dessa forma, para um determinado nível de sobre-esterçamento veículos com uma maior distância entre eixos possuem uma velocidade crítica mais alta do que veículos com distância entre eixos menores. Um veículo com sobre-esterçamento pode ser dirigido com velocidades inferiores a velocidade crítica, porém ao se ultrapassar o valor da velocidade crítica o veículo se torna muito instável direcionalmente.

### 3.7 Ganho de aceleração

Quando esterçamos um veículo o propósito é produzirmos uma aceleração lateral que seja capaz de direcionar o veículo na direção que queremos. Desta forma a equação de esterçamento pode ser utilizada para examinarmos esse desempenho. A eq. 16 pode ser resolvida para a razão de aceleração lateral  $a_y$ , ao ângulo de escorregamento,  $\delta$ . O resultado obtido é o ganho de aceleração lateral, e é dado por:

$$\frac{a_y}{\delta} = \frac{\frac{v^2}{57,3L \cdot g}}{1 + \frac{Kv^2}{(57,3L \cdot g)}} \left( \frac{\text{deg}}{\text{sec}} \right) \quad (15)$$

Note que quando o valor de K for zero (caso do esterçamento neutro), é determinado apenas pelo numerador da expressão e diretamente proporcional ao

quadrado da velocidade. Quando o valor de K é positivo (subesterçamento) o ganho é reduzido por causa do segundo termo do denominador e é sempre menor que o de um veículo de esterçamento neutro.

Por fim, quando o valor de K é negativo (caso de sobre-esterçamento), o segundo termo do denominador fará com que o denominador diminua fazendo o ganho ser maior.

### 3.8 Ganho na velocidade de guinada

O outro motivo pelo qual esterçamos o veículo é mudarmos o ângulo de direção, para isso precisamos desenvolver uma velocidade de guinada (mudança de direção do veículo), que também pode ser chamada de “razão de guinada”. A velocidade de guinada,  $r$ , é a taxa de rotação do ângulo de direção e é dada por:

$$r = 57,3 \frac{V}{R} \quad \left( \frac{\text{deg}}{\text{sec}} \right) \quad (16)$$

Substituindo essa expressão na equação do gradiente de subesterçamento, e resolvendo para a razão de velocidade de guinada pelo ângulo de esterçamento, temos:

$$\frac{r}{\delta} = \frac{\frac{V}{L}}{1 + \frac{K \cdot V^2}{(57,3 L \cdot g)}} \quad (17)$$

A razão representa um “ganho”, o qual é proporcional a velocidade quando se trata de um veículo com esterçamento neutro. Já no caso de um veículo sobre-esterçante o ganho da velocidade de guinada se torna infinito, quando o mesmo atinge sua velocidade crítica de acordo com a equação (14). E por fim quando o veículo em questão for subesterçante a velocidade de guinada aumenta com a velocidade característica e em seguida começa a diminuir. Dessa forma a velocidade característica representa a velocidade na qual o veículo apresenta a maior resposta em guinada.

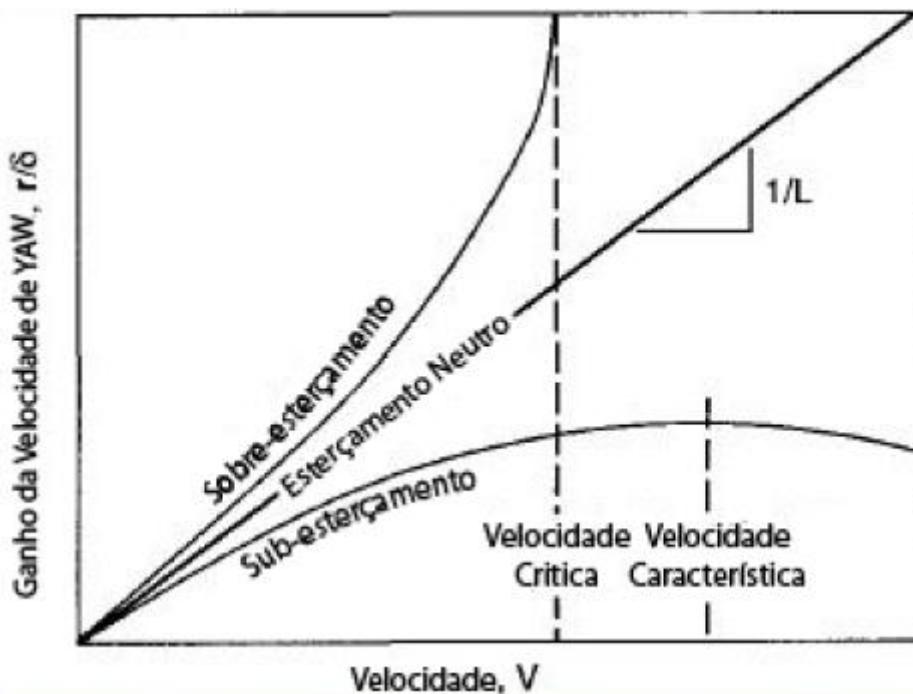


Figura 10 - Ganho de velocidade de guinada como função da velocidade. Fonte: (GILLESPIE, 1992).

### 3.9 Ângulo de escorregamento lateral

Quando se trata do comportamento de um veículo em curva fica evidente que quando a aceleração lateral é desprezível, a roda traseira faz o mesmo trajeto da roda dianteira, porém internamente ao traçado feito pela roda dianteira. Mas conforme a aceleração lateral aumenta, a traseira deve derivar para fora, com o objetivo de desenvolver os ângulos de escorregamento necessários nos pneus traseiros. O ângulo de escorregamento pode ser definido para um veículo como sendo o ângulo entre o eixo longitudinal e a direção do movimento local. Em geral um veículo efetuando uma curva terá diferentes ângulos de escorregamento durante a execução de uma mesma curva.

Tomemos o centro de gravidade como referencial. O ângulo de escorregamento lateral é definido conforme mostrado na figura (11). Definiremos o ângulo de escorregamento como sendo positivo, pois o sentido do movimento do vetor que representa a velocidade local está no sentido horário a partir do eixo longitudinal (segundo a SAE ângulos observados por cima que estão no sentido horário são ângulos positivos).

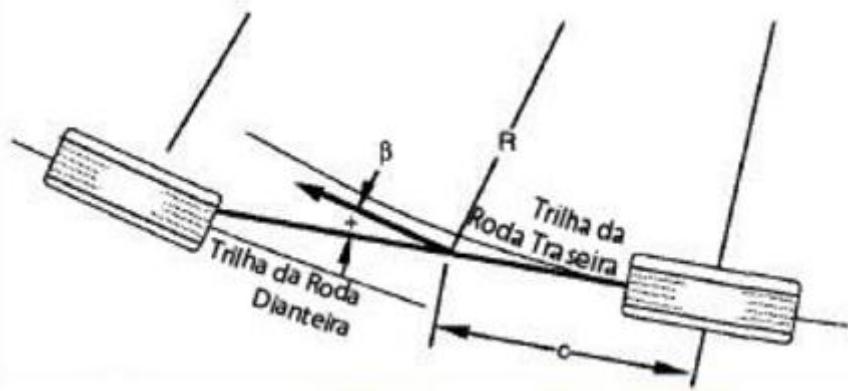


Figura 11 - Ângulo de escorregamento lateral em uma curva de baixa velocidade. Fonte: (GILLESPIE, 1992).

Quando o veículo está em alta velocidade o ângulo de escorregamento das rodas traseiras impõe que o ângulo de escorregimento lateral no CG se torne negativo, como podemos ver na figura (12).

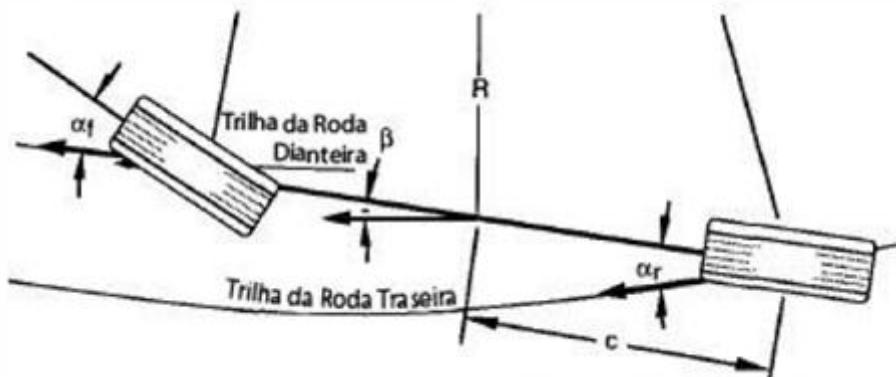


Figura 12 - Ângulo de escorregamento lateral em uma curva de alta velocidade. Fonte: (GILLESPIE, 1992).

Para qualquer velocidade o ângulo de escorregamento lateral,  $\beta$ , no CG será:

$$\beta = 57,3 \frac{c}{R} - \alpha_r = 57,3 \frac{c}{R} - W_r \cdot \frac{V^2}{C_{ar.g.R}} \quad (18)$$

A velocidade na qual o ângulo de escorregamento se torna zero é:

$$\beta = 0 \therefore V_\beta = \sqrt{57,3 \cdot g \cdot c \cdot \frac{c_{ar}}{w_r}} \quad (19)$$

Note que essa velocidade não depende do raio da curva, ou seja, para qualquer raio de curva essa velocidade é independente do mesmo.

### 3.10 Margem estática

Outro termo de importância nas discussões relativas a dirigibilidade de um veículo é a margem estática, que da mesma forma que o coeficiente de subesterçamento ou a velocidade característica fornece uma medida do comportamento da dirigibilidade de um veículo em regime permanente.

Podemos definir a margem estática como o ponto no veículo onde a força lateral não irá produzir velocidade de guinada em regime permanente.

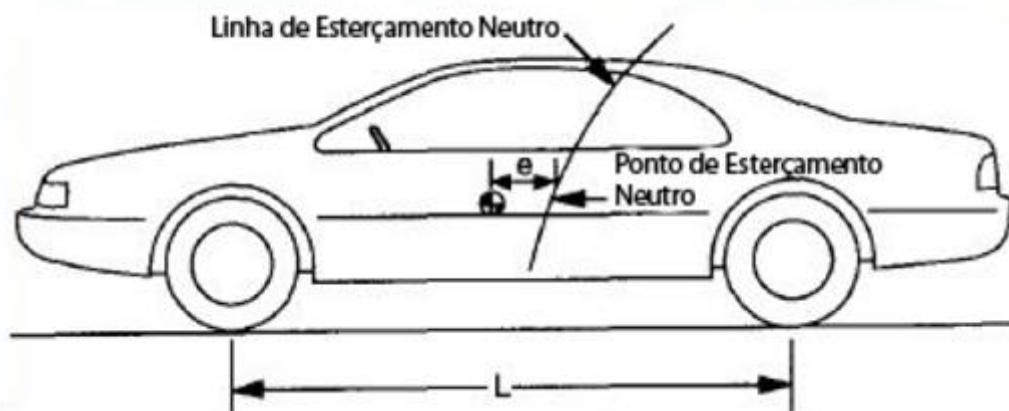


Figura 13 - Linha de esterçamento neutro em um veículo. Fonte: (GILLESPIE, 1992).

Definimos a margem estática como a distância do ponto de esterçamento neutro até o CG, normalizada pelo entre-eixos. Dessa forma:

$$\text{Margem Estática} = e/L \quad (20)$$

Quando o ponto que representa a margem estática está atrás do CG, a mesma é positiva e o veículo é subesterçante. Se o ponto coincidir com o CG a margem é

zero e o veículo tem esterçamento neutro. E por último se o ponto estiver à frente do CG, o veículo é sobre-esterçante.

## 4 O TESTE DE SKIDPAD

### 4.1 Medição experimental do gradiente de subesterçamento (Gillespie,1992)

O gradiente de subesterçamento é definido pela SAE [SAE J670] como “A quantidade obtida subtraindo o gradiente do ângulo de esterço de Ackerman do valor do gradiente do ângulo de esterço de referência em uma pista plana e para uma determinada condição estática.” Métodos para a medição experimental de gradiente de subesterçamento (ISO 4138, SAE J266) são todos baseados na definição do gradiente refletido na equação (8):

$$\delta = 57,3L/R + Ka_y \quad (8)$$

A dedução desta equação supõe que o veículo está operando no estado estacionário. Portanto o subesterçamento é definido como uma propriedade de estado estacionário. Para a medição experimental o veículo deve ser posto em uma curva de estado estacionário com medição adequada dos valores na equação(8) acima descrita de forma que o valor de K possa ser determinado. Quatro métodos de testes são sugeridos como significado para medir esta propriedade – raio constante, velocidade constante, ângulo de esterçamento constante e aceleração constante. Destes métodos apenas os dois primeiros são próximos das condições normais de direção, por isso, a discussão é limitada a estes dois casos.

#### 4.1.1 Método do raio constante

O subesterçamento pode ser medido dirigindo o veículo em uma pista circular de raio constante e observando o ângulo de esterçamento versus aceleração lateral. O método faz uma cópia aproximada da operação do veículo em muitas situações em rodovias, tal como a curva em raio constante em rampas de rodovias de acesso limitado. A instrumentação disponível deve medir, no mínimo, o ângulo de esterçamento da roda e a aceleração lateral. Dado que o raio da curva e alguma

medida de velocidade do veículo do velocímetro, quinta roda ou por tempo de volta), a aceleração lateral pode ser extraída da relação  $a_y = V^2/(Rg)$ .

O procedimento recomendado é dirigir o veículo em torno do circuito circular em velocidade muito baixa, na qual a aceleração lateral é negligenciada, e anotar o ângulo de esterçamento (ângulo de esterçamento de Ackerman) requerido para curvar o carro (quem procede o teste é desafiado a desenvolver uma boa técnica para este processo, pois as inclinações e irregularidades da pista entre outros, causam ao veículo uma deriva para dentro ou para fora do veículo no decorrer do processo, dificultando a determinação o ângulo de esterçamento médio). Assim a velocidade do veículo é aumentada em estágios que irão produzir acelerações laterais com incrementos razoáveis (tipicamente 0,1 g), acompanhando o ângulo de esterçamento em cada velocidade. O ângulo de esterçamento (dividido pela relação de esterçamento para obter ângulo de esterçamento da roda) é depois plotado como uma função da aceleração lateral, demonstrado na figura 14.

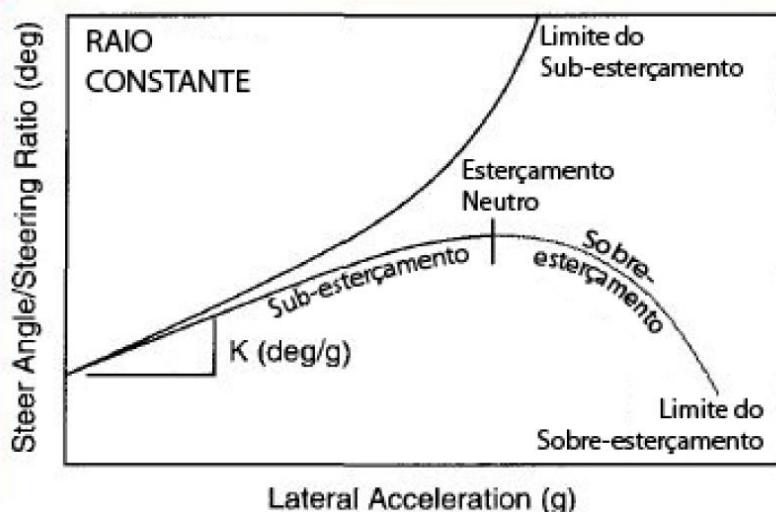


Figura 14 - Exemplo de medição de gradiente de subesterçamento pelo método do raio constante. Fonte: (GILLESPIE, 1992).

O significado desta plotagem na figura 14 pode ser vista pela derivada da equação (21) :

$$\frac{\partial \delta}{\partial a_y} = \frac{\partial}{\partial a_y} \left( 57.3 \frac{L}{R} \right) + K \frac{\partial a_y}{\partial a_y} \quad (21)$$

Como o raio da curva é constante, o ângulo de esterçamento de Ackerman é também constante e a derivada dele é zero. Então é obtida a equação (22):

$$K = \frac{\partial \delta}{\partial a_y} \quad (22)$$

A inclinação do ângulo de esterçamento da curva é o gradiente de subesterçamento. Uma inclinação positiva (para cima, à direita) indica subesterçamento, uma inclinação nula significa esterçamento neutro, e uma inclinação negativa indica sobre-esterçamento. Medições típicas irão tomar uma das formas da figura (13). Alguns veículos irão ter subesterçamento sobre toda área de operação, permanecendo assim no limite. Outros devem manter subesterçamento em baixas acelerações laterais, mas irão apresentar sobre-esterçamento em acelerações laterais altas e apresentarão limite de sobre-esterçamento.

Note que o ângulo de esterçamento das rodas (obtido pela divisão do ângulo de esterçamento do volante pela relação de esterço) é usado para caracterizar o gradiente de subesterçamento. Enquanto o subesterçamento é medido no volante, o gradiente de subesterçamento é descrito em graus por g de esterçamento requerido na roda, porém a relação de esterço não é constante por causa da observância no sistema. Isto não invalida o método de medição, mas reconhece que aquelas propriedades no sistema de esterçamento são uma fonte legítima de subesterçamento no veículo. Nos casos em que a o ângulo de esterçamento da roda é medido diretamente, um gradiente de subesterçamento diferente é obtido, pois os efeitos no sistema de direção não irão ser incluídos. Embora este método não esteja incorreto, falha em caracterizar completamente as propriedades de subesterçamento do veículo pela exclusão da contribuição do sistema de esterçamento. Reconhecendo que o motorista deve controlar o veículo a partir do volante, os efeitos do sistema de esterçamento devem ser inclusos em uma caracterização completa do subesterçamento.

O método do raio constante tem a vantagem de minimizar a instrumentação requerida, mas tem como desvantagem a dificuldade de ser executado de forma objetiva. A determinação precisa do ângulo do volante é difícil por conta dos desvios necessários para manter o carro no raio da curva. Este aspecto do teste não é fácil de ser controlado.

O Raio mínimo de curva para este procedimento é 30 m (aproximadamente 100 pés). Para veículos de dois eixos o gradiente de esterçamento não é afetado pelo raio do círculo. O gradiente para caminhões multi-eixo (três ou mais), contudo é sensível a esta distância.

#### 4.1.2 Método da velocidade constante

O Subesterçamento pode ser medido em velocidade constante pela variação do ângulo de esterço. Medições por este método aproximam-se de muitas situações reais de direção desde que veículos são normalmente conduzidos a uma velocidade aproximada constante. Com este método o raio da curva vai variar constantemente requerendo uma coleta de dados mais extensa para determinar o gradiente. Em adição a medição de velocidade e ângulo de esterço, o raio da curva também deve ser determinado para cada condição. O significado mais prático para a medida do raio de curva é também medir a aceleração lateral ou taxa de guinada. O raio da curva é derivado das medidas usando a forma apropriada de relações abaixo:

$$R = V^2/a_y = V/r \quad (23)$$

onde:

$V$  = velocidade linear (pés/s ou m/s)

$a_y$  = aceleração lateral (pés/s<sup>2</sup> ou m/s<sup>2</sup>)

$r$  = velocidade de guinada (rad/s)

O gradiente do ângulo de esterçamento de Ackerman para o teste de procedimento é obtido substituindo a equação (23) na equação (8), eliminando o raio. Produzindo a equação (24).

$$\delta = 57.3 \frac{L}{R} + K a_y = 57.3 L \frac{a_y}{V^2} + K a_y \quad (24)$$

Novamente tomando as derivadas com respeito a aceleração lateral, obtemos a expressão para o gradiente de subesterçamento:

$$K = \frac{\partial \delta}{\partial a_y} - \frac{\partial}{\partial a_y} (57.3 \frac{L}{V^2}) \quad (25)$$

Como a velocidade e o entre-eixos são constantes, o gradiente do ângulo de esterço de Ackerman (o segundo termo no lado direito) é uma linha reta em declive constante e aparece em uma curva plotada na figura 15. O gradiente do ângulo de esterçamento de Ackerman é esterçamento neutro. Em regiões onde o gradiente do ângulo de esterço é maior que aquele de Ackerman, o veículo é subesterçado. Um ponto onde os dois tem a mesma inclinação é esterço neutro, e onde o gradiente de esterço é menor que o de Ackerman, o veículo está sobre-esterçado. Para o veículo sobre-esterçado, o ponto onde a inclinação do ângulo de esterçamento da curva é zero, o contorno de estabilidade corresponde a velocidade crítica.



Figura 15 - Exemplo de medição de gradiente de subesterçamento pelo método de velocidade constante. Fonte: (GILLESPIE, 1992).

## 4.2 Condições de execução pela norma ISO 4138:2012

Como já citado existem quatro métodos para execução do teste de Skid Pad de acordo com Gillespie, porém a norma ISO 4138:2012 (Passenger cars — Steady-state circular driving behaviour — Open-loop test methods) cita apenas três deles, nos quais uma propriedade é mantida e as demais variáveis são medidas: velocidade constante, raio de curvatura constante e ângulo de esterçamento constante. Nos métodos de velocidade e raio de curva constantes é exigida a habilidade do piloto para manter-se na trajetória pré-determinada para minimizar a instrumentação requerida. Já o método cujo esterçamento do volante é constante requer que o raio da curva seja medido por instrumentos iniciais devidos.

### 4.2.1 Equivalência entre os métodos de teste

A natureza do estado estacionário estável é independente do método que é realizado. Portanto, para conseguir um conjunto de condições desejadas de equilíbrio em estacionário de velocidade, ângulo de esterçamento do volante e raio de curva, é possível possuir uma delas constante, variar outra e medir a terceira. Assim, um método de teste cujo raio de curva será constante (no qual a velocidade é variada e o ângulo de esterçamento é medido), um método de teste cujo ângulo de esterçamento do volante é constante (no qual a velocidade é variada e o raio é calculado pelas variáveis de movimento do veículo), ou um método de

teste cuja velocidade é constante (no qual o raio de curva é variado e o ângulo de esterçamento do volante é medido, ou no qual o esterçamento do volante é variado e o raio é calculado pelas variáveis de movimento do veículo) podem ser aplicados. As condições que são mantidas constantes, variam ou são calculadas são apresentadas na tabela 1:

**Tabela 1 - Condições de execução para o teste em estado estacionário.**

Método de teste	Constante	Variado	Medido ou calculado
Raio constante	Raio de curva	Velocidade	Ângulo do volante
Ângulo do volante constante	Ângulo do volante	Velocidade	Raio de curva
Velocidade constante com raio de curva variando	Velocidade	Raio de curva	Ângulo do volante
Velocidade constante com ângulo do volante	Velocidade	Ângulo do volante	Raio de curva

Todos os três métodos irão produzir resultados equivalentes de estado estacionário, desde que venham abranger a mesma combinação de velocidade x esterço x raio condições de estado estacionário. Além disso, em princípio, uma equivalência para qualquer método pode ser obtida por plotagem dos resultados em um gráfico para produzir os resultados dos outros métodos.

Na prática, contudo, os resultados obtidos destes testes conduzidos com diferentes combinações de velocidade, esterço e raio devem divergir devido a diferenças de aceleração, aerodinâmica, escorregamento do pneu e ângulo de inclinação em diferentes ângulos de esterçamento, etc. Gradientes obtidos utilizando um método em uma condição de equilíbrio de estado estacionário podem diferir daquelas obtidas utilizando outro método pois, enquanto em um método a aceleração lateral é controlada pela mudança de velocidade, em outro é controlada pela mudança de ângulo de esterçamento. Considerações práticas como aquecimento do pneu durante longos períodos de teste e falha em manter o verdadeiro estado estacionário também tendem a afetar os resultados.

## 4.2.2 Variáveis do teste de Skid Pad

### 4.2.2.1 Sistema de Referência

Devem ser aplicadas as disposições contidas na norma ISO 15037-1:2006.

### 4.2.2.2 Medição

As seguintes variáveis devem ser medidas:

- a) Velocidade longitudinal ( $v_x$ );
- b) Aceleração lateral ( $a_Y$ );
- c) Ângulo de esterçamento do volante ( $\delta_H$ ).

Alternativamente, a aceleração lateral pode ser determinada de outras variáveis de movimento. Dependendo do método escolhido para determinar a aceleração lateral variáveis adicionais devem ser mensuradas (velocidade de guinada, ângulo de rolagem do veículo, ou ângulo de escorregamento lateral).

As variáveis seguintes também devem ser medidas:

- velocidade de guinada ( $d\psi/dt$ );
- ângulo de escorregamento lateral ( $\beta$ ) e /ou velocidade lateral ( $v_Y$ );
- aceleração longitudinal ( $a_X$ );
- velocidade de ângulo de rolagem ( $\varphi_V$ );
- torque no esterçamento do volante ( $M_H$ ).

Em adição, ângulo de esterçamento no eixo dianteiro ( $\delta_F$ ) e ângulo de esterçamento no eixo traseiro ( $\delta_R$ ) devem ser medidos para determinação do gradiente de subesterçamento em cada um deles.

## 4.2.3 Equipamento de medição

### 4.2.3.1 Descrição

As variáveis selecionadas para os propósitos do teste devem ser medidas utilizando os transdutores apropriados e os dados computados em um sistemas de armazenamento de multicanais com temporizador. Intervalos típicos de operação, e erros máximos recomendados dos sistemas nos transdutores e aquisição de dados, são dados de acordo com a tabela 2.

**Tabela 2 - Variáveis, seus intervalos de operação típicas e erros máximos.**

Variável	Intervalo de operação típico	Erro Global máximo recomendado
Ângulo de esterçamento do volante	-360° à 360°	$\pm 1^\circ$ para $\delta_H < 50^\circ$ $\pm 2^\circ$ para $50^\circ < \delta_H < 180^\circ$ $\pm 4^\circ$ para $\delta_H > 180^\circ$
Torque de esterçamento do volante	-30 Nm à 30 Nm	$\pm 0,1 \text{ Nm}$ para $M_H < 10 \text{ Nm}$ $\pm 0,3 \text{ Nm}$ para $M_H > 10 \text{ Nm}$
Velocidade Longitudinal	0 km/h até 180 km/h	$\pm 1 \text{ km/h}$ para $V_X < 100 \text{ km/h}$ $\pm 2 \text{ km/h}$ para $V_X > 100 \text{ km/h}$
Velocidade lateral	-10 m/s à 10 m/s	$\pm 0,2 \text{ m/s}$ para $V_X < 100 \text{ km/h}$
Ângulo de escorregamento lateral	-20° à 20°	$\pm 0,3^\circ$
Aceleração longitudinal	-15 m/s <sup>2</sup> à 15 m/s <sup>2</sup>	$\pm 0,15 \text{ m/s}^2$
Aceleração lateral	-15 m/s <sup>2</sup> à 15 m/s <sup>2</sup>	$\pm 0,15 \text{ m/s}^2$
Velocidade de guinada	-50°/s à 50°/s	$\pm 0,3^\circ/\text{s}$ para $d\psi/dt < 20^\circ/\text{s}$ $\pm 1^\circ/\text{s}$ para $d\psi/dt > 20^\circ/\text{s}$

#### **4.2.3.2 Instalação dos transdutores :**

Os transdutores devem ser instalados de acordo com as instruções do fabricante quando estas existem, de modo que as variáveis correspondentes aos termos e definições da ISO 8855:2011 podem ser determinadas.

Se o transdutor não mensura a variável na posição definida, transformações apropriadas devem ser efetuadas.

#### **4.2.3.3 Processamento dos dados :**

As disposições são dadas na norma ISO 15037-1:2006.

#### **4.2.3.4 Condições do Teste :**

As condições de teste devem ser de acordo com a ISO 15037-1:2006, assim como os dados devem ser gravados para curvas realizadas à esquerda e à direita, como

especificado nesta norma. Algumas destas condições incluem condições de pista plana, limpa, seca e uniformemente pavimentada, cujo gradiente não pode ser excedido em 2% em qualquer direção no intervalo entre o a trajetória do veículo e proximidades, com velocidades de vento menores que 5 m/s. Qualquer outra condição que venha afetar os resultados do teste deve também ser documentado no relatório de ensaio para dados gerais

#### **4.2.4 Procedimento do teste**

##### ***4.2.4.1 Método do raio constante***

Este método de teste requer que o veículo seja pilotado em diferentes velocidades sobre uma pista circular de raio conhecido. O raio padrão deve ser 100 metros, mas raios maiores ou menores podem ser utilizados, com 30 metros como o mínimo valor possível.

As características do controle direcional são determinadas a partir dos dados obtidos enquanto dirigindo o veículo em sucessivas velocidades altas sobre a pista de raio circular. O procedimento pode ser conduzido em uma área relativamente pequena, sendo possível sua adaptação em instalações existentes da pista de teste selecionando um círculo ou o percurso de raio apropriado, muitas vezes uma estrada de raio constante será suficiente para instalação do teste.

##### ***4.2.4.2 Procedimento***

Primeiramente, dirigir o veículo no percurso circular desejado à menor velocidade possível. Registrar os dados com o volante e o acelerador com as posições fixadas, então o ângulo de esterçamento de Ackerman pode ser registrado. Em seguida, dirigir o veículo a maiores velocidades as quais os dados devem ser registrados. Aumentando a aceleração lateral e retirando os dados até que não seja possível manter as condições de estado estacionário.

O teste de raio constante existe com duas variações, na qual a primeira o veículo é dirigido na pista circular com velocidades constantes discretas, e na segunda o veículo mantém-se na pista circular com pequeno aumento de velocidade e durante o qual os dados são retirados.

#### **4.2.4.3 Velocidades de teste discretas**

Deve-se dirigir o veículo no circuito em cada velocidade. Após alcançar o estado estacionário no raio de curva desejado mantido com variação de  $\pm 0,5\text{m}$ , o volante e o acelerador devem ser mantidos constantes por 3 segundos.

#### **4.2.4.4 Aumento de velocidade contínua**

A velocidade é aumentada constantemente e os dados registrados constantemente, enquanto o veículo se mantém em trajetória circular desejada com variação de  $\pm 0,5\text{m}$ . A máxima taxa de aceleração lateral deve ser  $0,1 \text{ m/s}^2/\text{s}$ . A taxa máxima permitível de aumento de aceleração lateral deve ser  $0,2 \text{ m/s}^2/\text{s}$ .

### **4.2.5 Método ângulo de volante constante**

#### **4.2.5.1 Descrição**

Este método de teste que o veículo seja dirigido com um ângulo já definido no volante e mantido fixo. O raio da curva é determinado computacionalmente: pela velocidade horizontal e velocidade de guinada, ou velocidade horizontal e aceleração lateral.

O ângulo do volante padrão deve prover a uma velocidade baixa uma trajetória de raio de curva de 30 metros. Outros raios podem ser utilizados, com 20 metros sendo o mínimo. Para o caso de teste o limite de controle com condição inicial normatizada o raio da trajetória pode aumentar para 100 metros ou mais.

#### **4.2.5.1 Procedimento**

Primeiramente, o veículo deve ser dirigido a menor velocidade possível para estabelecer o ângulo do volante para o raio da trajetória a baixa velocidade. Em seguida, o veículo é dirigido sucessivamente a maiores velocidades, com o ângulo do volante seguro constantemente ou fixo mecanicamente com variação  $\pm 1^\circ$  do ângulo selecionado do volante. Executar o teste em toda gama desejada de aceleração lateral, ou até o limite de espaço do teste, velocidade do veículo, ou até o limite de estabilidade do veículo seja alcançado.

O teste existe com duas variações: Uma série de testes discretos são executados, ou um teste único é executado.

#### **4.2.5.2 *Velocidade de teste discreta***

Em cada velocidade selecionada o volante deve ser girado ao ângulo pré-selecionado e mantido até as condições de estado estacionário, incluindo velocidade e aceleração, serem alcançados. O ângulo do volante e a posição do acelerador devem ser mantidos constantes por no mínimo 3 segundos.

#### **4.2.5.3 *Aumento de velocidade contínua***

O ângulo do volante deve ser seguro constantemente ou fixo mecanicamente no ângulo pré-selecionado enquanto a velocidade do veículo é constantemente aumentada. A máxima taxa de aumento de aceleração lateral deve ser  $0,1 \text{ m/s}^2/\text{s}$ . A taxa máxima permitível de aumento de aceleração deve ser  $0,2 \text{ m/s}^2/\text{s}$ .

### **4.2.6 Método da velocidade constante**

#### **4.2.6.1 *Descrição***

Este método de teste requer que o veículo de teste seja dirigido a uma velocidade em um circuito circular em diferentes raios utilizando uma variedade de ângulos do volante. As características de resposta do controle de direção são determinadas dos dados plotados contra a aceleração lateral. Este método de teste pode requerer áreas de teste grande, dependendo da combinação de velocidade e aceleração lateral. Caso o método selecionado seja o de variação do raio, este requer um número de círculos marcados (ou segmentos circulares) suficientes para fornecerem acelerações laterais com incrementos de  $0,5\text{m/s}^2$  na velocidade selecionada. Um sistema para travar a rotação do volante deve ser usado, para manter constantes os ângulos do volante no caso do método cujo parâmetro variável é o ângulo de esterçamento.

A velocidade de ensaio padrão é 100 km/h. Se velocidades selecionadas forem maiores ou menores, estas devem ter incrementos de 20 km/h.

#### **4.2.6.2 Procedimento**

Dirigindo a partir de uma condição de velocidade inicial constante, aplica-se esterçamentos de magnitude sucessivamente crescentes e segura-se constantemente ou fixa-se mecanicamente com variação de  $\pm 1^\circ$  por 3 segundos, após alcançadas as variáveis medidas de movimento do veículo em estado estacionário. Controlar o acelerador a fim de manter velocidade constante com  $\pm 3\%$  dentro da velocidade do teste. Correr o teste dentro da variação desejada de aceleração lateral, ou até os limites do espaço do teste, velocidade do veículo, ou até o limite de estabilidade ser alcançado.

#### **4.2.6.3 Método controlando raio de curva**

Dirigir o veículo para o raio com a velocidade pré-selecionada. Depois de atingir o estado estacionário, as posições do volante e do acelerador devem ser mantidas constantes por ao menos 3 segundos.

#### **4.2.6.4 Método controlando ângulo do volante**

Dirigir o veículo na velocidade pré-selecionada, aplicar o esterçamento e mantê-lo constante por ao menos 3 segundos, após as variáveis medidas de movimento do veículo alcancem o estado estacionário. Controlando o acelerador a fim de manter velocidade constante ao longo do funcionamento.

### **4.2.7 Análise dos dados**

Os valores de estado estacionário para todas as variáveis medidas devem ser estabelecidos assim como seus valores médios durante qualquer intervalo de 1 a 3 segundos durante o qual o estado estacionário é mantido. Para cada intervalo de tempo selecionado as limitações na raio da trajetória, ângulo de esterçamento, velocidade, taxa de incremento de aceleração lateral e/ou posição especificada do acelerador na descrição de procedimentos do teste sendo seguidos devem ser observados. Adicionalmente em cada intervalo de tempo selecionado, o desvio padrão de aceleração lateral não deve exceder 5% do valor médio.

#### 4.2.8 Aceleração lateral

Por teoria, as características de estado estacionário podem ser determinadas como função da aceleração centrípeta, que é medida perpendicularmente a direção da trajetória do veículo. E de acordo com a ISO 4138:2012 esta pode ser obtida a partir de três métodos:

- a) Pelo produto da velocidade de guinada e velocidade horizontal:

$$\frac{d\psi}{dt} X v_h \quad (26)$$

- b) O quadrado da velocidade horizontal, dividida pelo raio da curva:

$$\frac{v_h^2}{R} \quad (27)$$

- c) O produto do quadrado da velocidade de guinada e o raio da curva:

$$\left(\frac{d\psi}{dt}\right)^2 X R \quad (28)$$

Lembrando que o método determinado deve constar no relatório de teste.

#### 4.2.9 Raio da curva

Para o método de teste de ângulo constante se, o raio da trajetória  $R$  (ver ISO 8855:2011) deve ser computado como estado estacionário pela velocidade longitudinal, corrigidos do ângulo de escorregamento, dividido pela velocidade de guinada, corrigido para ângulo de rolamento do veículo.

#### 4.2.10 Validação dos dados e apresentação dos resultados

Os dados do veículo testado devem ser apresentados de forma sucinta utilizando o relatório de testes contido na ISO 15037-1:2006, anexo A, assim como as condições de teste no anexo B desta norma.

#### **4.2.11 Plotagem de resultados**

Os dados medidos devem ser plotados conforme suas respectivas acelerações laterais nos respectivos diagramas de acordo com as características que serão avaliadas.

#### **4.2.12 Avaliação dos valores característicos**

As variáveis a seguir especificadas representam exemplos de avaliação de resultados, os quais descrevem o comportamento em estado estacionário do veículo. Qualquer um desses métodos pode ser usado como opção para o usuário. se esta avaliação é realizada será necessário determinar a relação de esterçamento global.

#### **4.2.13 Avaliação dos gradientes - Diferenciação**

##### ***4.2.13.1 Gradiente de ângulo do volante***

Este gradiente é expresso pela equação (29):

$$\frac{\partial(\delta_H)}{\partial(a_Y)} \quad (29)$$

Este gradiente não pode ser computado pelos resultados obtidos no teste de ângulo de volante constante quando o teste é realizado com apenas um ângulo no volante.

##### ***4.2.13.2 Gradiente de curvatura de trajetória***

Este gradiente é expresso pela equação (30):

$$\frac{\partial\left(\frac{1}{R}\right)}{\partial(a_Y)} \quad (30)$$

Porém, este gradiente não pode ser computado pelos resultados obtidos utilizando o método do raio constante se o teste foi realizado com apenas um valor de raio.

#### **4.2.13.3 Gradiente do ângulo de escorregamento**

Este gradiente é expresso pela equação (31):

$$\frac{\partial(\beta)}{\partial(a_Y)} \quad (31)$$

#### **4.2.13.4 Gradiente de ângulo de escorregamento/volante**

Este gradiente é expresso pela equação (32):

$$\frac{\partial(\delta_H)}{\partial(\beta)} \quad (32)$$

Ao utilizar a equação 32 devem-se tomar os cuidados de acordo com o mencionado na seção 10.3.2.7 da ISO 4138:2012.

### **4.3 Normatização de resultados - Comparaçāo dos resultados em diferentes veículos**

Os gradientes obtidos de métodos diferentes em determinadas condições de equilíbrio para estado estacionário podem diferir, isto é, por que diferentes métodos de teste controlam a aceleração lateral por diferentes variáveis (velocidade, raio da trajetória circular e ângulo do volante), portanto apenas os dados obtidos pelo mesmo método e a mesma velocidade e condições de estacionária de raio podem ser comparados.

Em qualquer caso geral de veículo realizando uma curva de determinado raio em estado estacionário, o ângulo de esterçamento requerido irá consistir em duas partes: devido ao efeito de Ackerman, que para um determinado raio é proporcional à distância entre-eixos; e devido às características de manobrabilidade do veículo. Em adição o ângulo do volante corresponde a um requerido ângulo de esterçamento irá depender de uma relação de esterçamento global.

Assim, há três quantidades a serem levadas em conta no caso geral:

- a) Entre-eixos  $l$ ;
- b) Relação de esterçamento global,  $i_s$ ;
- c) Gradiente de ângulo do volante,  $\frac{\partial(\delta_H)}{\partial(a_Y)}$ .

As unidades de gradiente de ângulo de volante serão em graus por metro por segundo ao quadrado.

#### 4.3.1 Normatização com respeito à relação de esterçamento

Esta técnica é útil para comparação de resultados de veículos com entre-eixos similares.

#### 4.3.2 Gradiente de subesterçamento

Este gradiente é determinado pela divisão do gradiente do ângulo do volante pela relação de esterçamento subtraindo o gradiente do ângulo de esterçamento de referência, como mostrado na equação (33):

$$\frac{\partial(\delta_H)}{\partial(a_Y)} X \frac{1}{i_s} - \frac{\partial(\delta_D)}{\partial(a_Y)} \quad (33)$$

Em um teste com raio constante, o gradiente do ângulo de esterçamento dinâmico de referência é zero, então pode ser escrita conforme a equação (34):

$$\frac{\partial(\delta_H)}{\partial(a_Y)} X \frac{1}{i_s} \quad (34)$$

Enquanto que, em um teste cujo ângulo do volante é constante, o gradiente do ângulo do volante não é definido, e o subesterçamento pode ser encontrado diretamente do gradiente de curvatura da trajetória (equação) como o produto do entre-eixos e o gradiente de curvatura da trajetória, como mostra a equação (35):

$$l X \frac{\partial(\frac{1}{R})}{\partial(a_Y)} \quad (35)$$

### 4.3.3 Gradiente de subesterçamento/ escorregamento

Este gradiente é determinado dividindo o gradiente do ângulo do volante/escorregamento equação (32) pela relação de esterçamento( $i_s$ ), e dado pela equação (36):

$$\frac{\partial(\delta_H)}{\partial(\beta)} \times \frac{1}{i_s} \quad (36)$$

## 5 ESTUDO DE VIABILIDADE DE EXECUÇÃO DO TESTE DE SKID PAD

### 5.1 Etapas de Execução do teste

Após o estudo detalhado da literatura, a qual incluem as normas que padronizam o teste de skid pad, obtvemos o conhecimento das condições e instrumentação necessárias para realização do teste. Foi realizado a listagem das etapas necessária para execução do teste, que incluem :

- As escolhas dos métodos a serem utilizados ;
- Montagem do protótipo ;
- Sistema de aquisição de dados ;
- Seleção da pista com trajeto definido para execução.

### 5.2 Escolha dos métodos

Para que seja possível a comparação entre os resultados dos testes, seria desejável que fossem escolhidos pelo menos dois métodos de teste em regime estacionário. A fim de diminuir o número de variáveis a serem medidas, e por consequência o número de transdutores, diminuindo também o custo da instrumentação. Os métodos utilizados seriam o método de raio constante e o método de velocidade constante com variação do raio de curva, mas em caso de não haver viabilidade de ambos, o método ao qual seria dada a preferência é o método de raio constante, já que este método não exigiria mais que uma pista (uma para cada raio), ou trecho de execução de maiores dimensões.

A escolha destes dois métodos já irá excluir a necessidade de instrumentação de medição inercial para a determinação do raio de curva, porém como já mencionado anteriormente será necessária habilidade do piloto para que sejam controlados os parâmetros necessários para realização do teste em regime estacionário.

### **5.3 Variáveis a serem escolhidas**

Tendo como meta a obtenção do subesterçamento no eixo traseiro e no eixo dianteiro, e do gradiente de subesterçamento o do conjunto, serão necessários transdutores para medição das seguintes variáveis:

- Velocidade longitudinal ( $v_x$ );
- Ângulo de esterçamento do volante ( $\delta_H$ );
- ângulo de escorregamento lateral das rodas ( $\beta$ );

É importante que seja realizada a filtragem dos dados de acordo com a norma, para sua validação. Assim, tendo o conhecimento destas variáveis é possível obter os subesterçamentos existente em cada uma dos pneus e, principalmente, o gradiente de subesterçamento do conjunto.

Uma outra viável que pode ser encontrada é a rigidez de esterço dos pneus, de acordo com a relação entre o carregamento dos eixos e o ângulo de escorregamento. Em vista do teste também apresentar o desempenho do conjunto dos pneus, sua execução com combinações diferentes e com diferentes tipos de pneus devem ser testadas para apresentar um melhor conjunto de informações que forneça melhores resultados do teste.

### **5.4 Seleção da pista para execução do teste de skid pad**

Dando prioridade ao método do raio constante que facilitaria a escolha do trajeto, o teste pode ser efetuado em um estacionamento grande, ou o trecho de uma rodovia cuja raio de curva é definido e constante.

Como já mencionado anteriormente é importante que a pista seja plana e não possua grandes variações nas medições dos gradientes em qualquer direção, o que já invalida os resultados dos testes.

Outro fator são as condições do ambiente de teste, pois a existência de condições climáticas que causem ventos a velocidades próximas, ou maiores, a 5 m/s, fazem

com que possa haver demoras para realização do teste, pois é necessário esperar a condição climática ideal para realização do teste.

## 5.5 Dificuldades encontradas para executar os testes

### 5.5.1 Local para execução dos testes

Ao buscar meios para realização dos testes muitos fatores impossibilitaram a execução. Dentre tais fatores, principalmente, o local para realização dos testes não estavam dentro das especificações da norma.

Alguns locais foram cogitados por suas grandes dimensões e possuirem pavimentação asfáltica, mas a presença de variações na inclinação da pista, ressaltos, buracos, vegetação e outros obstáculos já inviabilizariam a realização do teste, tais problemas podem ser vistos nas figuras 16 e 17:



**Figura 16 - Estacionamento próximo ao terminal de laranjeiras na Serra-ES, a presença de poças após o dia chuvoso denuncia irregularidades e presença de buracos na pavimentação, também é visível a presença de vegetação.**



**Figura 17 - Estacionamento do Shopping Vitória na Enseada do Suá.** Devido a presença de inclinação no terreno, e dos objetos utilizados para facilitação do estacionamento, a realização do teste é inviável neste local.

Uma outra possibilidade seria realizar os testes em alguma das pistas do aeroporto Eurico de Aguiar Salles em Vitória-ES, porém a burocracia envolvida para a realização de tal estudo no local seria também inviável, uma vez que a demanda é muito grande devido ao fluxo de aviões, assim criando grande dificuldade para conseguir autorização da infraero para liberação da pista para testes.

## 5.6 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados do protótipo foi montado e programado pelos próprios integrantes do projeto, assim sendo projetado para atender às necessidades acerca de requisitos mínimos de segurança para o piloto, e para exibição ao piloto. Utiliza-se um display, como mostrado na figura 18, composto por duas partes, uma parte qualitativa e outra quantitativa. A parte qualitativa visa facilitar a leitura da rotação do motor, nível de gasolina e dos sensores de presença, para isso utiliza-se barras de LED SMD de alto brilho. Para amostrar a velocidade utiliza-se dois dígitos de sete segmentos compostos por LEDs SMD também de alto brilho. Assim deve ser realizada a instalação dos devidos transdutores e um sistema de filtragem e aquisição dos dados conforme solicitado em norma. Para tal finalidade caso não haja possibilidade de montagem pelos integrantes da equipe é necessário cogitar a compra do sistema de eletrônica embarcada.



Figura 18 - Layout gráfico do painel do protótipo. Fonte: (VITORIA BAJA, Relatório de Projeto, 2013).

## 5.7 O Protótipo

### 5.7.1 Aceleração lateral x velocidade máxima

As especificações do protótipo descritas no relatório de projeto citam que a velocidade final alcançada é 64,3km/h, portanto limitando os valores de aceleração lateral para uma gama menor como foi visto na equação (23) portanto para incrementos de 0,1g na aceleração lateral, teremos os valores de velocidade longitudinal como representado na tabela 1, para o raio de 30m.

**Tabela 3 - Velocidades para um raio de 30m e incremento de 0,1g de aceleração lateral.**

Aceleração lateral (g)	Velocidade (em km/h)
0,10	19,52
0,20	27,61
0,30	33,81
0,40	39,04
0,50	43,65
0,60	47,81
0,70	51,64
0,80	55,21
0,90	58,56
1,00	61,73
1,10	64,74

Para o menor raio, 30 metros, são obtidos os menores valores de velocidade longitudinal, o que significa que se o raio de curva do teste for maior que o descrito, a gama de valores de velocidade será menor já que ultrapassarão o valor máximo da velocidade do carro.

### 5.7.2 Sistema de direção

O sistema de direção do protótipo é do tipo pinhão-cremalheira com relação de 3:1, cujo raio de curva mínimo é 2000 mm, e de acordo com o relatório de projeto da equipe o em uma curva de raio mínimo a roda interna gira 44,89° e a roda externa gira 33,15°, tais ângulos tem influência principalmente por conta do efeito de cambagem, sobre o qual não foi discutido.

Ao observar o volante foi vista uma folga, a qual não foi medida, e mesmo que tal folga não gerasse problemas no decorrer do teste, é desejável que seja retirada para melhoria do subsistema. Esta folga tinha como principal motivo o problema de usinagem dos dentes do pinhão e da cremalheira.

## 6 CONCLUSÃO

Apesar dos problemas que impossibilitaram a realização do teste em regime permanente, estes foram identificados e soluções já podem ser aplicadas a fim de proceder o teste e por consequência obtenção das variáveis necessárias para realização do teste e obtenção do gradiente de subesterçamento do protótipo, assim como as rigidezes de esterço dos pneus utilizados, a fim de obter um melhor conjunto de pneus que atenda melhor as necessidades do projeto.

A aplicação do teste para o protótipo não geraria problemas por questão da estrutura do veículo, apesar do teste ser aplicável para uma gama menor de valores de velocidade, já que é premissa do projeto utilizar o modelo de motor padrão, cuja potência é 10 HP, e por regra não pode ser substituído por outro modelo ou modificado e a aceleração lateral máxima produzida pelo veículo é 1g (9,81 m/s), conforme calculado.

Além da obtenção quantitativa das características de rigidez de esterço dos pneus através dos testes, seria sensato ter documentados esses valores para diferentes tipos de pneus, pois em futuros projetos aplicar o conhecimento em novos projetos seria mais simples.

Após ter o entendimento dos efeitos que o gradiente de subesterçamento tem sobre um veículo, pode-se abrir margem para um estudo adicional devido efeitos gerados pela suspensão aliados ao teste de curva em estado estacionário ampliariam o conhecimento a ser aplicado para novas premissas de projeto, visando maior estabilidade na direção.

## 7 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. GILLESPIE, Thomas D. Fundamentals of vehicle dynamics. Warrendale: Society of Automotive Engineers, Inc., 1992
2. FIAT, Group. Apostila de Rodas e Pneus, Impresso n° 53001009, 04-2008
3. ISO 4138:2012 Passenger cars -- Steady-state circular driving behaviour -- Open-loop test methods
4. ISO 8855:2011 Road vehicles -- Vehicle dynamics and road-holding ability -- Vocabulary
5. ISO 15037-1:2006 Road vehicles -- Vehicle dynamics test methods -- Part 1: General conditions for passenger cars
6. RELATÓRIO DE PROJETO DE COMPETIÇÃO. Espírito Santo – Equipe Vitória Baja, N° 16, 2013.
7. WIKIPEDIA, A ENCICLOPEDIA LIVRE. Geometria de Ackermann. Disponível em: <[http://pt.wikipedia.org/wiki/Geometria\\_de\\_Ackermann](http://pt.wikipedia.org/wiki/Geometria_de_Ackermann)>. Acesso em: 23 de mar. 2013
8. WIKIPEDIA, A ENCICLOPEDIA LIVRE. Ângulo de escorregamento. Disponível em: <[http://pt.wikipedia.org/wiki/%C3%82ngulo\\_de\\_escorregamento](http://pt.wikipedia.org/wiki/%C3%82ngulo_de_escorregamento)>. Acesso em: 23 de mar. 2013