

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FEI

RAFAEL SERRALVO NETO

**AQUISIÇÃO DE DADOS EM UM VEÍCULO DE COMPETIÇÃO F-SAE**

São Bernardo do Campo

2010

RAFAEL SERRALVO NETO

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

RAFAEL SERRALVO NETO

**AQUISIÇÃO DE DADOS EM UM VEÍCULO DE COMPETIÇÃO F-SAE**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro Universitário da FEI, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica, orientada pelo Prof. Dr. Roberto Bortolussi

São Bernardo do Campo  
2010

Serralvo Neto, Rafael

Aquisição de dados em um veículo de competição F-SAE / Rafael Serralvo Neto. São Bernardo do Campo, 2010.

115 f. : il.

Dissertação - Centro Universitário da FEI.

Orientador: Prof. Roberto Bortolussi

1. Dinâmica de Automóveis. 2. Veículos de Competição. 3. Aquisição de Dados. I. Bortolussi, Roberto, orient. II. Título.

CDU 629.113





Centro Universitário da **FEI**

# APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO ATA DA BANCA JULGADORA

PGE- 10

## Programa de Mestrado de Engenharia Mecânica

Aluno: **Rafael Serralvo Neto**

Matrícula: 207129-8

Título do Trabalho: **Aquisição de Dados em um veículo de competição F-SAE.**

Área de Concentração: Sistemas da Mobilidade

Orientador: Prof. Dr. Roberto Bortolussi

Data da realização da prova: 25 / fevereiro / 2010

A Banca Julgadora abaixo-assinada atribuiu ao aluno o seguinte:

APROVADO

REPROVADO

São Bernardo do Campo, 25/02/2010

### MEMBROS DA BANCA JULGADORA

Prof. Dr. Roberto Bortolussi

Ass.: 

Prof. Dr. Sergio Delijaicov

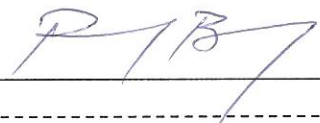
Ass.: 

Prof. Dr. Argemiro Luis de Aragão Costa

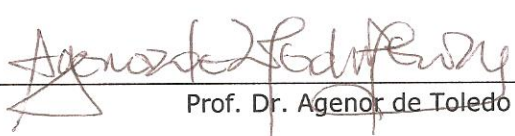
Ass.: 

### VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

ENDOSSO DO ORIENTADOR APÓS A INCLUSÃO DAS  
RECOMENDAÇÕES DA BANCA EXAMINADORA



Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

  
Prof. Dr. Agenor de Toledo Fleury

A Deus e a minha amada esposa Juliana

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus queridos pais e avós pela criação e por terem permitido que eu atingisse meus objetivos.

A minha esposa Juliana pela paciência e companheirismo durante todos esses anos.

Aos meus amigos e companheiros do Mestrado Hugo Martins, Marcos Paulo Pinheiro e Rafael Donadio pela força, dedicação e as horas de estudos que passamos juntos.

Ao meu professor orientador e amigo Roberto Bortolussi.

Aos professores e amigos Agenor Fleury, Fernando Orsatti, Marco Barreto, Ricardo Bock e Rodrigo Magnabosco.

A toda Equipe FEI Baja e em especial ao capitão Pedro Pinto e a equipe Formula FEI, bem como os capitães Jean Tavares e Lucas Elias.

A todos os funcionários do CLM.

## RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de apresentar a preparação e instrumentação de um veículo de competição Formula SAE, desenvolvido pelos alunos do Centro Universitário da FEI, para a realização da aquisição de dados, através do sistema AIM<sup>®</sup>. O principal foco do estudo é explorar o potencial que o software tem em apresentar os milhares de dados captados por diversos sensores instalados nos veículos de competição RS3 e RS4. Esses dados obtidos podem ser usados para alimentar os diversos softwares de simulação que a equipe Fórmula FEI utiliza, como por exemplo MSC/ADAMS<sup>®</sup>, NASTRAN<sup>®</sup>, ANSYS<sup>®</sup>, etc. Técnicas de análise dos dados serão mostradas, sempre com objetivo de visualizar as diferenças encontradas e os potenciais ganhos que a equipe pode ter em função da escolha de um determinado ajuste ou componente. A utilização do sistema de aquisição de dados permite encontrar os melhores resultados minimizando os tempos e custos dos testes. Os estilos de pilotagem também serão abordados e discutidos neste trabalho. Toda e qualquer possibilidade de melhorar o desempenho final do veículo deve ser explorada, com as informações registradas pelo sistema.

Palavras chave: Dinâmica veicular, veículos de competição, Formula SAE, sistema de aquisição de dados.

## **ABSTRACT**

This work has the intent to present the preparation and instrumentation of a student competition racing vehicle FSAE, developed by FEI University students, for the data acquisition using the AIM<sup>®</sup> system. The main focus of this work is to explore the software potential to present thousands of data obtained by various sensors installed on the racing vehicles RS3 and RS4. This data can be used to input a lot of information on computational tools for example: MSC ADAMS<sup>®</sup>, NASTRAN<sup>®</sup>, ANSYS<sup>®</sup>, etc. Data analysis techniques will be shown, aiming the differences visualization and the potential gains that the team could have, depending on the set-up or component choice. With the data acquisition system, it is possible to achieve better results in a shorter time and less cost. The different types of driving styles will be discussed on this work. Every single possibility to improve the final vehicle performance should be explored, with all the information registered on the data acquisition system.

**Key words:** Vehicle dynamic, racing vehicle, Formula SAE, data acquisition system.

## LISTA DE SÍMBOLOS

ACC2	Aceleração lateral no sistema de aquisição de dados AIM
AY	Aceleração lateral
ACC1	Aceleração longitudinal no sistema de aquisição de dados AIM
AX	Aceleração longitudinal
h	Altura do centro de gravidade
$\zeta$	Ângulo dos cordonéis da carcaça
$\tau$	Ângulo de caster
$\alpha$	Ângulo de inclinação entre a barra de direção e o braço de suspensão dianteiro inferior
t	Bitola
Bt	Braço à terra
$\phi$	Cambagem
t	Caster trail
RC	Centro de rotação da suspensão
RC <sub>D</sub>	Centro de rotação da suspensão dianteira
RC <sub>T</sub>	Centro de rotação da suspensão traseira
IC	Centro instantâneo de rotação da suspensão
C <sub>x</sub>	Coefficiente aerodinâmico
C <sub>s</sub>	Coefficiente de amortecimento
+ $\delta$	Convergência
Z <sub>u</sub>	Deslocamento vertical da massa não suspensa

a	Distância do centro de gravidade ao eixo dianteiro
b	Distância do centro de gravidade ao eixo traseiro
l	Distância entre-eixos
$-\delta$	Divergência
SD	Escorregamento direito
SE	Escorregamento esquerdo
$\Delta\delta_T$	Esterço traseiro
d	Folga do eletrodo dentro do acelerômetro
F	Força de reação no centro de gravidade devido a uma aceleração
F <sub>w</sub>	Força não uniforme na massa não suspensa
GPS	Sistema de posicionamento global
P <sub>E</sub>	Força peso do lado esquerdo
P	Força peso do veículo
F <sub>b</sub>	Força vertical na massa suspensa
W <sub>d</sub>	Frequência natural amortecida
W <sub>n</sub>	Frequência natural não amortecida
$\sigma$	Inclinação do pino metre
L <sub>c</sub>	Linha de centro do pneu
M <sub>ns</sub>	Massa não suspensa
M <sub>s</sub>	Massa suspensa
M	Massa total

Zr	Perfil de elevação da pista
W	Ponto do centro do pneu em contato com o solo
RR	Ride rate
Ks	Rigidez vertical da suspensão
Kt	Rigidez vertical do pneu
$\Delta P_x$	Transferência longitudinal de carga
q	Velocidade de arfagem
r	Velocidade de guinada
p	Velocidade de rolamento
Y	Velocidade lateral
X	Velocidade longitudinal
Z	Velocidade vertical



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Protótipo RS3.....	19
FIGURA 2 – Protótipo RS4.....	20
FIGURA 3 – Pneu diagonal.....	22
FIGURA 4 – Pneu radial.....	22
FIGURA 5 – Seção de um pneu diagonal.....	23
FIGURA 6 – Pneu radial em corte.....	24
FIGURA 7 – Ângulo de escorregamento visto por baixo.....	25
FIGURA 8 – Curva genérica do ângulo de escorregamento vs. força lateral.....	26
FIGURA 9 – Comportamento do pneu.....	26
FIGURA 10 – Representação gráfica do círculo de tração.....	27
FIGURA 11 – Representação gráfica do diagrama g-g extraído do sistema de aquisição de dados.....	28
FIGURA 12 – Mudança no ângulo de esterço em função da velocidade.....	29
FIGURA 13 – Diagrama de entrada das forças através do sistema de suspensão .....	30
FIGURA 14 – Suspensão dianteira do RS3.....	31
FIGURA 15 – Suspensão traseira do RS3.....	31
FIGURA 16 – Análise do trabalho da suspensão obtido no sistema de aquisição de dados....	32
FIGURA 17 – Modelagem da suspensão no software MD ADAMS R3® .....	32
FIGURA 18 – Ângulo de cambagem em função do curso da suspensão obtidos no software MD ADAMS R3® .....	33
FIGURA 19 – Esquerda: manga dianteira da McLaren MP4/21. Direita: manga traseira Ferrari 248 F1.....	34
FIGURA 20 – Vista frontal de uma típica suspensão dianteira: (1) Manga de eixo; (2) junta esférica dos braços superiores e inferiores; (3) Unidade mola/amortecedor; (4) cubo e disco de freio; (5) Ponta de eixo.....	35
FIGURA 21 – Manga traseira da Ferrari F248 F1.....	36
FIGURA 22 – Ângulo de cambagem positiva.....	37
FIGURA 23 – Ângulo de cambagem negativa.....	37
FIGURA 24 – Modificação do ângulo de cambagem durante o trabalho da suspensão.....	37

FIGURA 25 – Ponto de contato do pneu com o solo.....	38
FIGURA 26 – Ângulo do <i>caster</i> $\tau$ .....	39
FIGURA 27 – <i>Caster trail</i> ( $C_t$ ) é a cota do ponto K ao W e depende do ângulo do <i>caster</i> $\tau$ ...39	
FIGURA 28 – Ângulo do pino mestre $\sigma$ e a representação do braço à terra.....	40
FIGURA 29 – Determinação do centro instantâneo.....	41
FIGURA 30 – Determinação do eixo instantâneo.....	42
FIGURA 31 – Determinação da altura do centro de rolagem.....	42
FIGURA 32 – Eixo de rolamento.....	43
FIGURA 33 – Convergência / divergência.....	44
FIGURA 34 – Geometria de direção Ackermann.....	45
FIGURA 35 – Ângulo de esterçamento $\Delta\delta_T$ das rodas traseiras.....	46
FIGURA 36 – Determinação do ponto T, representando a posição do <i>tie rod</i> .....	47
FIGURA 37 – Representação do modelo ¼ de veículo.....	48
FIGURA 38 – Sistema de coordenadas SAE.....	49
FIGURA 39 – Transferência de carga longitudinal durante a aceleração.....	50
FIGURA 40 – Transferência de carga lateral durante curva para a direita.....	51
FIGURA 41 – Sistema de aquisição de dados analógico em uma BRM em 1969.....	52
FIGURA 42 – Diagrama g-g, Ayrton Senna, Adelaide 1987.....	53
FIGURA 43 – Ayrton Senna acompanhando os dados dos testes de inverno, Estoril 1994....	54
FIGURA 44 – Equipe Ferrari acompanhando os dados dos pilotos em tempo real.....	55
FIGURA 45 – Protótipo da Tu Graz 2007, equipado com sistema de transmissão de dados em tempo real.....	55
FIGURA 46 – Protótipo da Tu Graz 2009.....	56
FIGURA 47 – Funcionamento do sistema de aquisição de dados.....	57
FIGURA 48 – Mapa do enduro traçado pelo GPS. Campo de provas da Goodyear, Americana 2008.....	62
FIGURA 49 – Software Race Studio 2 <sup>®</sup> do AIM.....	64
FIGURA 50 – Diagrama g-g gerado pelo software Race Studio 2 <sup>®</sup> .....	65
FIGURA 51 – Sobreposição de curvas geradas pelo Race Studio 2 <sup>®</sup> .....	66
FIGURA 52 – Histograma de sinais e tempos de voltas gerados pelo Race Studio 2 <sup>®</sup> .....	66

FIGURA 53 – Protótipo RS3 equipado com o sistema de aquisição de dados da NI.....	70
FIGURA 54 – Primeiras aquisições.....	71
FIGURA 55 – Kit EVO3 Pro / Pista.....	71
FIGURA 56 – Kit EVO3 Pro / Pista instalado no F-Renault.....	72
FIGURA 57 – Baixa taxa de aquisição para uma onda senoidal, causando a falsa representação do sinal.....	73
FIGURA 58 – Unidade de aquisição de dados.....	74
FIGURA 59 – Sensor de rotação.....	75
FIGURA 60 – Funcionamento do sensor Hall.....	75
FIGURA 61 – Instalação do sensor de velocidade no RS3.....	76
FIGURA 62 – Sensor de posição do volante.....	76
FIGURA 63 – Instalação do sensor de posição do volante no RS3.....	77
FIGURA 64 – Sensor de deslocamento do amortecedor.....	78
FIGURA 65 – Instalação do LVDT no RS3.....	78
FIGURA 66 – Acelerômetro longitudinal ou lateral.....	79
FIGURA 67 – Funcionamento de um acelerômetro capacitivo.....	80
FIGURA 68 – Sensor de pressão de freio.....	80
FIGURA 69 – GPS.....	81
FIGURA 70 – Giroscópio.....	82
FIGURA 71 – Receptor à esquerda e transmissor à direita.....	82
FIGURA 72 – Software Race Studio 2 <sup>®</sup> , gráficos em função do tempo.....	83
FIGURA 73 – Race Studio 2 <sup>®</sup> , gráficos em função da distância e complemento da diferença do tempo entre duas voltas na parte inferior.....	84
FIGURA 74 – Configuração do Skid pad.....	85
FIGURA 75 – Aquisição de dados simulando uma volta no skid pad.....	85
FIGURA 76 – Skid pad com perda de aderência.....	86
FIGURA 77 – Mapa do enduro traçado pelo GPS, com recurso de graduação de cores para diferentes velocidades.....	87
FIGURA 78 – Gráfico com velocidade, aceleração longitudinal e aceleração lateral.....	88
FIGURA 79 – Gráficos combinados com o mapa da pista, desenhado pelo GPS.....	89

FIGURA 80 – Comparação dos traçados realizados por dois pilotos distintos.....	90
FIGURA 81 – Comparação da velocidade de entrada na curva entre os pilotos A e B.....	91
FIGURA 82 – Ponto de tangência antecipado pelo piloto B.....	92
FIGURA 83 – Slalon no enduro do F-SAE internacional, Michigan Speedway, 2009.....	92
FIGURA 84 – Velocidade de contorno dos cones.....	93
FIGURA 85 – Comparação da frenagem entre os pilotos A e B, pressões separadas entre dianteira e traseira.....	94
FIGURA 86 – Histograma de utilização do freio dianteiro. Piloto A amarelo e piloto B verde.....	94
FIGURA 87 – Histograma de utilização do freio traseiro. Piloto A magenta e piloto B roxo.....	95
FIGURA 88 – RS3 na prova de aceleração. Americana 2007.....	96
FIGURA 89 – Gráfico da aceleração na pista de testes da FEL.....	96
FIGURA 90 – RS3 na pista do autocross. Califórnia, 2008.....	98
FIGURA 91 – Interpretação do diagrama g-g com o pneu A.....	99
FIGURA 92 – Diagrama g-g com os pneus A e B.....	100
FIGURA 93 – Diagrama g-g comparando os dois compostos na pista de testes da FEL.....	101
FIGURA 94 – Limites de aceleração, comparando os dois compostos na pista de testes da FEL.....	101
FIGURA 95 – Manobra Fish Hook – mapa traçado pelo GPS.....	102
FIGURA 96 – Gráficos da manobra Fish Hook.....	103
FIGURA 97 – Gráfico do ângulo de cambagem da suspensão dianteira esquerda.....	104
FIGURA 98 – Gráfico do ângulo de cambagem da suspensão dianteira esquerda obtido no AIM.....	105
FIGURA 99 – Transferência de carga longitudinal, representada pela cor verde, durante uma aceleração.....	106
FIGURA 100 – Transferência de carga lateral, representada pela cor laranja, durante o skid pad.....	107
FIGURA 101 – Configurações para o cálculo da curva de potência e torque do motor.....	108
FIGURA 102 – Gráficos de potência e torque obtidos no software de análise do AIM.....	108
FIGURA 103 – Comparação das curvas de potencia e torque obtidas através de diferentes regulagens.....	109
FIGURA 104 – Curva de potência e torque do motor medido em dinamômetro.....	110

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	19
<b>1.1 Objetivos</b> .....	20
<b>1.2 Motivação</b> .....	21
<b>1.3 Conteúdo</b> .....	21
<b>2 A DINÂMICA VEICULAR</b> .....	22
<b>2.1 Os pneus na curva</b> .....	22
2.1.1 Pneus diagonais.....	22
2.1.2 Pneus Radiais.....	23
2.1.3 Ângulo de deriva.....	24
2.1.4 Relação entre força lateral e ângulo de escorregamento.....	25
<b>2.2 Sub e sobreesterçante / neutro</b> .....	28
<b>2.3 Sistemas de suspensão</b> .....	29
2.3.1 Duplo braço triangular.....	31
2.3.2 Manga de eixo.....	33
<b>2.4 A relação entre caster, camber, inclinação do pino mestre</b> .....	36
2.4.1 Camber.....	36
2.4.2 Caster.....	38
2.4.3 Inclinação do pino mestre.....	40
<b>2.5 Definições de centro e eixo de rolagem</b> .....	40
2.5.1 Determinação do centro instantâneo.....	40
2.5.2 Determinação do eixo instantâneo.....	41
2.5.3 Determinação do centro de rolamento.....	42
2.5.4 Determinação do eixo de rolamento.....	43
<b>2.6 Convergência e divergência</b> .....	43
<b>2.7 Geometria de direção</b> .....	44
2.7.1 Geometria de Ackermann.....	44
<b>2.8 Massa suspensa / massa não suspensa</b> .....	47
<b>2.9 Dinâmica lateral e longitudinal</b> .....	49
2.9.1 Sistema de coordenadas.....	49
2.9.2 Transferência de carga longitudinal.....	49
2.9.3 Transferência de carga lateral.....	50

<b>3 AQUISIÇÃO DE DADOS.....</b>	<b>52</b>
<b>3.1 Introdução.....</b>	<b>52</b>
<b>3.2 Definição.....</b>	<b>57</b>
3.2.1 Análise do desempenho do veículo.....	57
3.2.2 Análise do desempenho do piloto.....	58
3.2.3 Desenvolvimento do veículo.....	58
3.2.4 Confiabilidade e segurança.....	58
3.2.5 Determinação dos parâmetros do veículo.....	58
3.2.6 Diário de bordo.....	59
<b>3.3 Categoria dos dados.....</b>	<b>59</b>
3.3.1 Funções vitais do veículo.....	59
3.3.2 Parâmetros das atividades do piloto.....	59
3.3.3 Parâmetros do chassis.....	59
<b>3.4 Sinais básicos da aquisição de dados.....</b>	<b>60</b>
<b>3.5 Sinais suplementares da aquisição de dados.....</b>	<b>60</b>
<b>3.6 Hardware.....</b>	<b>61</b>
<b>3.7 Software.....</b>	<b>62</b>
3.7.1 Visualização dos dados.....	63
<b>3.8 Incerteza do resultado.....</b>	<b>67</b>
<b>4 ESTUDO DE CASO.....</b>	<b>69</b>
<b>4.1 Objetivo.....</b>	<b>69</b>
<b>4.2 Equipamentos utilizados e a implicação da precisão no resultado.....</b>	<b>69</b>
4.2.1 Escolha do sistema.....	69
4.2.2 Conversão do sinal analógico para o digital.....	72
4.2.3 Equipamentos utilizados.....	73
<b>4.3 Aquisições realizadas.....</b>	<b>83</b>
4.3.1 Skid pad– curva de raio constante.....	84
4.3.2 Enduro.....	86
4.3.3 Comparação dos estilos de pilotagem.....	90
4.3.4 Aceleração.....	95
4.3.5 Autocross.....	97
4.3.6 Manobra Fish Hook.....	102
<b>4.4 Correlação entre a aquisição e os dados de projeto.....</b>	<b>103</b>

4.4.1 Ângulo de cambagem.....	104
4.4.2 Transferência longitudinal de carga.....	105
4.4.3 Transferência lateral de carga.....	106
4.4.4 Curvas de potência e torque do motor.....	107
<b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>110</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>113</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A competição Formula SAE foi criada no ano de 1978 pela SAE Internacional, e consiste em um projeto para os estudantes de engenharia da graduação e da pós graduação. Deve-se projetar um veículo de competição monoposto do tipo fórmula com restrições de motorização, limitações de ruído e de consumo de combustível. No Brasil, a competição surgiu em 2004 e estima-se que já participaram cerca de mil estudantes neste projeto em mais de 15 universidades. Atualmente, a competição existe também nos seguintes países: Alemanha, Austrália, Brasil, Estados Unidos, Itália e Japão. A figura 1 mostra o protótipo RS3, fabricado pela equipe Fórmula FEI, do Centro Universitário da FEI e que foi utilizado nas competições de 2007 e 2008.



Figura 1 – Protótipo RS3  
Fonte: Cortesia equipe Fórmula FEI

Seguindo o cronograma adotado pela equipe Fórmula FEI, o RS4 é o veículo que participa do circuito de competições no ano de 2009 e é o sucessor do RS3, como pode ser visto na figura 2.





Figura 2 – Protótipo RS4  
Fonte: Cortesia equipe Fórmula FEI

## 1.1 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo apresentar a instrumentação do veículo de competição Formula SAE para permitir a utilização de um sistema de aquisição de dados. Com esse recurso, é possível analisar milhares de dados emitidos pelo veículo através de dezenas de sensores instalados no veículo.

O processo de obtenção de dados precisos e confiáveis sempre foi uma grande dificuldade encontrada pela maioria das equipes de competição do Formula SAE. Através do sistema de aquisição de dados, será possível alimentar os programas de simulação com as informações necessárias para obter-se resultados mais próximos da realidade, além de permitir o controle da vida útil dos componentes do veículo.

A análise dos dados tem a importância primordial no desenvolvimento dos componentes do veículo, e também na decisão dos melhores ajustes dos parâmetros da suspensão, motor, transmissão, freios e injeção de combustível.

As técnicas de pilotagem também podem ser estudadas e será possível analisar o desempenho dos pilotos. Como o Formula SAE é uma competição estudantil onde não existem pilotos profissionais, o sistema de aquisição de dados torna-se uma ferramenta muito poderosa para identificar os erros de pilotagem, podendo melhorar o desempenho, resultando em tempos de volta mais rápida e menor desgaste do equipamento.

## **1.2 Motivação**

Devido à grande complexidade de projetar um veículo de competição Fórmula SAE, onde o nível de competitividade entre as equipes é cada vez maior, o regulamento para a construção do veículo é cada vez mais restritivo, e também a grande escassez de literaturas nacionais, criou-se a necessidade de implementar um sistema de aquisição de dados, com a finalidade de obter o maior número de informações possíveis sobre o desempenho e comportamento dinâmico do veículo. Diversos problemas durante os testes devido à falta de histórico e informações também impulsionaram a motivação para introduzir um sistema de aquisição de dados na equipe Fórmula FEL. Aprofundar os conhecimentos em aquisição de dados experimentais obtidos em testes e competições também faz parte da motivação. O grande objetivo é diminuir o tempo e os custos dos testes e adquirir maior qualidade nas análises dos dados obtidos na pista de testes e nas competições nacionais e internacionais do circuito Fórmula SAE.

## **1.3 Conteúdo**

O trabalho está dividido na seguinte maneira: No primeiro capítulo tem-se a revisão bibliográfica, para poder compreender os efeitos da dinâmica veicular e suas conseqüências no veículo F-SAE e também quais as influências das geometrias de suspensão e direção e seus componentes, como molas, amortecedores e pneus. O capítulo seguinte discute os princípios da aquisição de dados nos veículos de competição, desde a sua idealização até os últimos acontecimentos. Posteriormente, será descrito como foi realizada a instrumentação dos veículos de competição F-SAE RS3 e RS4. Os resultados serão apresentados e discutidos. Para finalizar, o último capítulo apresenta-se a conclusão dos testes realizados com o sistema de aquisição de dados e quais são as vantagens da sua utilização, além de propostas para trabalhos futuros.

## 2 A DINÂMICA VEICULAR

### 2.1 Os pneus na curva

Um dos elementos principais com alta influência no comportamento dinâmico em veículos de competição é o pneu. Elemento de ligação com o solo, o pneu é o responsável por manter a aderência desejada para contornar as curvas com maior velocidade, tracionar de maneira mais eficiente e manter a estabilidade na frenagem. Um grande foco dos estudos de dinâmica veicular é direcionado aos pneus, pois os resultados estão diretamente ligados ao aumento do desempenho.

De acordo com Reimpell, Stoll e Betzler (2001), os pneus possuem dois tipos de construção: diagonal, figura 3 e radial figura 4.

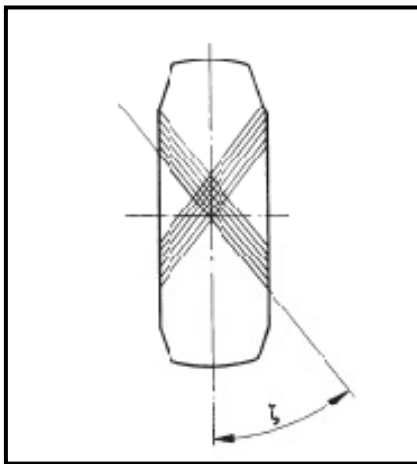


Figura 3 – Pneu diagonal  
Fonte: Reimpell, Stoll e Betzler 2001, p. 90

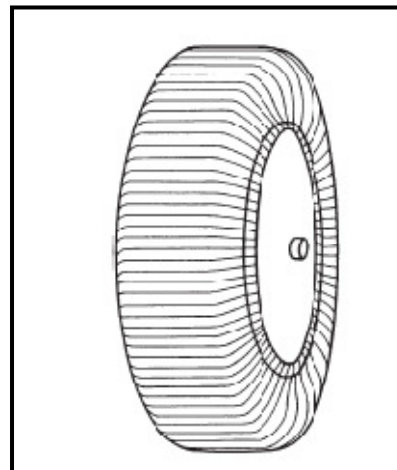


Figura 4 – Pneu radial  
Fonte: Reimpell, Stoll e Betzler 2001, p. 91

#### 2.1.1 Pneus diagonais

Conforme Reimpell, Stoll e Betzler (2001), os pneus diagonais são utilizados nas seguintes aplicações:

- a) Pneu sobressalente de veículos de passeio: Devido à baixa velocidade máxima – até 100 km/h e baixa durabilidade;
- b) Motocicletas: Devido à inclinação das rodas contra a força lateral;
- c) Carros de corrida: Devido ao baixo momento de inércia;
- d) Veículos de agricultura: Que não atingem alta velocidade.

Segundo Reimpell, Stoll e Betzler (2001), o ângulo  $\zeta$  ilustrado na figura 3 é correspondente as cordas de amarração estrutural que devem ficar entre 30° a 40° para veículos de passeio, para os veículos de competição esse ângulo é ainda menor. A importância do ângulo  $\zeta$  é determinante para as características de resistência ao rolamento, rigidez lateral e rigidez da suspensão. A figura 5 mostra a secção transversal do pneu e os principais elementos que garantem o seu correto funcionamento.

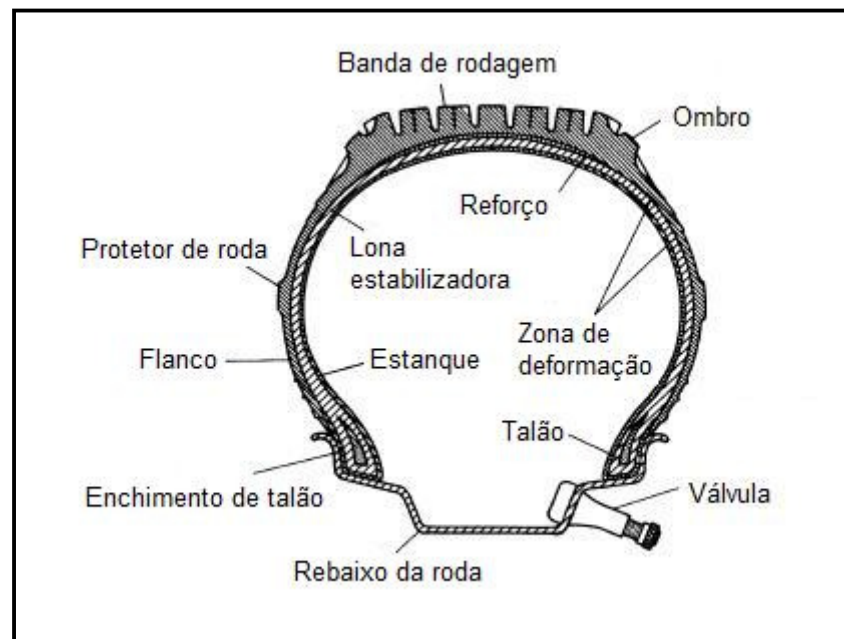


Figura 5 – Seção de um pneu diagonal  
Fonte: Reimpell, Stoll e Betzler 2001, p. 90

### 2.1.2 Pneus Radiais

Os pneus radiais são utilizados nos veículos de passeio e comerciais, e suas vantagens em relação aos pneus diagonais são:

- a) Maior durabilidade;
- b) Maior capacidade de carga;
- c) Menor resistência ao rolamento;
- d) Melhor desempenho na aquaplanagem;
- e) Melhor comportamento na frenagem em pista molhada;
- f) Maior conforto em pistas e rodovias de alta velocidade.

De acordo com Haney (2003) um pneu moderno possui construção complicada e reúne diversos materiais, tais como fibras poliméricas fortes e leves integradas a uma matriz de polímeros viscoelásticos – borrachas. Uma estrutura composta por esses materiais colados forma a carcaça. Uma superfície plana de borracha é colada sob alta temperatura e pressão no diâmetro externo da carcaça e é denominada como banda de rodagem. Para reforçar a carcaça de um pneu radial, fios de aço são utilizados e uma fina parede lateral conecta a banda de rodagem aos cabos de aço do talão, que prende o pneu na roda, conforme pode ser observado na figura 6.

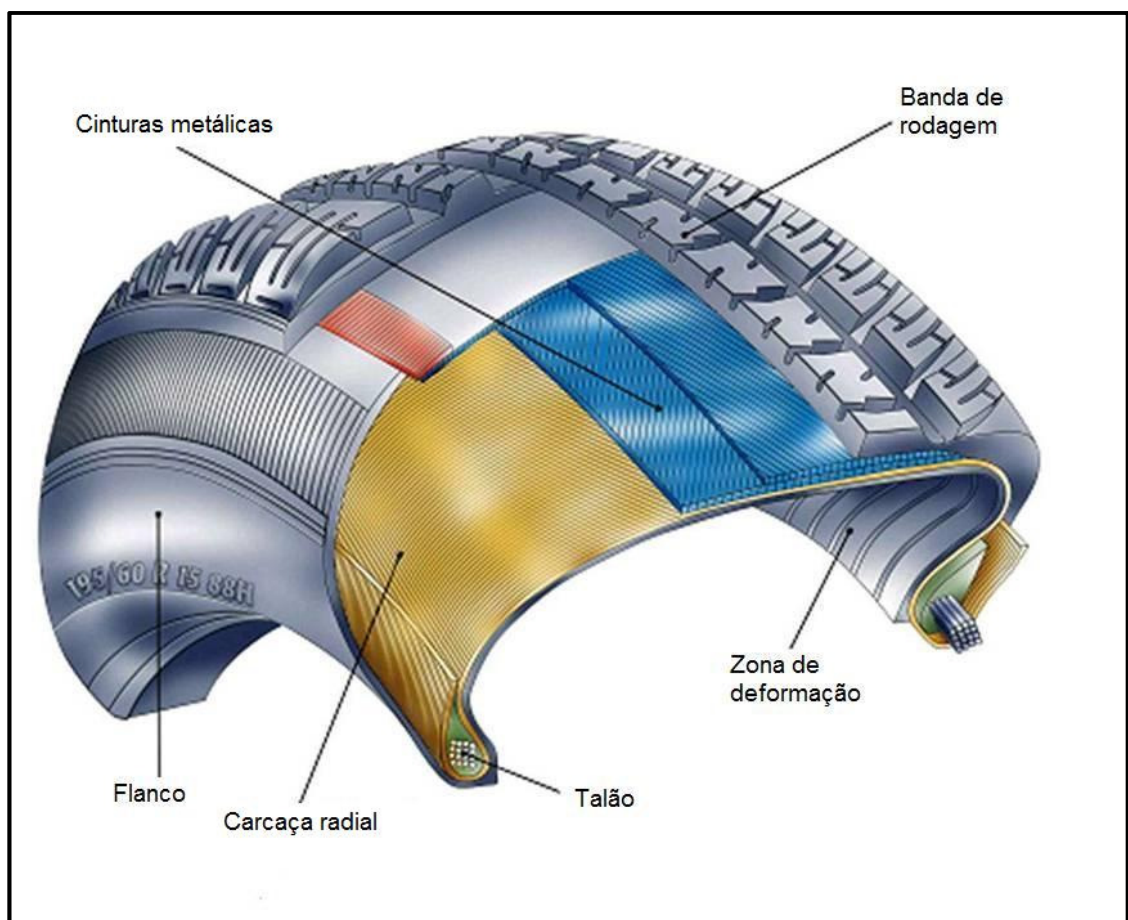


Figura 6 – Pneu radial em corte  
Fonte: Cortesia Goodyear

### 2.1.3 Ângulo de deriva

Conforme Haney (2003), durante uma curva, o veículo descreve uma trajetória que é um arco de uma circunferência. Para manter a trajetória, o veículo deve acelerar em direção ao centro do arco; essa aceleração é consequência de uma força lateral aplicada à massa do veículo e o pneu é a fonte dessa força. O ângulo de escorregamento ocorre quando o volante é

esterçado, conforme pode ser visto na figura 7. Por ser uma estrutura altamente deformável, quando um ângulo de esterço é aplicado à roda, o pneu se deforma gerando uma força lateral que irá desviar a trajetória do veículo. Esse ângulo de escorregamento é proporcional a força lateral. Ou seja, quanto maior a força lateral, maior o ângulo de escorregamento do pneu. (Consideração válida para o trecho linear do pneu). A figura 8 mostra a relação entre o ângulo de escorregamento e a força lateral. Essa é uma curva genérica sendo que cada pneu possui uma curva característica que muda com a carga e pressão interna.

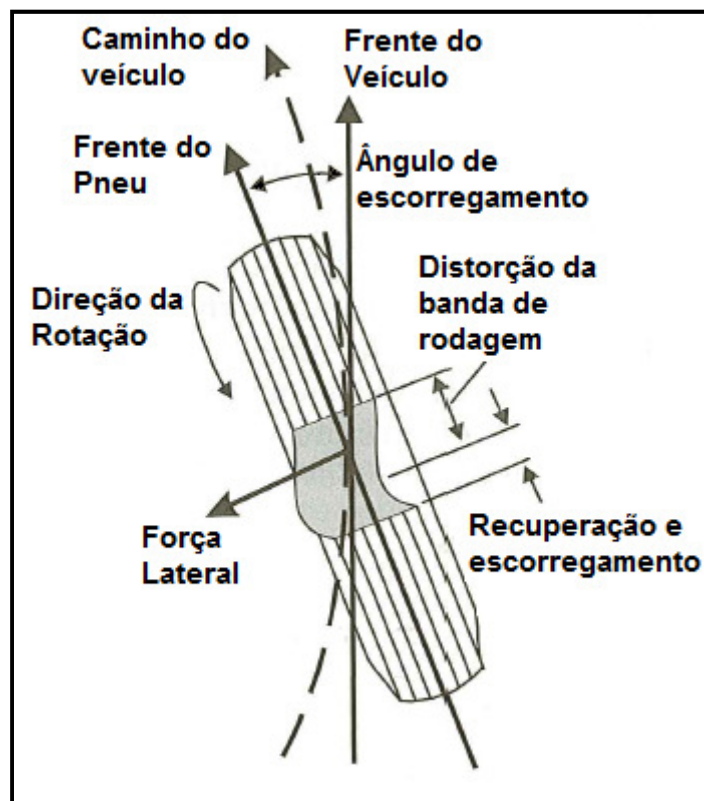


Figura 7 – Ângulo de escorregamento visto por baixo  
Fonte: Haney, 2003, p. 20

#### 2.1.4 Relação entre força lateral e ângulo de escorregamento

Segundo Haney (2003), é possível observar na figura 8 a relação entre a força lateral e o ângulo de escorregamento. Nota-se que não existe força lateral enquanto o pneu não é esterçado. O formato dessa curva não é o mesmo para todos os tipos de pneus, mas é importante destacar que a força lateral deixa de subir após o pico por volta de  $10^\circ$ , quando o pneu começa a escorregar. Cada pneu possui características particulares, que contribuem para

a aderência contra a superfície de uma estrada e o deformam elasticamente, permitindo manobras em altas velocidades com segurança.

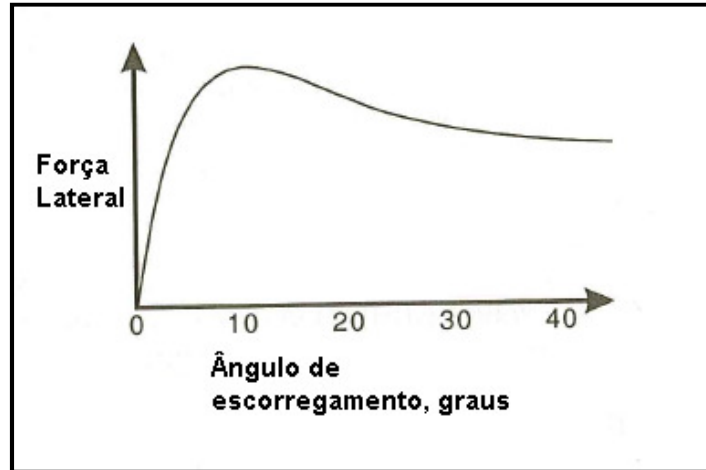


Figura 8 – Curva genérica do ângulo de escorregamento vs. força lateral  
Fonte: Haney, 2003, p. 22

Para entender melhor como é o comportamento do pneu durante a curva, segundo Segers (2008) a curva do pneu é dividida em três partes, conforme a figura 9.

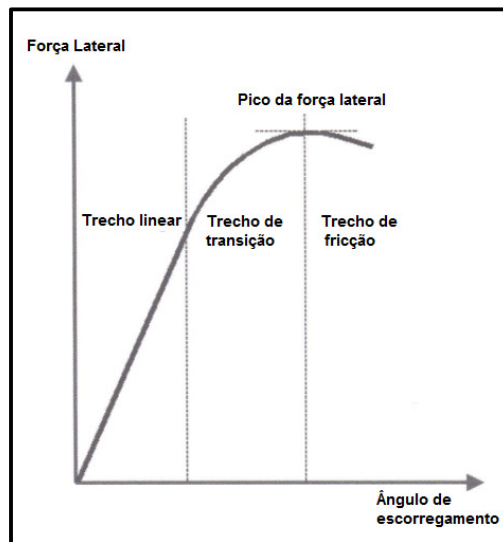


Figura 9 – Comportamento do pneu  
Fonte: Segers, 2008, p. 60.

O primeiro trecho é linear, ou elástico, cuja força lateral é proporcional ao ângulo de escorregamento. A força lateral é proveniente da deformação do pneu. O segundo trecho apresenta a região transiente, e a relação do ângulo de escorregamento e a força lateral não é mais linear. Neste ponto ocorre o início da distorção e escorregamento acentuado da banda de



rodagem, previamente ilustrado na figura 7. O terceiro e último trecho é após o pico da força lateral, onde o aumento do ângulo de escorregamento não representa mais o aumento da força lateral. Esse trecho é conhecido como de fricção porque nesse ponto a força lateral é simplesmente o resultado do atrito do pneu com a superfície da pista.

A representação gráfica de como são distribuídas as forças é representada na figura 10, através do círculo de tração, onde são plotadas as maiores forças que o pneu pode oferecer em cada direção. Neste caso, o veículo está acelerando em uma curva para a esquerda. O pneu específico para competição, segundo Segers (2008) pode desenvolver o mesmo desempenho na aceleração, frenagem ou em curvas. A maioria dos sistemas de aquisição de dados apresenta o recurso do diagrama g-g.

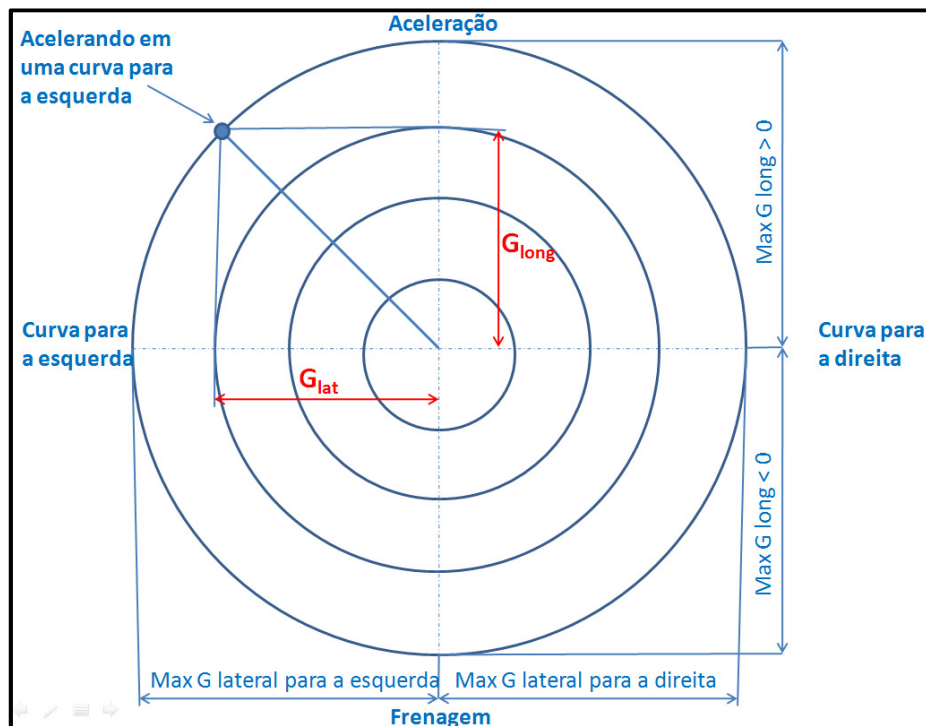


Figura 10 – Representação gráfica do círculo de tração  
Fonte: Segers, 2008, p. 60.

Na realidade, segundo Segers (2008), o diagrama g-g não é um círculo, mas sim o formato de um coração achatado. Esse formato é porque o pico de frenagem (desaceleração) é maior que o de aceleração. Na figura 11, pode se observar o diagrama g-g do RS-3 durante testes realizados no campus da FEI. Conforme Segers (2008) a aceleração longitudinal máxima é limitada ao potencial de tração do veículo. Esse é o motivo que os dois quadrantes superiores do diagrama g-g não são circulares. Os dois quadrantes inferiores apenas possuem formato circular quando o piloto e o veículo atingem o limite da aderência em todos os



estágios das curvas. Isto é muito raro, e normalmente os dois quadrantes inferiores possuem o formato triangular, como pode ser visto na figura 11.

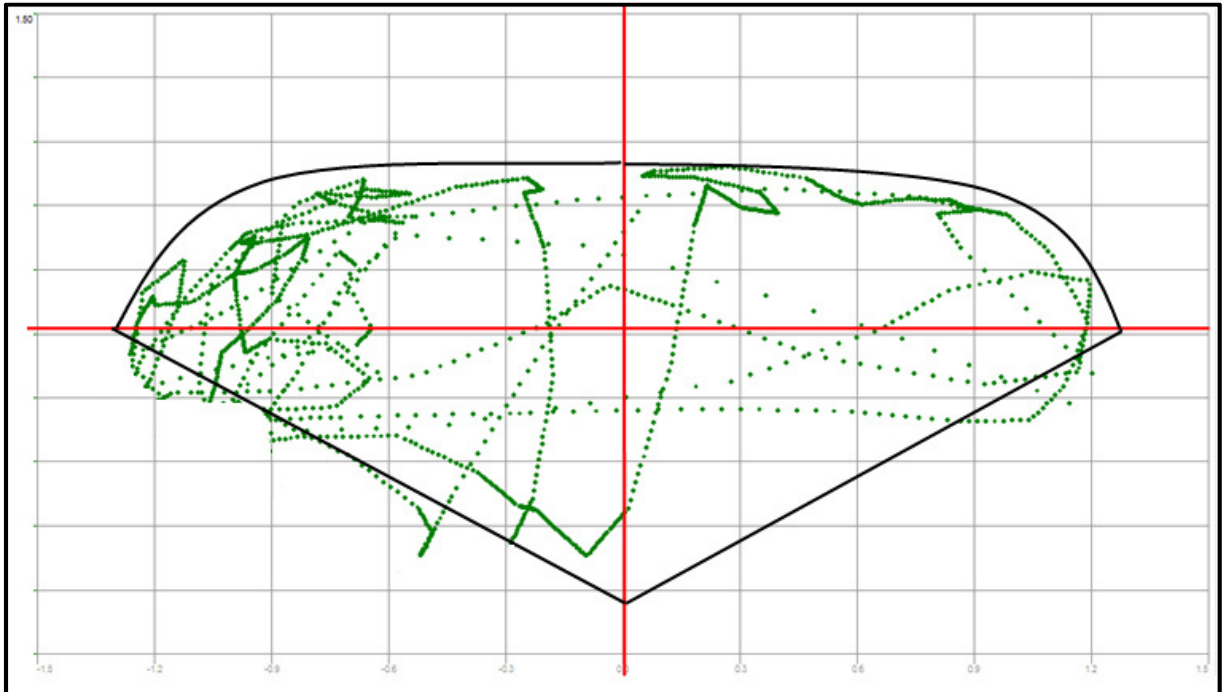


Figura 11 – Representação gráfica do diagrama g-g extraído do sistema de aquisição de dados.  
Fonte: Autor.

## 2.2 Sub e sobreesterçante / neutro

Conforme Gillespie (1992), um veículo tem comportamento neutro quando em uma curva de raio constante, variando a velocidade, nenhuma alteração do volante é necessária. O comportamento é subesterçante quando em uma curva de raio constante, aumentando-se a velocidade, é necessário aumentar o ângulo de esterço do volante. Finalmente, o comportamento sobreesterçante, em uma mesma condição de raio constante e velocidade variável, deve-se diminuir o ângulo de esterço do volante. E essa teoria é apresentada graficamente na figura 12. Essas nomenclaturas são também conhecidas e utilizadas no Brasil como: “sair de frente” ou “sair de traseira”.

A distribuição de peso de um veículo é um dos principais fatores que indica a tendência de sair de frente ou sair de traseira. Um veículo que possui o eixo dianteiro mais pesado, tende a sair de frente. Um veículo que possui mais carga no eixo traseiro, tende a sair de traseira. Quando o centro de gravidade é equilibrado 50% na dianteira e 50% na traseira, a tendência é de o veículo ser neutro. Outros fatores devem ser levados em consideração além

da distribuição de peso, como por exemplo, geometria da suspensão, modelo e tamanho de pneu / roda, distância entre - eixos, etc.

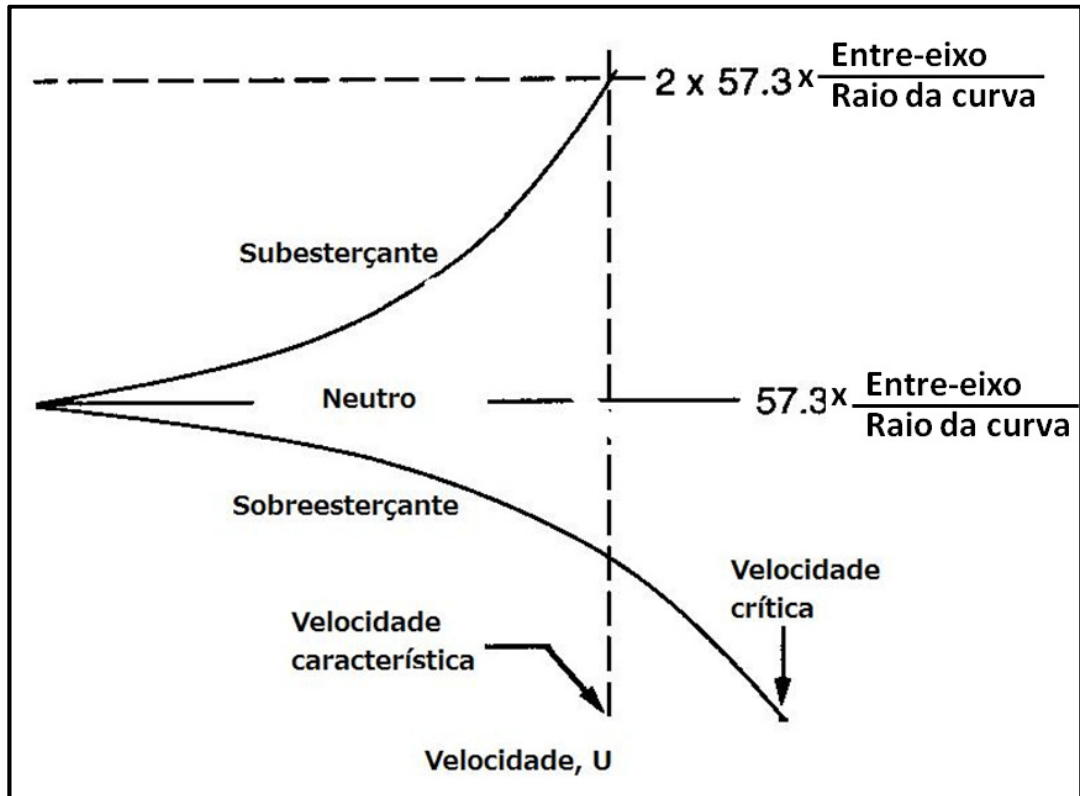


Figura 12 – Mudança no ângulo de esterço em função da velocidade  
Fonte: Gillespie, 1992, p. 204

### 2.3 Sistemas de suspensão

Segundo TREMAYNE (2006), o sistema de suspensão é um dos componentes que mais sofrem esforços em um veículo de competição. Considerando que todas as forças transmitidas por um veículo como: força lateral, força vertical, forças de aceleração e desaceleração são iniciadas através do contato do pneu com o solo e então agem no chassi pela unidade pneu/roda, passando pelo conjunto ponta/manga de eixo e finalmente chegam a unidade mola/amortecedor, que estão conectados no chassi através do “push ou pullrod”, conforme pode ser visto na figura 13.

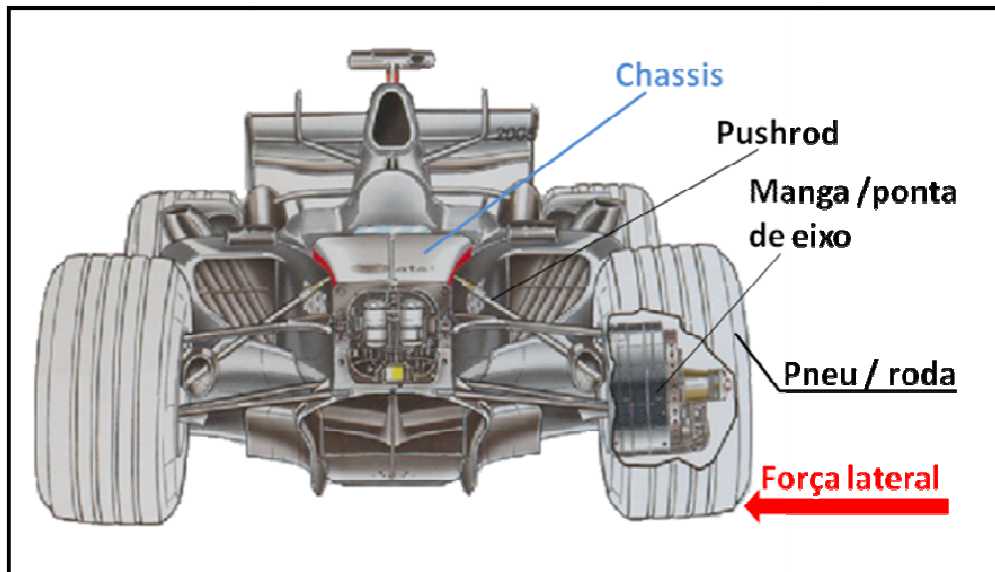


Figura 13 – Diagrama de entrada das forças através do sistema de suspensão – McLaren MP4-20  
 Fonte: Piola, 2006, p. 67

Conforme Wright (2001), em um veículo de corrida, os requisitos para os links que conectam o chassi nas rodas são:

- a) Baixo peso;
- b) Alta tensão de escoamento;
- c) Alta rigidez, para minimizar os efeitos da deformação;
- d) Permitir as características da cinemática idealizada no projeto;
- e) Habilidade para configurar os “links” que distribuem as forças nas rodas para o chassi de maneira apropriada
- f) Mínima influência aerodinâmica (Para categoria “open wheelers” apenas)

O uso das juntas esféricas nas articulações garante que elas serão submetidas somente a tração pura e compressão sem sofrer flexão, o que permite atingir os 3 primeiros objetivos citados acima. Quando é utilizada a geometria com perfil de asa, o requisito “f” de mínima influência aerodinâmica é atingido também. Ferramentas computacionais para simular o movimento dos sistemas de suspensão são utilizadas de maneira muito eficaz, como por exemplo, o MD ADAMS R3<sup>®</sup> e através dessas ferramentas, é possível aperfeiçoar o layout e a cinemática de todo o sistema.

### 2.3.1 Duplo braço triangular

Essa é a geometria mais utilizada nos veículos de competição. Segundo Wright (2001), a geometria do tipo duplo braço triangular com “push-rod” empregado em um carro de Formula 1 é um triunfo de simplicidade e também de design elegante. Cada link é otimizado para resistência, rigidez, peso e influência aerodinâmica (Baixo arrasto e efeito aerodinâmico durante a curva). As figuras 14 e 15 mostram o protótipo da FEI RS3, utilizado na competição Formula SAE em 2007, no Brasil e em 2008 na Califórnia EUA, onde é possível observar o sistema de duplo braço triangular empregado tanto na dianteira como na traseira.

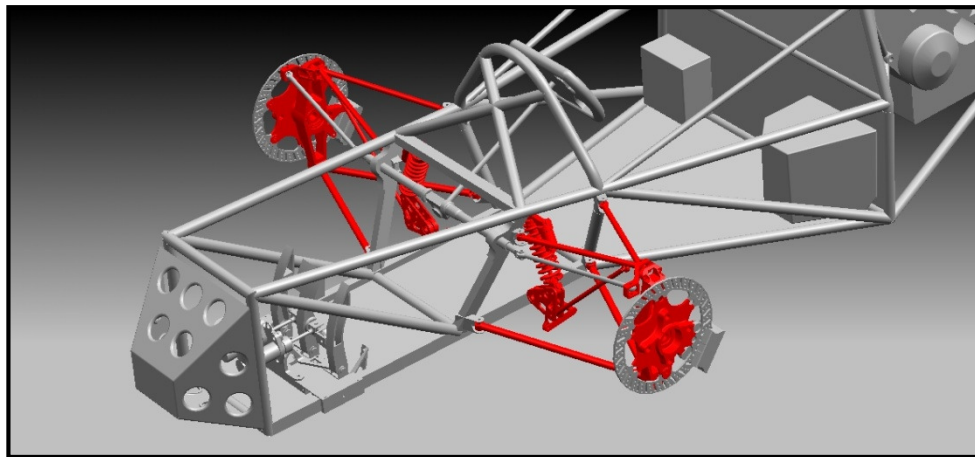


Figura 14 – Suspensão dianteira do RS3  
Fonte: Cortesia equipe Formula FEI

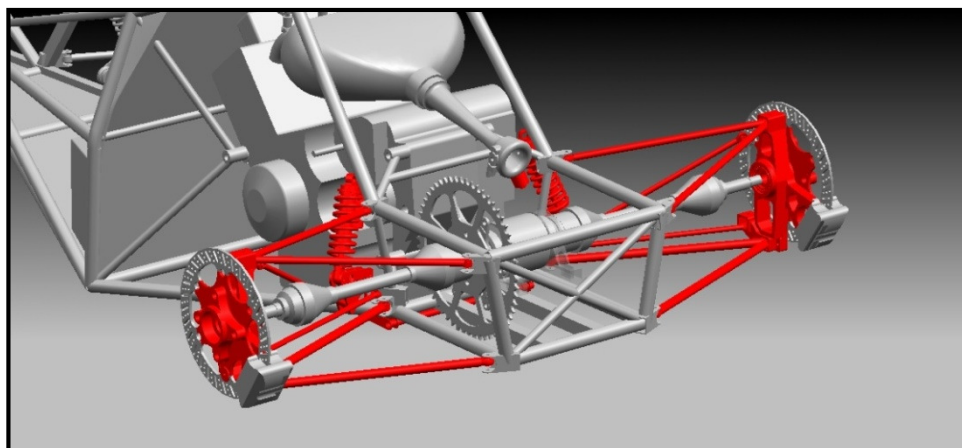


Figura 15 – Suspensão traseira do RS3  
Fonte: Cortesia equipe Formula FEI

A utilização do sistema de aquisição de dados contribui de maneira eficiente na verificação dos parâmetros adotados no projeto da suspensão, como por exemplo, cambagem, caster, rigidez das molas e o coeficiente de amortecimento. O gráfico da figura 16 representa

o deslocamento da suspensão em função da distância percorrida e é dividido entre dianteira (esquerda e direita) e traseira (esquerda e direita).

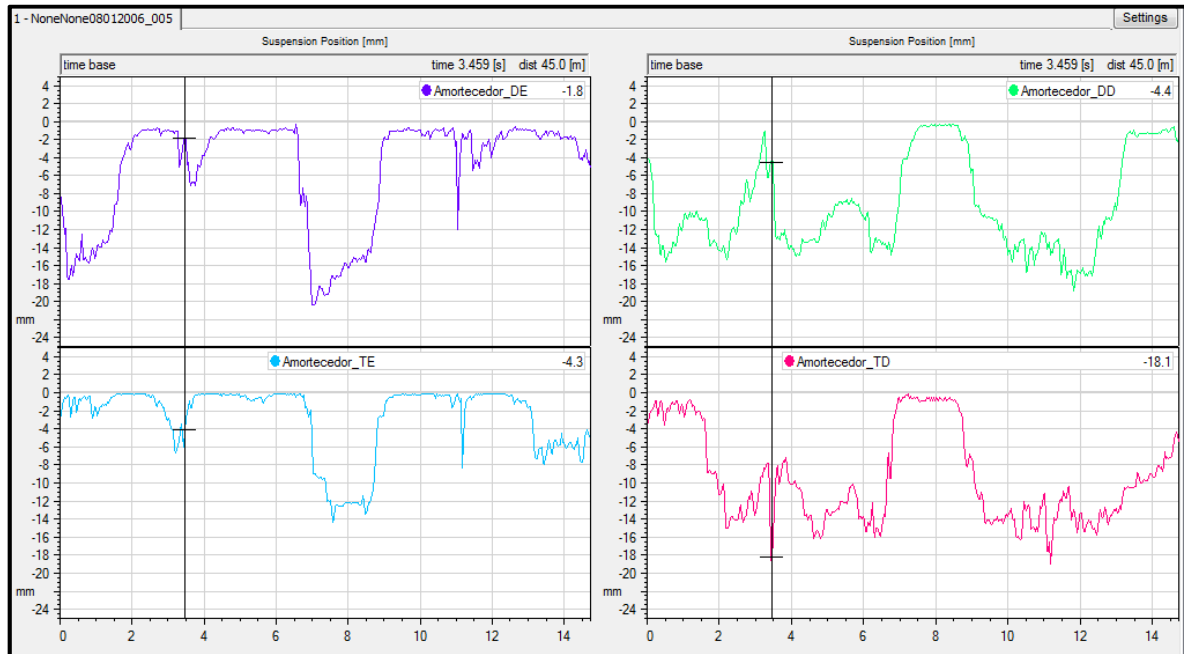


Figura 16 – Análise do trabalho da suspensão obtido no sistema de aquisição de dados  
Fonte: Autor.

Os dados são estudados pela a equipe e alimentados nos programas de simulação para a realização da correlação dos parâmetros de projeto e os resultados em pista. Na figura 17, pode-se observar a modelagem da suspensão dianteira do veículo RS-3 no software MD ADAMS R3<sup>®</sup>.

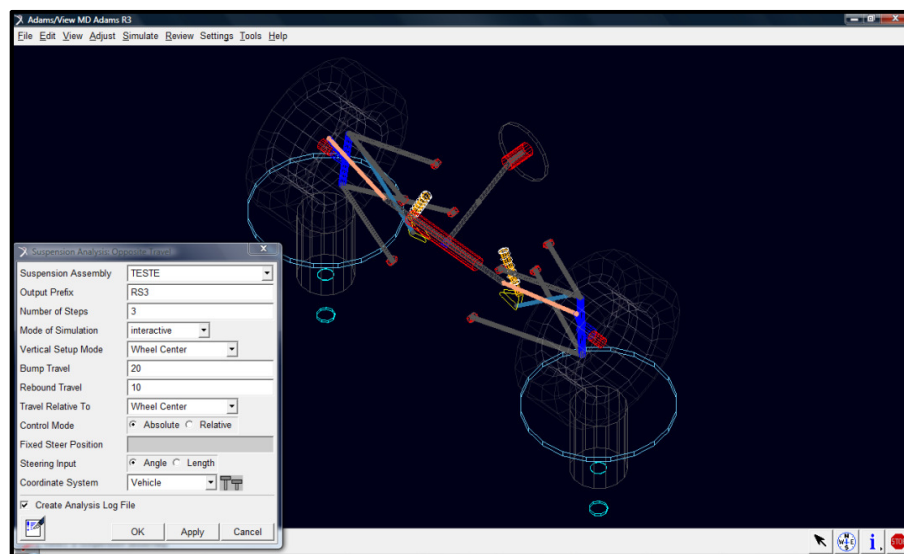


Figura 17 – Modelagem da suspensão no software MD ADAMS R3<sup>®</sup>  
Fonte: Cortesia equipe Formula FEI.

Ao modelar o sistema da suspensão no software MD ADAMS R3<sup>®</sup>, é possível obter o gráfico da cambagem em função do deslocamento da suspensão, conforme a figura 18.

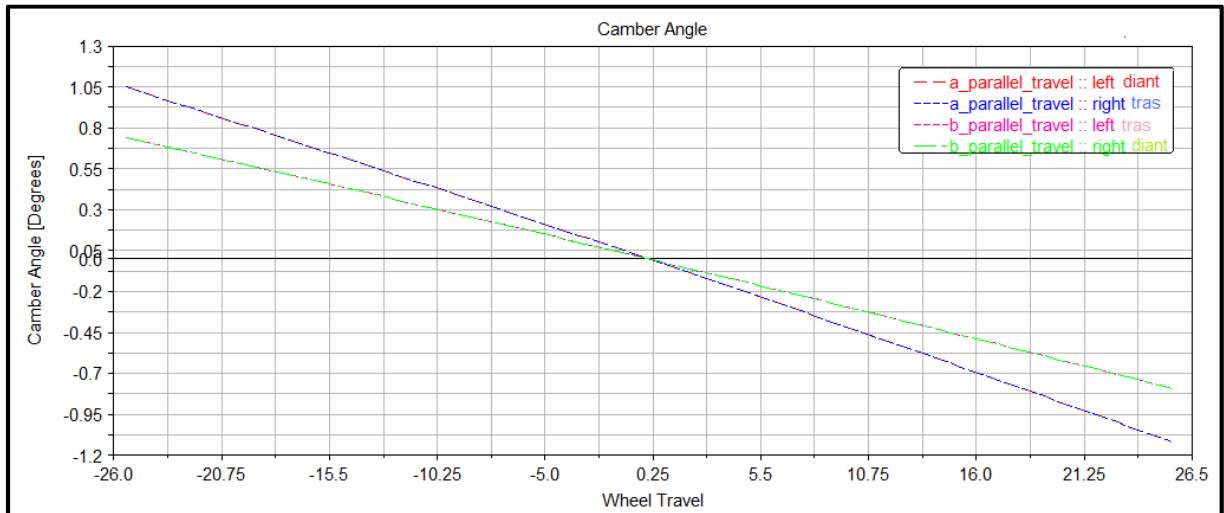


Figura 18 – Ângulo de cambagem em função do curso da suspensão obtidos software MD ADAMS R3<sup>®</sup>  
Fonte: Cortesia equipe Formula FEI.

É possível observar através do gráfico da figura 18 que ambas as suspensões, dianteira e traseira, possuem comportamento linear e apresentam ganho de aproximadamente 1 grau em seu deslocamento máximo de 25 mm. Posteriormente, no capítulo 4, serão apresentados resultados das aquisições obtidos nas competições e nos testes realizados pela equipe Fórmula FEI, onde será possível verificar os ângulos de cambagem de cada roda em qualquer trecho da pista.

### 2.3.2 Manga de eixo

De acordo com Tremayne (2006), a manga de eixo exerce algumas funções com alto grau de exigência. Nela são montados os braços de suspensão, direção e os push/pullrod. Existe também o alojamento para montar o rolamento da roda e a fixação da pinça de freio, como pode ser visto na figura 19. Em aplicações de competição, ela ainda é utilizada como meio de refrigeração do disco de freio. Portanto, a função estrutural é o quesito primordial na concepção desse componente.

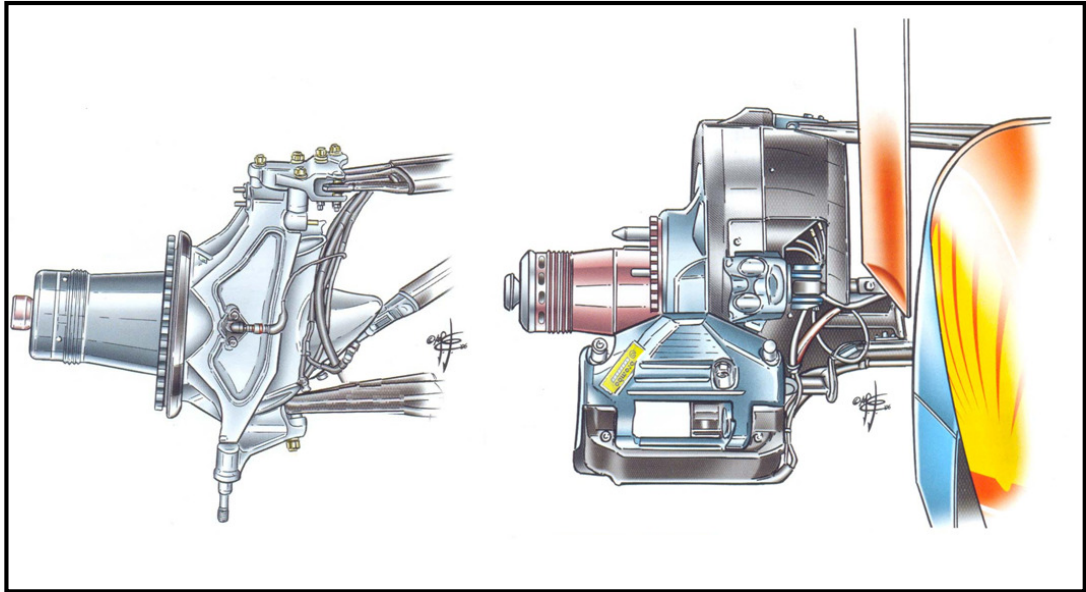


Figura 19 – Esquerda: manga dianteira da McLaren MP4/21. Direita: manga traseira Ferrari 248 F1  
Fonte: Piola, 2006, p. 23

A manga deve conectar os pontos no espaço, determinados pela geometria de suspensão escolhida pelo projetista, conforme pode ser observado na figura 20. Para garantir o funcionamento correto do sistema de suspensão, a manga deve ser estruturalmente rígida, de modo que permita o menor deslocamento possível provocado pelas forças atuantes durante o seu funcionamento. Se houver um mínimo deslocamento, não será afetada apenas a geometria, mas também será provocado um movimento não amortecido no caminho entre o pneu e o amortecedor. Esse movimento não controlado pelo amortecedor, pode influenciar na resposta da direção, gerando um atraso na sensação para o piloto; pode também reduzir a capacidade de suportar forças laterais, tornar o veículo mais sensível a ondulações ou também a combinação de todos esses problemas. A manga também deve ser dimensionada para suportar as altas forças provenientes do rolamento da roda em função da frenagem, aceleração, e forças laterais; além disso, nos veículos de competição, elas devem suportar altas temperaturas provenientes dos discos de freio. Em um carro de Formula 1, por exemplo, essas temperaturas chegam a ultrapassar 1.200° C em condições extremas de frenagem. Isso só é possível com a utilização de discos de freio construídos com fibra de carbono; portanto, a manga de eixo deve suportar as mais severas condições de funcionamento.



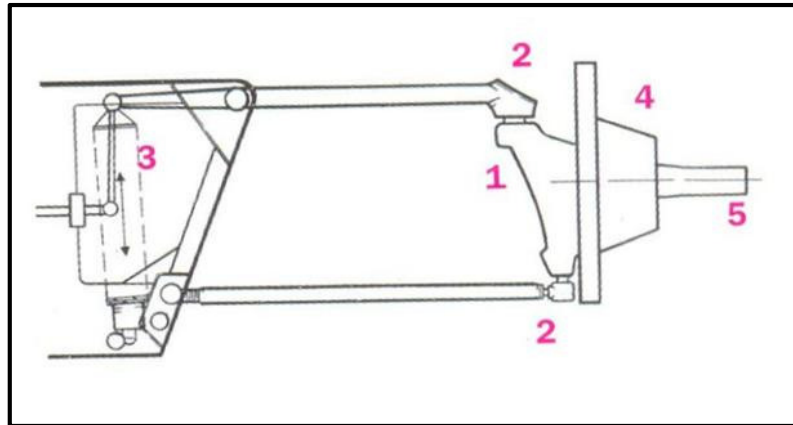


Figura 20 – Vista frontal de uma típica suspensão dianteira: (1) Manga de eixo; (2) Junta esférica dos braços superiores e inferiores; (3) Unidade mola / amortecedor; (4) Cubo e disco de freio; (5) Ponta de eixo.  
Fonte: Formula 1 magazine, 2003, p. 129

Na Fórmula 1, nos anos 50, as mangas eram feitas de aço forjado a fim de garantir a resistência e durabilidade adequada para os esforços da época. Na década de 60, Colin Chapman, obcecado por baixo peso e “design” elegante, foi o pioneiro na utilização de ligas de magnésio. Mesmo com a evolução dos veículos na década de 70, devido ao aumento da potência para 400 HP e o aumento das forças laterais devido aos pneus de maior desempenho, a liga de magnésio continuou sendo o material utilizado pelos projetistas, apesar da evolução geométrica como a introdução da fixação das pinças de freio e também funções para o controle da direção. No final da década de 70, com a introdução dos veículos com o efeito solo, existiu a necessidade de diminuir o tamanho das mangas para melhorar o fluxo de ar na lateral do veículo, porém mantendo a função estrutural, que a cada ano aumentava consideravelmente. Chapas de aço soldadas passaram a ser o novo método de construção das mangas. No início da década de 80, os engenheiros projetistas no intuito de reduzir peso, utilizaram o titânio, mas devido a dificuldade de soldar o material abandonaram esse método de fabricação e o piloto francês Patrick Depailler pagou com a sua própria vida nos testes em Hockenheim em 1980. O titânio só voltou a ser utilizado quando foi desenvolvido um novo processo de fabricação no final da década de 80, onde se permitiu utilizar uma peça única e usinada a partir de um bloco. A década de 90, continuou tendo o titânio como matéria prima da construção, porém as geometrias evoluíram bastante com o objetivo de redução do peso e maior rigidez. Isso só foi possível através de pesquisas avançadas, análises computacionais e processo de manufatura. A partir de 2001, a Ferrari introduziu uma nova concepção de material, que era uma mistura de uma liga de metal nóbre combinado com fibra de carbono, formando um material extremamente caro, porém com baixo peso e com altíssima rigidez.



Esse novo material, conhecido com “metal matrix”, permitiu reduzir a massa de 1,1 kg para 900g em relação a manga de titânio, uma porcentagem bastante significativa. Portanto, o metal matrix é o material utilizado atualmente pelas equipes de ponta da Fórmula 1.

As mangas também têm um papel fundamental no quesito segurança. Na Formula 1, por exemplo, por imposição da FIA, cabos de segurança devem ser conectados na manga para dificultar que as rodas se soltem em caso de acidente, conforme pode ser visto na figura 21.

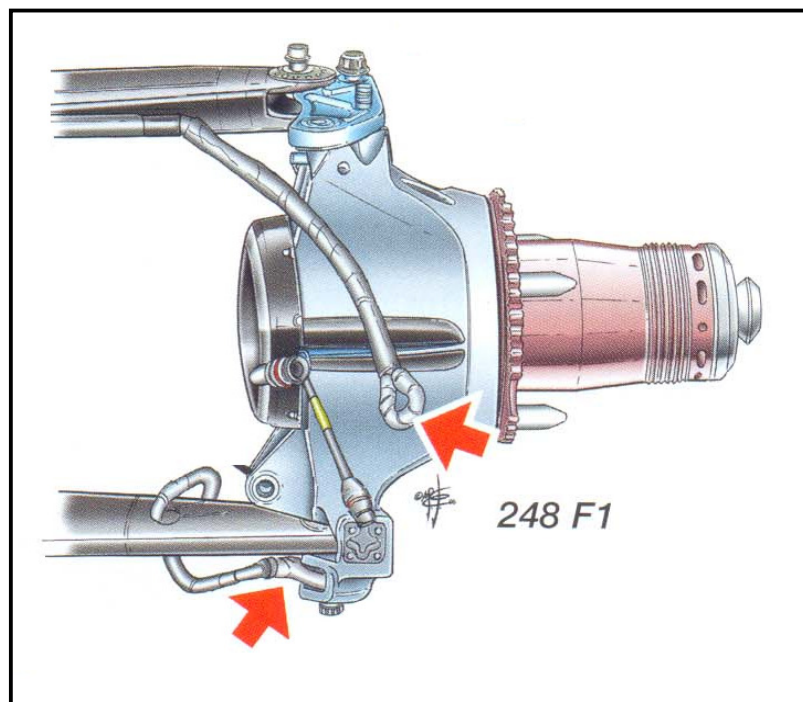


Figura 21 – Manga dianteira da Ferrari 248 F1  
Fonte: Piola, 2006, p. 23

## 2.4 A relação entre caster, camber e inclinação do pino mestre.

### 2.4.1 Camber

De acordo com a norma DIN 70 000, camber é o ângulo formado pelo plano do centro da roda em relação ao plano vertical normal a superfície do pavimento. Ele é positivo se a roda for inclinada para o lado de fora do veículo, vide figura 22, ou negativo, quando a roda é inclinada para dentro do veículo, conforme pode ser visto na figura 23.

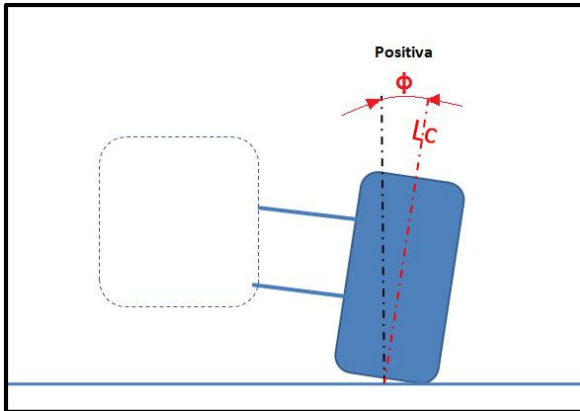


Figura 22 – Ângulo de cambagem positiva  
Fonte: Autor.

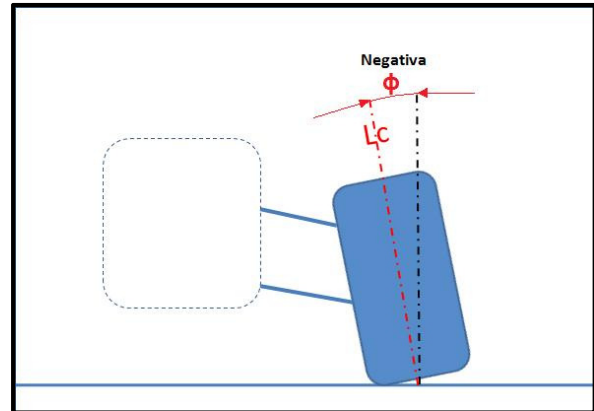


Figura 23 – Ângulo de cambagem negativa  
Fonte: Autor.

Conforme Reimpell, Stoll e Betzler (2001), quando um veículo de passeio é carregado com dois ou três passageiros, é necessário utilizar um ângulo de cambagem levemente positivo, que permite o alinhamento da banda de rodagem com o solo, conforme a movimentação da suspensão devido ao carregamento. A cambagem é negativa quando a suspensão é comprimida, e positiva quando a suspensão é distendida, conforme a figura 24.

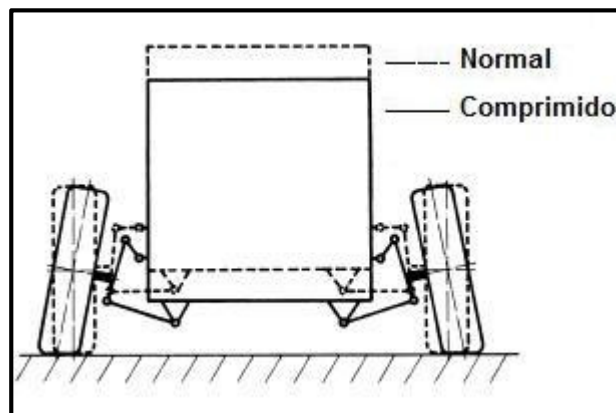


Figura 24 – Modificação do ângulo de cambagem durante o trabalho da suspensão.  
Fonte: Reimpell, Stoll e Betzler 2001, p. 179

Nos carros de Fórmula 1, na suspensão dianteira, onde o curso é muito pequeno, é comum a utilização de um ângulo de cambagem negativa relativamente alto, chegando até 4 graus. Essa configuração garante que o pneu mantenha o máximo contato com a superfície da pista durante a curva, uma vez que o veículo se inclina durante a curva e a suspensão não movimenta o suficiente para recuperar tal inclinação. No Formula SAE, o ângulo de cambagem ( $\phi$ ) é determinado através de duas maneiras: estático ou dinâmico. No primeiro caso, ele é obtido e regulado pela diferença de comprimento dos braços da suspensão. No

segundo caso, o ângulo varia de acordo com a movimentação da suspensão, que pode ser um recurso valioso para as características de dirigibilidade do veículo. Para a suspensão traseira, é importante tomar cuidado com o ângulo de cambagem, pois quanto maior o ângulo, menor é a área de contato do pneu com o solo; conseqüentemente, o veículo sofrerá com a perda de tração que na maioria das vezes é indesejável, como pode ser visto na figura 25. Utilizando um sistema de aquisição de dados é possível identificar se o ângulo de cambagem está excessivo através do monitoramento das temperaturas em três pontos distintos do pneu (centro, lados internos e externos), que pode ser feito utilizando três sensores infra-vermelho em cada pneu.

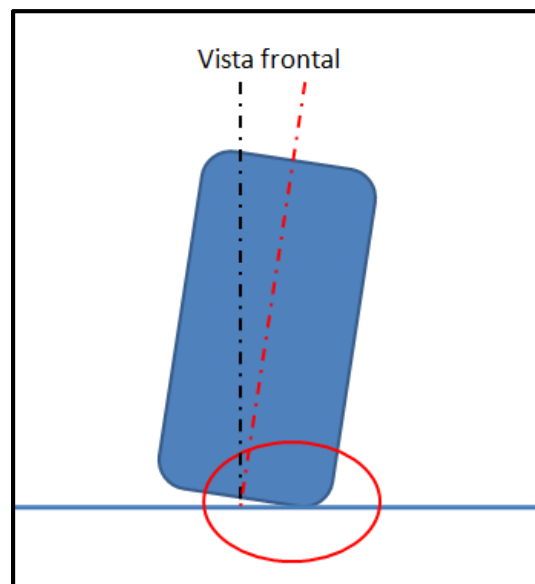


Figura 25 – Ponto de contato do pneu com o solo.

Fonte: Autor.

#### 2.4.2 Caster

De acordo com a norma DIN 70 020 (e também DIN 70 000), o ângulo do caster ( $\tau$ ) é determinado pela inclinação do eixo da manga em relação à linha vertical do centro da roda, ele pode ser positivo ou negativo, como mostra a figura 26.

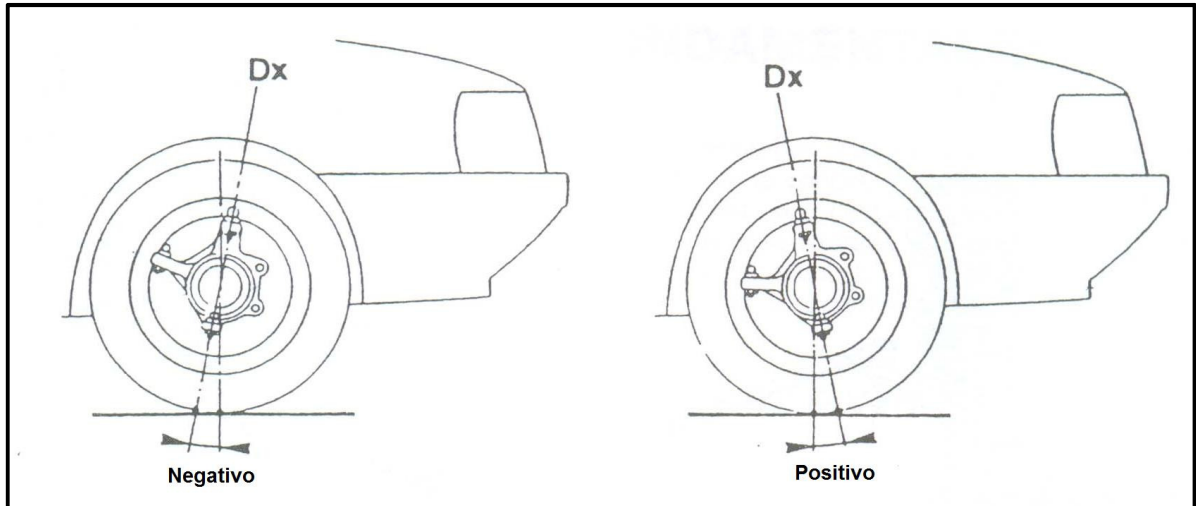


Figura 26 – Ângulo do *caster*  $\tau$ .  
 Fonte: Halconruy, 1995, p. 60

Normalmente nos veículos de passeio e também nos veículos de competição, utiliza-se o valor do ângulo do *caster* positivo. O Formula SAE, por exemplo, utiliza *caster* positivo de  $3^\circ$ , esta configuração permite que, em condições de esterço durante uma curva, a roda interna ganhe cambagem positiva, e a roda externa cambagem negativa. Essa característica, segundo Haney (2003), ajuda o veículo a fazer a curva devido a inclinação das rodas. Outro componente importante a ser estudado é o “*caster trail*”, que pode ser observado na figura 27. A distância  $t$  projetada no solo, exerce o papel de alavanca e contribui com um momento que é denominado de “*self-align steering*”, ou momento auto alinhante. O “*caster trail*” é responsável por transmitir a sensação ao piloto que o limite da aderência está se aproximando.

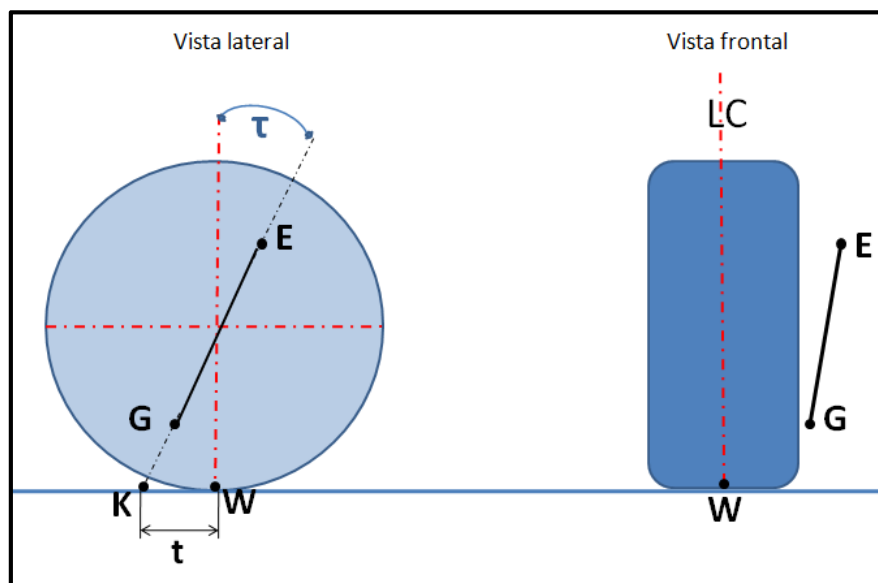


Figura 27 – *Caster trail* ( $C_t$ ) é a cota do ponto K ao W, e depende do ângulo do *caster*  $\tau$   
 Fonte: Autor

### 2.4.3 Inclinação do pino mestre

De acordo com a norma ISO 8855, a inclinação do pino mestre  $\sigma$  é dada pelo ângulo formado entre a linha de centro da manga de direção e a linha vertical do centro da roda, conforme pode ser observado na figura 28, sendo que o braço à terra é dado pela cota do ponto I ao ponto W, podendo ser positivo ou negativo. O braço à terra Bt ajuda o piloto sentir os obstáculos e as ondulações da pista, e deve ficar entre 25 a 50 mm. Quanto maior o braço à terra, maiores as forças de reação no volante, e conseqüentemente maior o desconforto do piloto. Por outro lado, se o braço à terra for muito baixo, o piloto perde a sensação da pista (Riley, 2002).

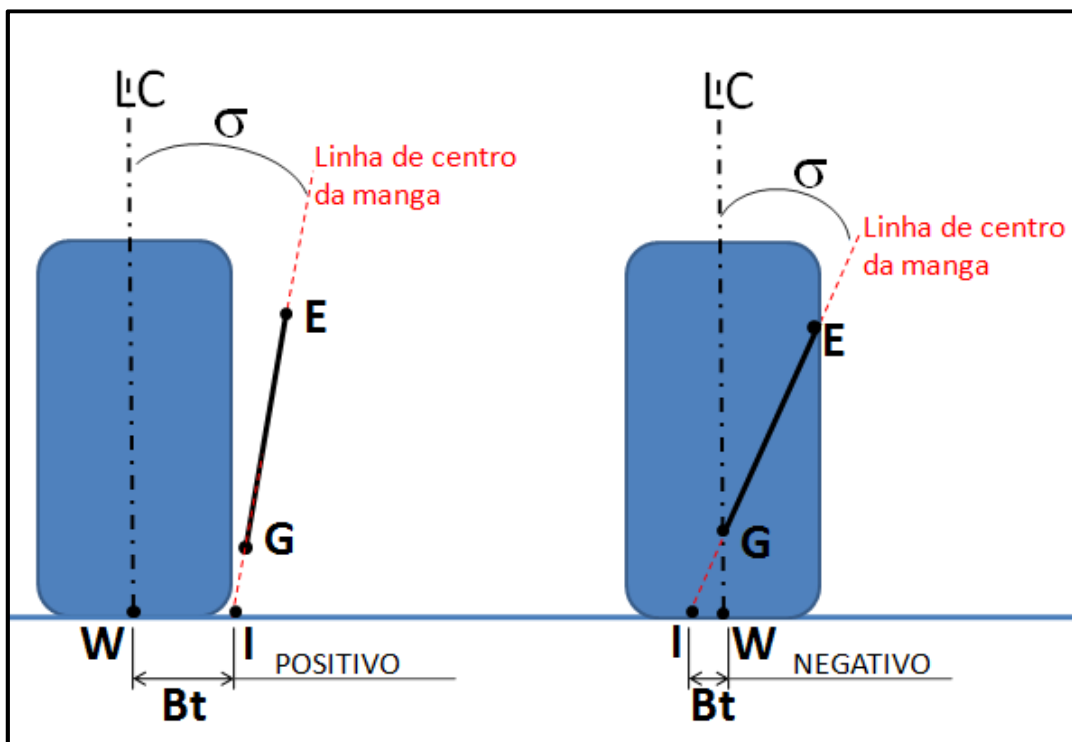


Figura 28 – Ângulo do pino mestre  $\sigma$  e a representação do braço à terra.  
Fonte: Autor.

## 2.5 Definições de centro e eixo de rolagem.

### 2.5.1 Determinação do centro instantâneo

O primeiro passo para a determinação do eixo de rolagem é a determinação do centro instantâneo. De acordo com Milliken & Milliken (1995), a palavra instantâneo significa o ponto exato em que os braços da suspensão se encontram. E a palavra centro, refere-se a

projeção imaginária dos eixos dos braços de suspensão naquele dado instante, como pode ser visto na figura 29.

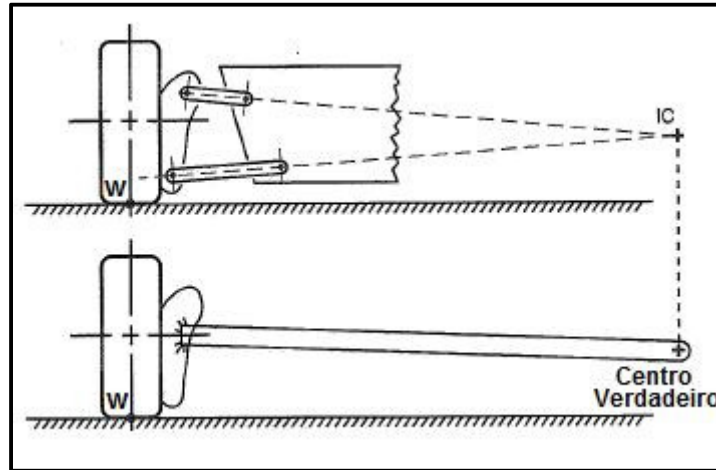


Figura 29 – Determinação do centro instantâneo.  
Fonte: Milliken & Milliken, 1995, p. 611

Na figura 29, ainda pode ser observada uma situação hipotética, como os dois braços curtos podem ser substituídos por um único braço de tamanho maior. Quando a suspensão se movimenta, o centro instantâneo é alterado a cada instante, e com isso é possível controlar, através do projeto e concepção da suspensão, como e de qual maneira o centro instantâneo será movimentado.

Segundo Milliken & Milliken (1995), a projeção imaginária das linhas de centro dos braços de suspensão devem ser aplicadas tanto na vista frontal, quanto na vista lateral do veículo. Quando analisamos a vista frontal, é possível determinar a variação da cambagem, movimentação do braço à terra, e os dados para determinação das características da direção. Quando a vista lateral é analisada, é possível determinar a variação do caster.

### 2.5.2 Determinação do eixo instantâneo

O eixo instantâneo é determinado através da união do centro instantâneo central e o lateral, formando um plano 3D, conforme pode ser visto na figura 30. A linha denominada como eixo instantâneo representa o eixo ao qual a manga movimenta-se em relação ao veículo.

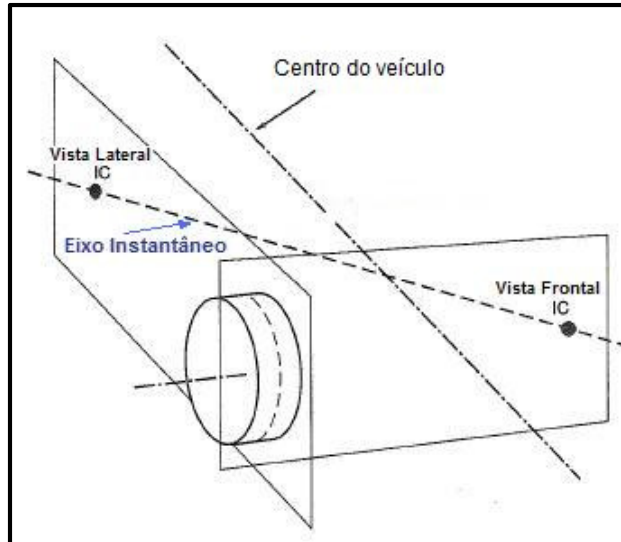


Figura 30 – Determinação do eixo instantâneo.  
Fonte: Milliken & Milliken, 1995, p. 613

### 2.5.3 Determinação do centro de rolamento

Para a determinação da altura do centro de rolamento, é necessário aplicar os conceitos de determinação do centro instantâneo. Segundo Milliken & Milliken, deve-se traçar uma linha partindo do ponto de contato do pneu com o solo (W) até o centro instantâneo da suspensão na vista frontal. Esse procedimento deve ser aplicado nos dois lados. O centro de rolamento é encontrado no cruzamento das duas linhas projetadas. Quando temos um veículo simétrico, o centro de rolamento é obrigatoriamente projetado na linha de centro do veículo, conforme a condição a da figura 31. Na condição de veículo assimétrico, o centro de rolamento do veículo não é projetado na linha de centro do veículo, vide condição b da figura 31.

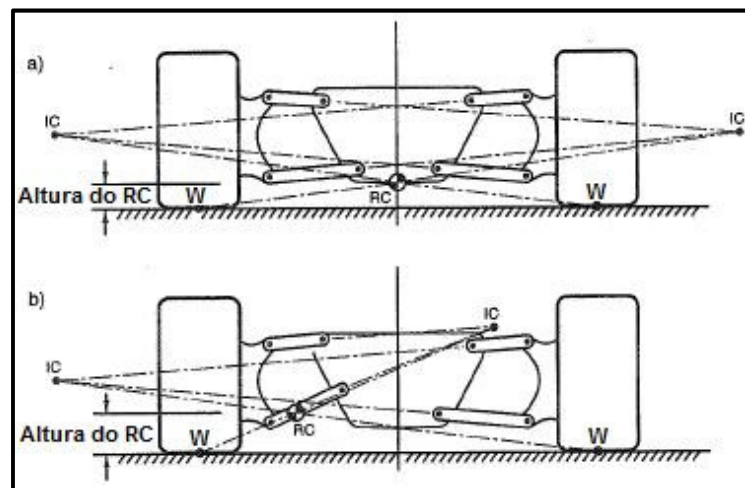


Figura 31 – Determinação da altura do centro de rolamento.  
Fonte: Milliken & Milliken, 1995, p. 614

#### 2.5.4 Determinação do eixo de rolamento

De acordo com Smith (1978), o centro de rolamento do veículo é determinado através de um eixo imaginário que conecta o centro de rolamento da dianteira com o centro de rolamento da traseira, conforme pode ser visto na figura 32.

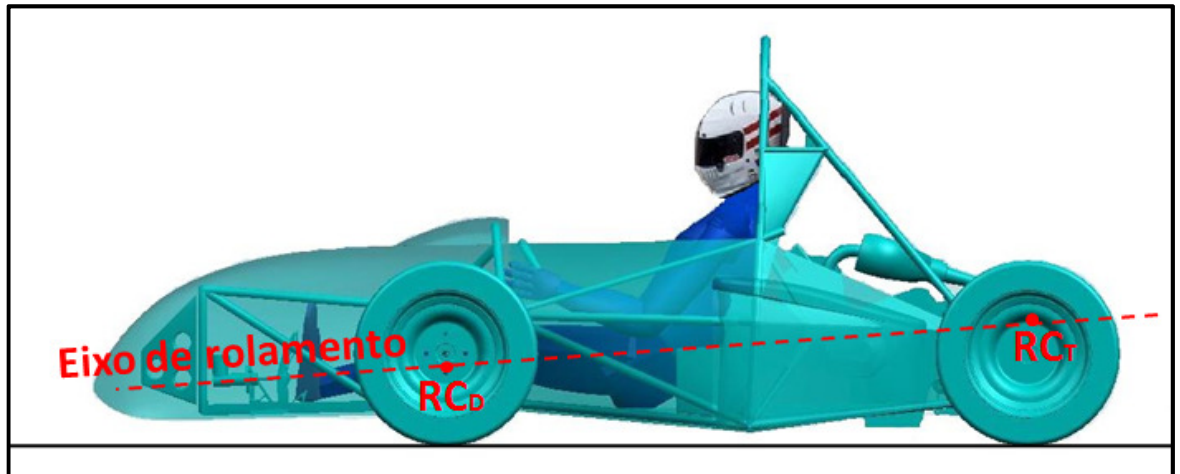


Figura 32 – Eixo de rolamento.  
Fonte: Autor

A determinação do eixo de rolamento é de suma importância no projeto da suspensão porque, é possível prever a maneira que o veículo vai rolar durante as curvas. Além disso, os valores de transferência de carga também poderão ser determinados a partir da construção desse eixo. Os conceitos de transferência de carga serão estudados no capítulo de dinâmica lateral e longitudinal.

#### 2.6 Convergência e divergência

Segundo Rill (2007), o ângulo de convergência/divergência é formado pela linha de centro do pneu em relação ao eixo longitudinal do veículo, conforme pode ser visto na figura 33. Quando a extensão das linhas tende a se encontrar na frente do eixo, a geometria é considerada convergente. Se as extensões das linhas tendem a se encontrar para trás do eixo, o sistema é considerado divergente.



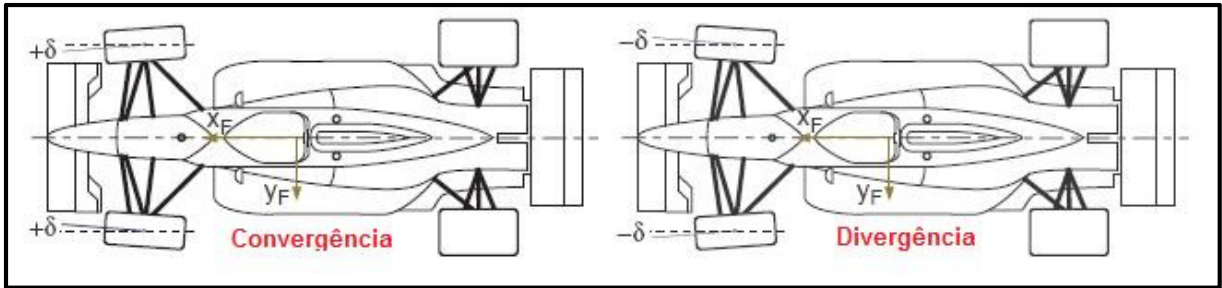


Figura 33 – Convergência / Divergência  
 Fonte: Rill, 2007, p. 4

A quantidade de convergência / divergência é expressa em graus e afeta a performance do veículo nas três seguintes características: desgaste do pneu, estabilidade em linha reta, dirigibilidade na entrada de curvas. Para minimizarmos o desgaste dos pneus e a perda de potência, os pneus devem estar alinhados com o eixo central do veículo durante a reta. Convergência / divergência em excesso causa o arrasto indesejável dos pneus. A configuração convergente melhora a estabilidade direcional, além de reduzir a tendência de trepidação do volante.

## 2.7 Geometria de direção

### 2.7.1 Geometria de Ackermann

Segundo Milliken & Milliken (1995), para os veículos que esterçam as rodas dianteiras, a geometria dos links de esterçamento irá determinar se as rodas ficarão paralelas ou se uma roda irá esterçar mais que a outra. Essa diferença no ângulo de esterçamento para direita ou esquerda não deve ser confundida com a convergência / divergência, citada anteriormente, que são ajustes estáticos e serão apenas somados aos efeitos da geometria Ackermann. A figura 34 representa as três condições para a geometria de Ackermann.

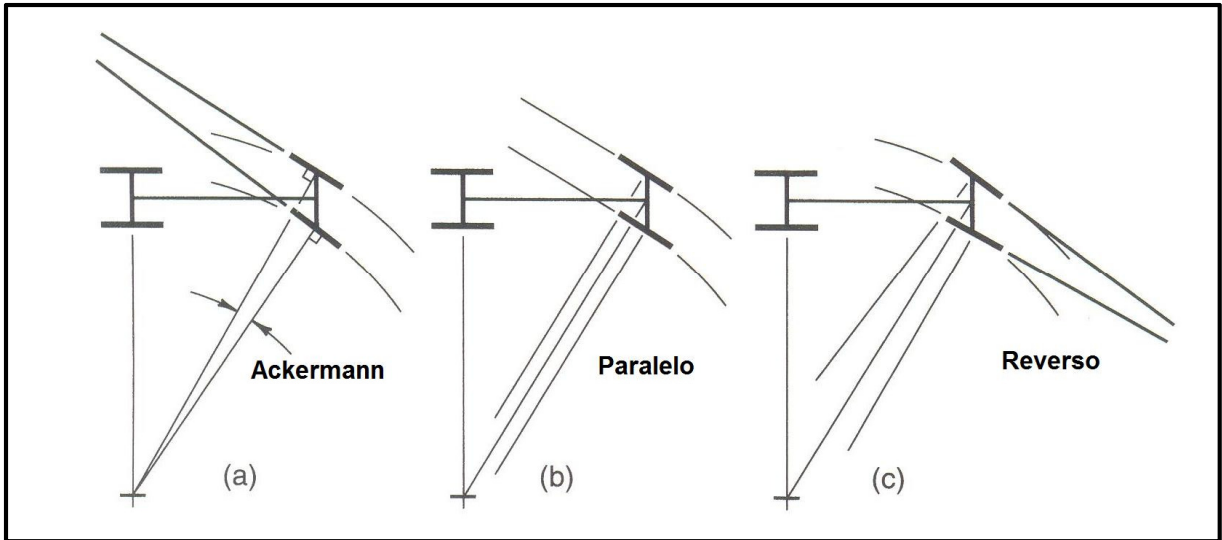


Figura 34 – Geometria de direção Ackermann  
 Fonte: Milliken & Milliken, 1995, p. 714

A geometria de Ackermann é normalmente utilizada em veículos cuja aceleração lateral é baixa. De acordo com Milliken & Milliken (1995), isso ocorre principalmente quando o veículo está em baixa velocidade e as 4 rodas possuem raios significativamente diferentes. Por outro lado, quando a aceleração lateral aumenta, os pneus operam com ângulo de escorregamento e, portanto, as rodas internas têm um ângulo de escorregamento muito menor do que as rodas externas devido à força normal.

Dependendo das características do projeto, as rodas traseiras também podem esterçar. O protótipo RS3 foi desenvolvido para que o efeito “toe-out” ocorra quando a suspensão é comprimida. Isso significa que durante uma curva para a direita, a roda do lado oposto (esquerdo) será ligeiramente esterçada para esquerda. Isso faz com que o veículo tenha características “over-steer”, ou seja, com tendência a sair de traseira. De acordo com Reimpell, Stoll e Betzler (2001), a variação do ângulo de esterçamento das rodas traseiras ( $\Delta\delta_T$ ) pode ser visto na figura 35. Quando o ângulo de esterçamento  $\Delta\delta_T$  é no sentido oposto das rodas dianteiras, o veículo tende a sair de traseira. Se o esterçamento for no mesmo sentido das rodas dianteiras, o veículo tende a sair de frente. Existem várias maneiras de obter o esterçamento das rodas traseiras, como por exemplo, através de deformação de buchas. Porém, no RS3, esse deslocamento é obtido através dos “toe-links” de uma maneira direta e controlada.

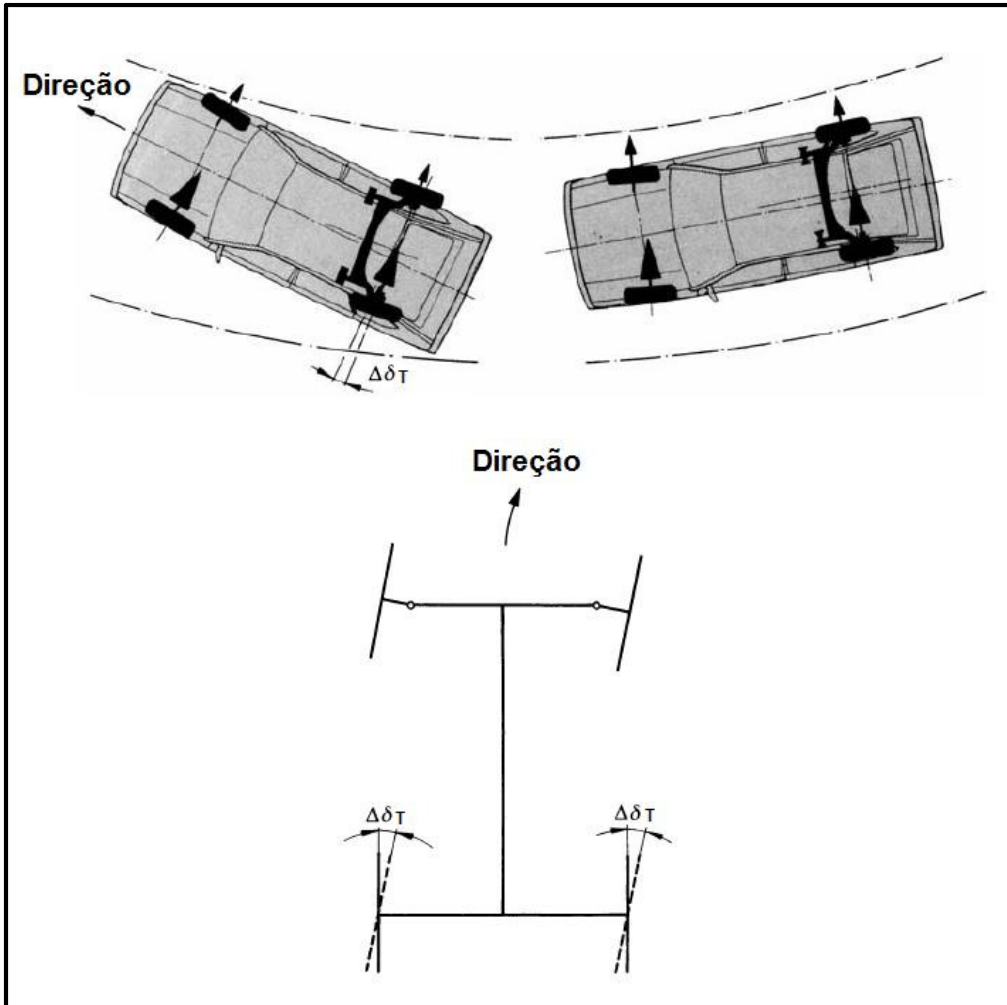


Figura 35 – Ângulo de esterçamento  $\Delta\delta_T$  das rodas traseiras.  
 Fonte: Reimpell, Stoll e Betzler 2001, p. 196

A fim de evitar o desalinhamento das rodas durante o deslocamento da suspensão, é necessário realizar o posicionamento do “tie-rod” de maneira que não ocorra o “bump-steer”. Na figura 36, é possível observar o roteiro para o posicionamento do “tie-rod” em uma geometria de suspensão do tipo duplo braço triangular, onde os pontos E, C, G e D, são formados pelos braços superiores e inferiores respectivamente. O ponto U é determinado pela manga de direção. A partir daí, segundo Reimpell, Stoll e Betzler (2001), encontram-se os pontos P1, P2 e P3 juntamente com o ângulo  $\alpha$ . E finalmente, o ponto T é encontrado.

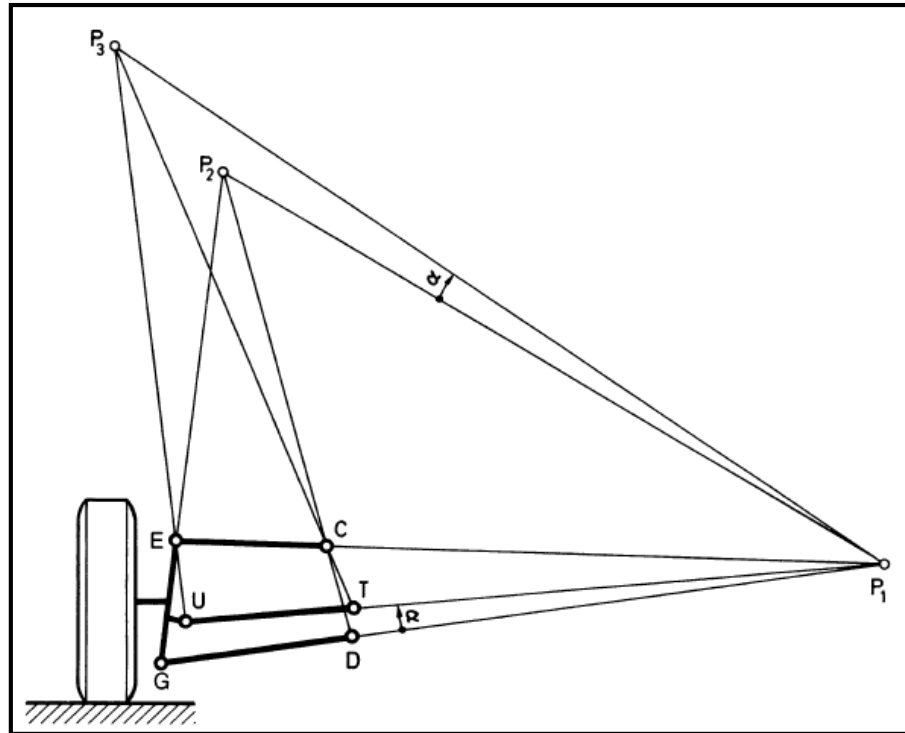


Figura 36 – Determinação do ponto T, representando a posição do *tie rod*.  
 Fonte: Reimpell, Stoll e Betzler 2001, p. 301

## 2.8 Massa suspensa / massa não suspensa

A massa total do veículo será dividida em massa suspensa ( $M_s$ ) e massa não suspensa ( $M_{ns}$ ). É importante fazer essa divisão para poder modelar o sistema de suspensão e também dimensionar as molas e amortecedores. Segundo Gillespie (1992), a massa não suspensa é a massa que não é sustentada pelo sistema de suspensão, porém é suportada diretamente pelo conjunto pneu/roda e conseqüentemente se movimenta com o conjunto. A massa suspensa corresponde a toda massa que é sustentada pelo sistema de suspensão. Para compreender melhor a influência dessas massas no comportamento do veículo, foi feito o modelo  $\frac{1}{4}$  de veículo, conforme pode ser visto na figura 37. O sistema de suspensão tem rigidez e propriedades de amortecimento ( $K_s$  e  $C_s$ ) e o pneu é representado como uma mola, porém em alguns casos um amortecedor é incluído no modelo para representar a pequena parcela de amortecimento, inerente às propriedades viscoelásticas do pneu.

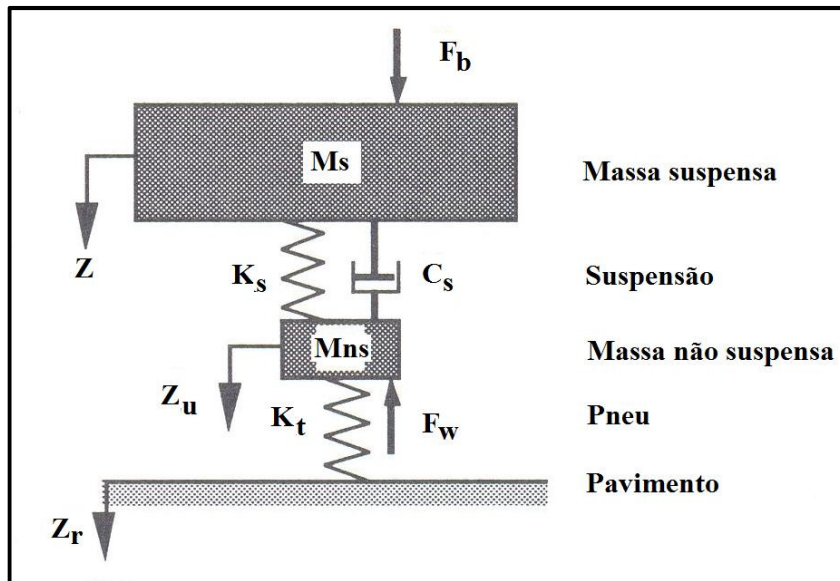


Figura 37 – Representação do modelo ¼ de veículo.  
Fonte: Gillespie, 1992, p. 147

De acordo com Gillespie (1992) a massa suspensa terá movimentação na direção vertical de acordo com a associação em série da suspensão e do pneu, conhecido também como “ride rate”.

$$RR = \frac{K_s \times K_t}{K_s + K_t} \quad (1)$$

A frequência natural do sistema não amortecido é dada por:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{RR}{M_s}} \quad (\text{rad/seg}) \quad (2)$$

Considerando o sistema amortecido, a frequência natural amortecida é dada por:

$$\omega_d = \omega_n \times \sqrt{1 - \xi_s^2} \quad (3)$$

Onde:

$$\xi = \frac{C_s}{\sqrt{4 K_s \times M_s}} \quad (4)$$

## 2.9 Dinâmica lateral e longitudinal

### 2.9.1 Sistema de coordenadas

Para os estudos de dinâmica veicular, é necessário utilizar um sistema de coordenadas, conforme pode ser observado na figura 38. Seguindo o sistema SAE, segundo Gillespie (1992) a representação das coordenadas pode ser descrita da seguinte maneira:

- a) X: Velocidade longitudinal;
- b) Y: Velocidade lateral;
- c) Z: Velocidade vertical;
- d) p: Velocidade de rolamento;
- e) q: Velocidade de arfagem;
- f) r: Velocidade de guinada.

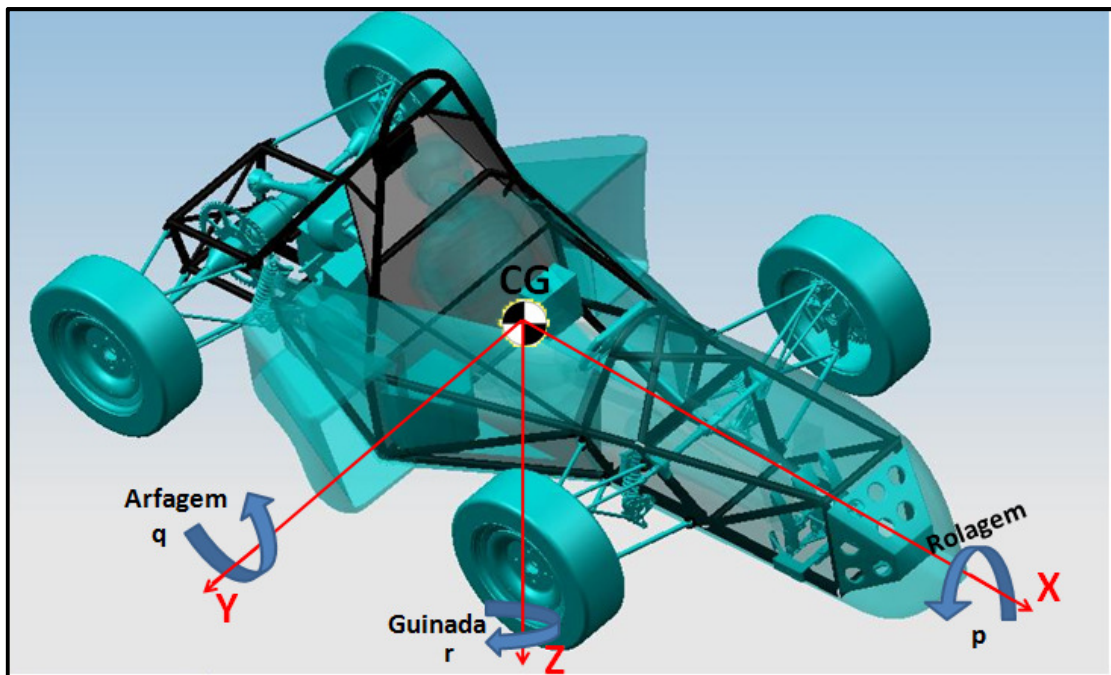


Figura 38 – Sistema de coordenadas SAE.  
Fonte: Autor

### 2.9.2 Transferência de carga longitudinal

De acordo com Milliken & Milliken (1995), quando um veículo tem aceleração positiva,  $A_x$  (Tração proveniente do motor), ou aceleração negativa,  $-A_x$  (Frenagem), surge

uma força de reação inercial no sentido oposto da aceleração  $A_X$ . De acordo com a figura 39, no momento da aceleração do veículo RS3, a força normal do eixo traseiro aumenta e consequentemente a força normal do eixo dianteiro diminui.

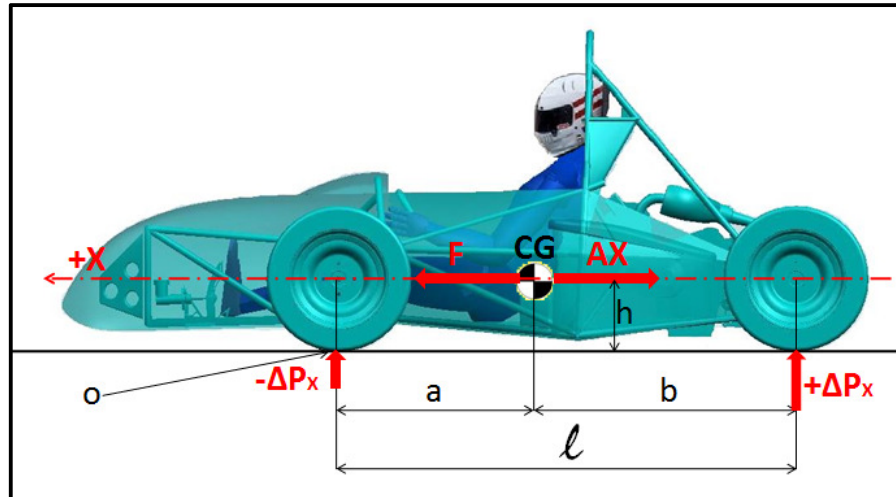


Figura 39 – Transferência de carga longitudinal durante a aceleração.  
Fonte: Autor

Onde  $\Sigma M O = 0$  temos,

$$\Delta P_X \cdot l = h \cdot \frac{P}{g} \cdot A_X \quad (5)$$

$$\Delta P_X = \frac{h}{l} \cdot \frac{P}{g} \cdot A_X \quad (6)$$

### 2.9.3 Transferência de carga lateral

O mesmo conceito é utilizado para a transferência de carga lateral. Segundo Milliken & Milliken (1995), surge uma força de natureza inercial, denominada de força centrífuga, que é a reação da aceleração lateral, iniciada através do contato pneu com o solo. A figura 40 representa o veículo durante uma curva para a direita, onde as forças produzidas pelo pneu durante a curva,  $S_E$  e  $S_D$ , resultam na aceleração lateral  $A_Y$  e na força centrífuga de reação  $F$ .

$$\text{Sendo que: } F = -P/g \cdot A_Y \quad (7)$$

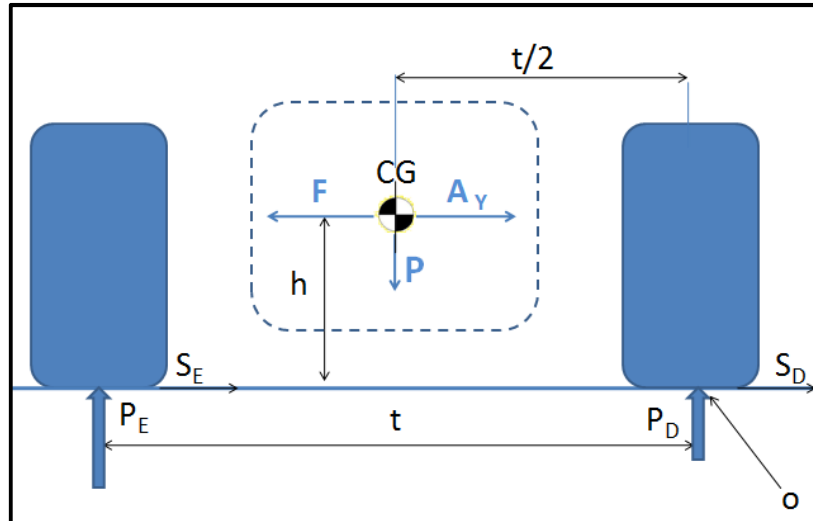


Figura 40 – Transferência de carga lateral durante curva para a direita.  
Fonte: Autor

Onde  $\Sigma M O = 0$  temos,

$$P_E \cdot t = P \left( \frac{t}{2} \right) + \frac{P}{g} \cdot A_Y \cdot h \quad (8)$$

$$P_E = \frac{P}{2} + \frac{P \cdot A_Y \cdot h}{g \cdot t} \quad (9)$$

Portanto, considerando um veículo simétrico temos a transferência lateral de carga na ordem de:

$$\Delta P = P_E - \frac{P}{2} = \frac{P \cdot A_Y \cdot h}{g \cdot t} \quad (10)$$

Onde o valor  $\Delta P$  é acrescido no lado esquerdo do veículo e diminuído no lado direito, no caso de uma curva para a direita. Os valores de transferência de carga estão diretamente associados ao desempenho do veículo na curva, portanto, é importante conhecer como é a transferência lateral de carga desde a fase do projeto até a fase de experimentação, onde são decididos os melhores ajustes e configurações do veículo, como por exemplo: altura do “roll center”, carga de amortecedor, rigidez da barra estabilizadora e molas da suspensão.



## 3 AQUISIÇÃO DE DADOS

### 3.1 Introdução

Uma maneira comprovadamente eficiente para qualquer modalidade de esporte é coletar os dados do treinamento de um atleta para posterior análise, visando sempre direcionar treinamentos específicos baseados na análise do desempenho. Essa técnica torna-se eficiente e pode diminuir o tempo de treinamento do atleta. Nas competições automobilísticas essa técnica é cada vez mais utilizada entre as equipes de diversas modalidades. Dentro das corridas de automóveis, a Fórmula 1 foi a pioneira no desenvolvimento dos sistemas de aquisição de dados. Segundo Wright (2001), ainda na década de 60 através de um sistema analógico pouco versátil, como pode ser visto na figura 41, as equipes já utilizavam as técnicas de coletar informações do veículo em operação para poder tirar o máximo de performance.

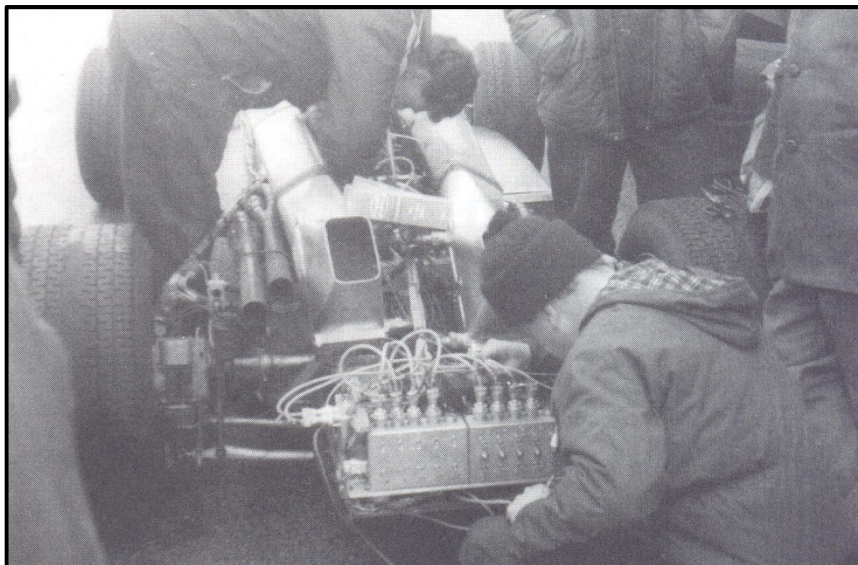


Figura 41 – Sistema de aquisição de dados analógico em uma BRM em 1969.  
Fonte: Wright, 2001, p. 170

O sistema analógico não era viável tecnicamente para a aplicação em corridas, então as equipes passaram a investir no sistema digital, que era muito mais compacto. A década de 80 já contou com o sistema de aquisição de dados digital, onde sua utilização era voltada principalmente para o gerenciamento dos motores turbo alimentados e também para a suspensão ativa. O sistema de aquisição de dados teve um papel fundamental no desenvolvimento e na introdução do sistema de suspensão ativa nas competições de Fórmula-

1. A figura 42 mostra o diagrama g-g de Ayrton Senna a bordo da Lotus 97T na Austrália em 1987.

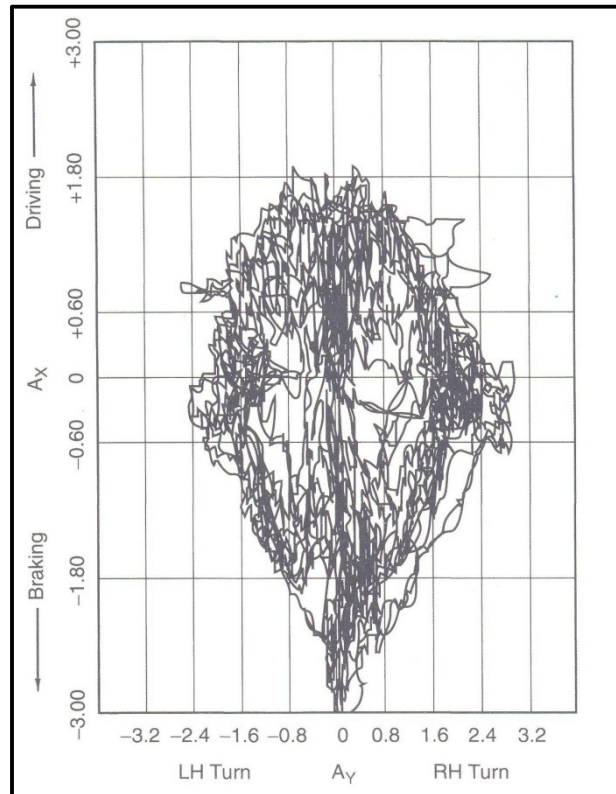


Figura 42 – Diagrama g-g, Ayrton Senna, Adelaide 1987.  
Fonte: Milliken & Milliken, 1995, p. 355

O próximo passo para o desenvolvimento do sistema de aquisição de dados era a transmissão dos dados em tempo real para os boxes, mais conhecida como telemetria. Segundo Tremayne (2006), os dados podem ser transmitidos de três maneiras. Primeira maneira: transmissão em tempo real via rádio e armazenado nos computadores da equipe; segunda maneira: a cada volta que o carro passa na frente do box, uma antena recebe as informações referentes à volta inteira e transmite para os computadores dos engenheiros; terceira maneira: quando o veículo para, é conectado a um laptop que recebe mais de 12 milhões de bits em poucos segundos. O terceiro modo é o mais eficiente e seguro, uma vez que os dois primeiros são feitos via rádio que às vezes sofre flutuações na recepção do sinal.

A década de 90 foi marcada pela revolução no sistema de aquisição de dados e também com o aprimoramento da telemetria. A figura 43 mostra Ayrton Senna analisando os dados com os engenheiros durante os testes de inverno no Estoril, Portugal em janeiro de 1994. As empresas fabricantes desses sistemas, como Bosch, Magneti Marelli e TAG Electronics passaram a investir cada vez mais nos sistemas de telemetria. De acordo com

Tremayne (2006), no ano de 1993 surgia o revolucionário sistema de duas vias na McLaren MP4/8, desenvolvido pela TAG Electronics. Esse sistema recebia as informações do veículo em tempo real, que era analisado pelos engenheiros, possibilitando fazer correções e enviar novamente para o veículo durante a corrida. Os engenheiros modificavam o mapa do motor, o “set-up” da suspensão ativa, dentre outros ajustes. Esse avançado sistema foi banido da F-1 em 1994, retornou em 2002 e foi banido novamente em 2003.



Figura 43 – Ayrton Senna acompanhando os dados dos testes de inverno, Estoril 1994.  
Fonte: Revista Manchete no. 2248, 1995, p. 16.

Os benefícios da telemetria de duas vias são vastos e um exemplo desta eficiência foi comprovado no GP de Mônaco em 2002, quando o piloto da McLaren David Coulthard teve problemas com o motor Mercedes-Benz, que nitidamente soltava uma fina fumaça enquanto liderava a corrida. Alguns ajustes foram feitos através dos computadores dos engenheiros no box da McLaren e o escocês pode comemorar a vitória nas ruas de Monte Carlo. A figura 44 mostra o quartel general montado nos GPS de Formula 1 e mostra o papel fundamental que essa equipe de engenheiros tem no desempenho do piloto durante o final de semana.





Figura 44 – Equipe Ferrari acompanhando os dados dos pilotos em tempo real  
Fonte: Tremayne, 2006 p. 110

Na competição Formula SAE, onde os orçamentos das equipes são infinitamente menores que os da Fórmula 1, a telemetria é um recurso restrito a poucas equipes. Embora algum sistema de aquisição de dados esteja presente na maioria dos veículos, o sistema de transmissão de dados em tempo real ainda é pouco explorado pelas universidades. A equipe austríaca da universidade de Tu Graz é uma das equipes que desenvolveu o seu próprio sistema de telemetria, onde os dados são transmitidos via rádio para a equipe, que pode monitorar o funcionamento dos sistemas vitais. Nas figuras 45 e 46, é possível observar que na região frontal do veículo existem duas antenas, específicas para a transmissão dos dados



Figura 45 – Protótipo da Tu Graz 2007, equipado com sistema de transmissão de dados em tempo real  
Fonte: autor

Assim como na Fórmula 1, as equipes do Formula SAE sabem da importância que um sistema de aquisição de dados tem no desenvolvimento de um veículo competitivo e também no treinamento dos pilotos. As diversas regulagens disponíveis no veículo, assim como diversos estilos de pilotagem, são fatores que combinados geram uma lista enorme de possíveis resultados. Esses resultados são de uma maneira mais clara gerenciados pelos softwares dos sistemas de aquisição de dados e são fundamentais para a equipe tomar qualquer decisão. Um exemplo disso é a escolha da pressão ideal do pneu para a prova de skid pad. Após rodar algumas dezenas de voltas com várias pressões no pneu, a equipe pode analisar quais foram os melhores tempos e quais foram as melhores acelerações laterais, levando em consideração as temperaturas do pneu em função das várias pressões. Com todos esses elementos apresentados de uma maneira clara e precisa, a tomada de decisão é com certeza muito mais fácil e rápida. Outro exemplo sobre a grande importância da aplicação da telemetria no Formula SAE é com relação ao monitoramento da carga da bateria durante o enduro. Como o sistema elétrico normalmente é dimensionado no limite de carga da bateria, é muito comum abandonos por falta de energia. Com o sistema aquisição de dados em tempo real, a equipe pode verificar a queda da tensão da bateria e imediatamente comunicar o piloto para poupá-la desligando sistemas eletrônicos que não são vitais para o funcionamento do veículo.



Figura 45 – Protótipo da Tu Graz 2009  
Fonte: autor

### 3.2 Definição

A aquisição de dados em um veículo de competição é de uma maneira simplificada, uma unidade eletrônica que armazena dados capturados pelos diversos sensores instalados no veículo em função do tempo ou distância. Esses dados são posteriormente transferidos para um *software* especializado, onde é possível fazer uma análise completa dos dados obtidos. Genericamente esse fluxograma é representado na figura 47.

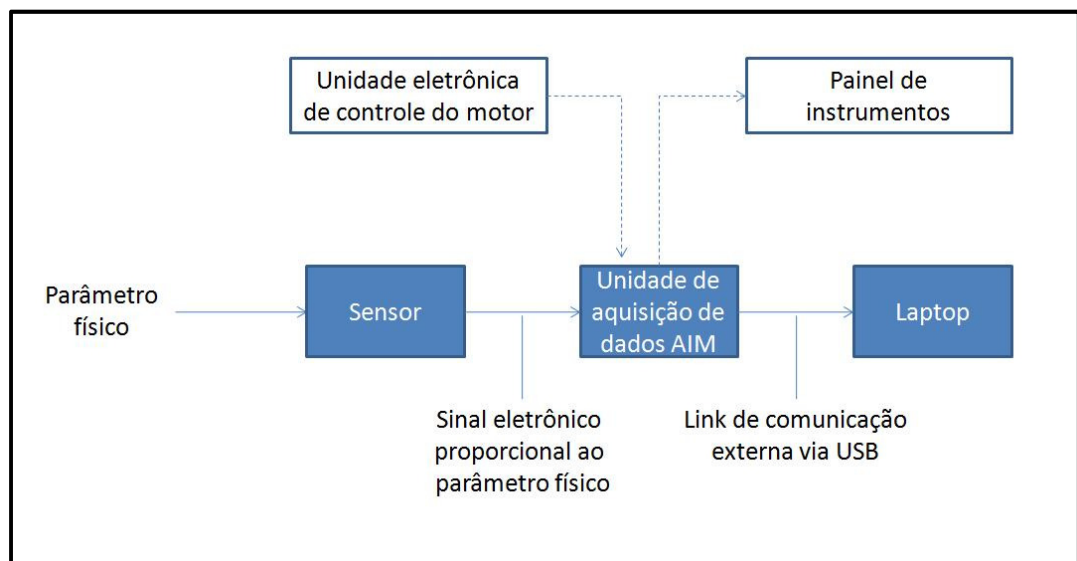


Figura 47 – Funcionamento do sistema de aquisição de dados  
Fonte: autor

De acordo com Segers (2008), essas análises podem ser divididas nas seguintes categorias:

#### 3.2.1 Análise do desempenho do veículo

Esse tipo de análise ajuda o piloto fazer seus comentários, o engenheiro pode de maneira mais fácil apontar os problemas de dirigibilidade e em qual parte do circuito eles ocorrem. Baseado nessas informações é possível decidir qual é o melhor acerto do veículo para as próximas sessões.

### 3.2.2 Análise do desempenho do piloto

A aquisição das atividades do piloto mostra de uma maneira clara, o seu estilo de pilotagem. Além disso, é possível observar a consistência do piloto em provas de longa duração e no caso do Formula SAE, onde vários pilotos usam o mesmo carro, é possível verificar os diferentes estilos de pilotagem e quais são os mais eficientes para cada prova.

### 3.2.3 Desenvolvimento do veículo

A aquisição de dados é uma ferramenta muito útil e que é cada vez mais utilizada nas equipes de competição automobilística. Com os dados obtidos, é possível conhecer os esforços que atuam em cada componente, nas condições mais críticas, e dessa maneira, o dimensionamento pode ser feito de maneira otimizada com foco na redução de massa e momentos de inércia. Baseado nas informações apresentadas, é possível direcionar qual tipo de desenvolvimento deve ser focado.

### 3.2.4 Confiabilidade e segurança

Gravando sinais vitais, como pressão e temperatura do óleo do motor, temperatura da água e também a tensão da bateria, pode-se evitar panes mecânicas ou ao menos minimizá-las. A segurança do piloto também é outro grande benefício indiscutível, através do monitoramento da pressão dos pneus, que facilmente pode identificar um pneu furado.

### 3.2.5 Determinação dos parâmetros do veículo

Os *softwares* de simulação estão se tornando cada vez mais populares. Para desenvolver um modelo de simulação, todos os parâmetros relevantes do veículo devem ser conhecidos pelo programador, de modo que o modelo tenha suficiente exatidão. Os parâmetros podem ser: massa suspensa e não suspensa, bitolas dianteira e traseira, distância entre-eixos, altura do centro de gravidade, localização dos centros de rolagem. Alguns parâmetros podem ser medidos no veículo estático ou calculados, porém outros somente podem ser obtidos com o veículo em condições de corrida, como por exemplo: acelerações, cursos da suspensão, temperaturas dos pneus, etc.

### 3.2.6 Diário de bordo

O sistema de aquisição de dados permite registrar o histórico das atividades de um carro de corrida. É gravado quanto tempo o veículo foi utilizado, quais as condições e esforços sofridos a que ele foi submetido. Quando essas informações são cruzadas com as especificações de cada componente, é possível criar um sistema de controle da vida útil de cada componente. Esse sistema determina quando um componente deve ser substituído, evitando situações indesejadas em termos de desempenho e principalmente em segurança.

## 3.3 Categoria dos dados

Segundo Segers (2008), apesar de muitos sinais estarem correlacionados, os dados que o sistema aquisita podem ser divididos nas seguintes categorias:

### 3.3.1 Funções vitais do veículo

Esses sinais são constituídos pelos canais do motor e da transmissão, como por exemplo, pressão e temperatura do óleo do motor, temperatura da água, pressão do combustível, temperatura da transmissão e do diferencial e a voltagem da bateria. Rotações do motor por minuto (rpm) também se enquadram nessa categoria.

### 3.3.2 Parâmetros das atividades do piloto

Os parâmetros das atividades do piloto são aqueles que ele tem o controle direto durante a condução do veículo. Como por exemplo: posição do pedal do acelerador e do freio, ângulo do volante de direção e a troca de marchas.

### 3.3.3 Parâmetros do chassis

Esses parâmetros estão relacionados à dinâmica do veículo como, por exemplo: velocidade do veículo, acelerações laterais, longitudinais e verticais, deslocamento e velocidade do acionamento dos amortecedores, pressão da linha dos freios, temperaturas e pressões dos pneus, altura do solo, cargas na suspensão, etc.



### **3.4 Sinais básicos da aquisição de dados**

De acordo com Segers (2008), atualmente, as opções de um sistema de aquisição de dados, dependendo do orçamento são quase infinitas. Uma configuração tradicional para iniciantes consiste em uma unidade armazenadora de dados capaz de adquirir os seguintes sinais do chassis e da performance do piloto:

- a) Rotações por minuto (rpm);
- b) Velocidade da roda;
- c) Posição do pedal do acelerador;
- d) Ângulo de esterço do volante de direção;
- e) Aceleração lateral;
- f) Aceleração longitudinal.

Para complementar os sinais citados, existem ainda os canais que monitoram os sinais vitais do veículo que também devem ser gravados, como por exemplo, temperatura e pressão dos fluidos, tensão da bateria. Essas aquisições permitem que o engenheiro tenha uma grande quantidade de dados para análise e tomada de decisão.

### **3.5 Sinais suplementares da aquisição de dados**

Para trabalhar com análise da dinâmica veicular, são necessários sensores adicionais, sendo provavelmente a aquisição do curso da suspensão um dos itens mais importantes. Além dos 6 sinais citados anteriormente, os canais a seguir são fortemente recomendados:

- a) Movimentação da Suspensão (amortecedor);
- b) Pressão na linha de freio;
- c) Pressão da embreagem;
- d) Indicação da marcha;
- e) Velocidade de cada roda;
- f) Acelerações laterais dos eixos dianteiro e traseiro;
- g) Aceleração vertical;
- h) Pressão dos pneus;
- i) Temperatura dos pneus;

- j) Temperatura dos discos de freio;
- k) Velocidade de giro (Giroscópio *yaw*);
- l) Torque no eixo de transmissão;
- m) Pressões aerodinâmicas (tubos de Pitot);
- n) Esforço na alavanca de mudança de marchas.

### 3.6 Hardware

Segundo Segers (2008), os sistemas de aquisição de dados apresentam uma grande variedade de configurações, porém os principais componentes são muito parecidos e o funcionamento também é muito semelhante e segue o mesmo princípio de funcionamento descrito na figura 47. O Parâmetro físico é captado através do sensor que transforma a medida em um sinal eletrônico, é armazenado na unidade de aquisição de dados. Posteriormente, é utilizado um laptop ou desktop para comunicar com a central e gravar os dados. Normalmente essa comunicação é feita através de um link de duas vias, pois a maioria dos sistemas oferece alguns parâmetros que podem ser configurados pelo usuário. Os tipos de comunicações têm evoluído ao longo do tempo. As portas seriais e paralelas estão sendo substituídas por cabos USB ou linha CAN (*controller area network*) que oferecem uma velocidade maior de transferência de dados. O mais recente meio de transferência de dados é via Wi-Fi, que possui uma taxa de transferência entre 7 e 30 MB/s

Os sistemas mais modernos de aquisição de dados possuem pré disposição para integração com a rede CAN. Esse recurso é extremamente útil para a incorporação de sistemas adicionais como, por exemplo: painel de instrumentos, caixa de expansão de sinais, etc. Além de ser recomendada para a utilização dos diversos sensores e atuadores.

Outro benefício oferecido pelos sistemas mais modernos e que tem se tornado cada vez mais popular é a integração das imagens de vídeo com os dados registrados na unidade. Este recurso permite observar o vídeo registrado por uma câmera instalada no veículo onde é possível analisar os dados de desempenho integrados a imagem do veículo. De acordo com Segers (2008), esse recurso foi iniciado com o objetivo de registrar as atividades do piloto dentro do cockpit, porém a aplicação é muito ampla e pode ser utilizada para monitorar a suspensão, rotação de eixos e se integrada a um canal de áudio, torna o sistema ainda mais eficiente e coloca os engenheiros ainda mais perto do que ocorre dentro do veículo. Falhas na troca de marcha, escorregamento de embreagem ou pneus podem ser facilmente detectados sem precisar filtrar todos os gráficos apresentados pelo software.

A precisão dos mapas da pista aumentou consideravelmente com a utilização do GPS. Essa nova tecnologia utiliza GPS de 5 Hz para medir posição, velocidade, e acelerações. Segundo Segers (2008), a precisão do GPS depende de diversos fatores, mas a sua combinação com as correções inerciais (integração da aceleração lateral e longitudinal) pode melhorar significativamente a precisão do traçado. Na figura 48, pode-se observar o mapa traçado pelo sistema AIM equipado com GPS pelo protótipo RS3 da FEI durante a V competição de Fórmula SAE Brasil. Outra grande vantagem de utilizar o GPS é a maior precisão da velocidade, que é tipicamente entre 0,1-0,2%, muito superior aos sensores mais utilizados para a medição da velocidade, tipicamente do tipo Hall.

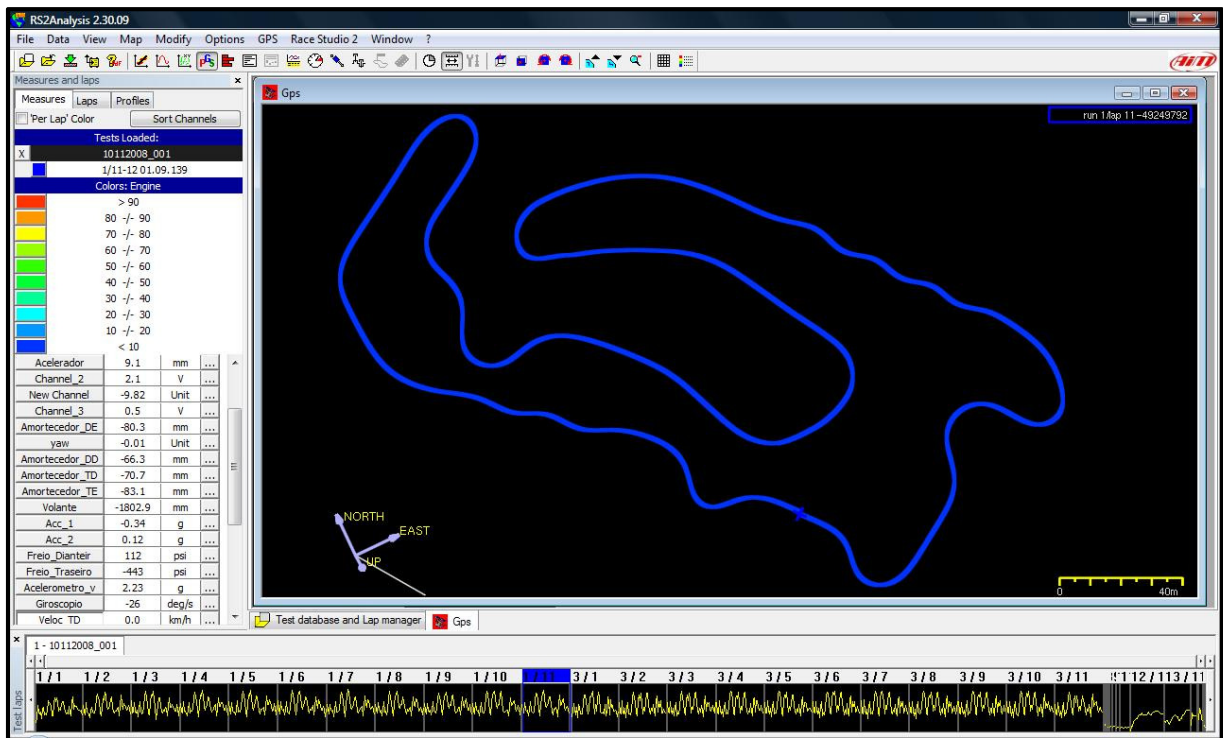


Figura 48 – Mapa do endure traçado pelo GPS. Campo de provas da Goodyear, Americana 2008.

Fonte: autor

### 3.7 Software

O software tem um papel muito importante no trabalho de visualização e organização dos dados. É mandatório que ele seja capaz de fornecer aos engenheiros dados precisos no menor tempo possível. Normalmente, o calendário dos dias de competição é muito apertado, sendo que não há muito tempo para analisar os dados e mesmo nos dias de testes, onde existem diversos parâmetros a serem analisados, os milhares de dados devem ser apresentados

de uma maneira clara e precisa. Por isso, de acordo com Segers (2008), o software deve atender o máximo dos requisitos a seguir:

- a) Visualização de diversos canais ao mesmo tempo;
- b) Definir limites dos gráficos;
- c) Sobreposição de curvas e visualização da diferença entre as voltas;
- d) Zoom;
- e) Resultados numéricos em função da posição do cursor na curva;
- f) Gráficos dos dados em função do tempo ou distância;
- g) Traçado da pista;
- h) Estatísticas em função da volta ou setores;
- i) Adicionar notas em cada sessão;
- j) Alterar unidades;
- k) Capacidade de criar canais matemáticos;
- l) Exportar dados para outros softwares;
- m) Operação amigável, suporte do fabricante e atualizações acessíveis.

### 3.7.1 Visualização dos dados

Os softwares apresentam os dados de diferentes maneiras, entretanto, as informações mais importantes que devem ser apresentadas são: Gráficos em função do tempo e distância, diagrama g-g e os histogramas. A figura 49 é uma representação gráfica do Software Race Studio 2<sup>®</sup> da AIM utilizado pela equipe Formula FEI, onde três parâmetros são apresentados: na cor amarela - velocidade (captada pelo GPS), na cor azul - aceleração lateral e na cor verde - aceleração longitudinal, todas em função da distância. Os resultados gráficos facilitam a visualização dos dados gerados e também permitem uma clara visualização do comportamento geral do veículo. É fácil visualizar quais são os pontos de maior velocidade, onde ocorrem os picos de acelerações e em quais pontos da pista.

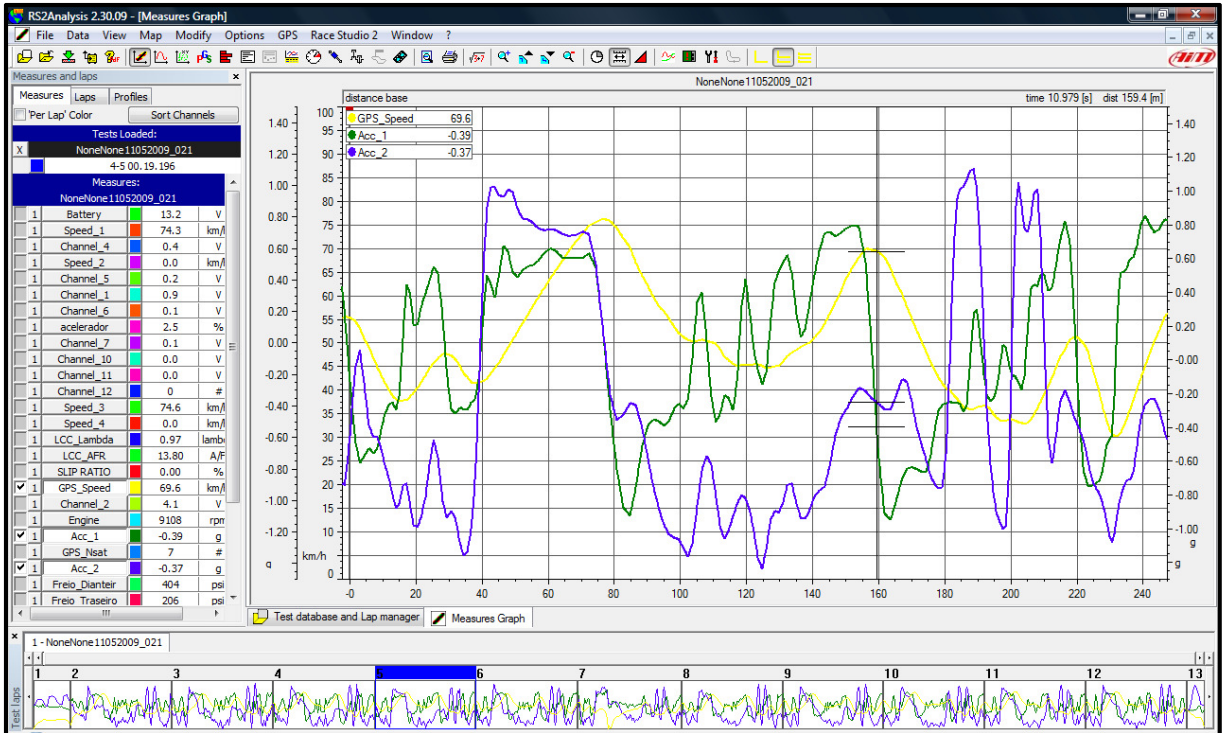


Figura 49 – Software Race Studio 2<sup>®</sup> do AIM.  
Fonte: autor

Outro gráfico de extrema importância para a análise de desempenho de um veículo de competição é o gráfico g-g. Esse gráfico mostra as acelerações laterais e longitudinais e também o *braking in a turn*, que é o quanto o veículo pode iniciar a curva desacelerando. Esse é um indicador de como está o equilíbrio do veículo na frenagem, uma característica muito importante para a aplicação do Fórmula SAE, onde os veículos aceleram e freiam em um curto espaço de tempo. A representação gráfica dessas acelerações pode ser vista na figura 50.

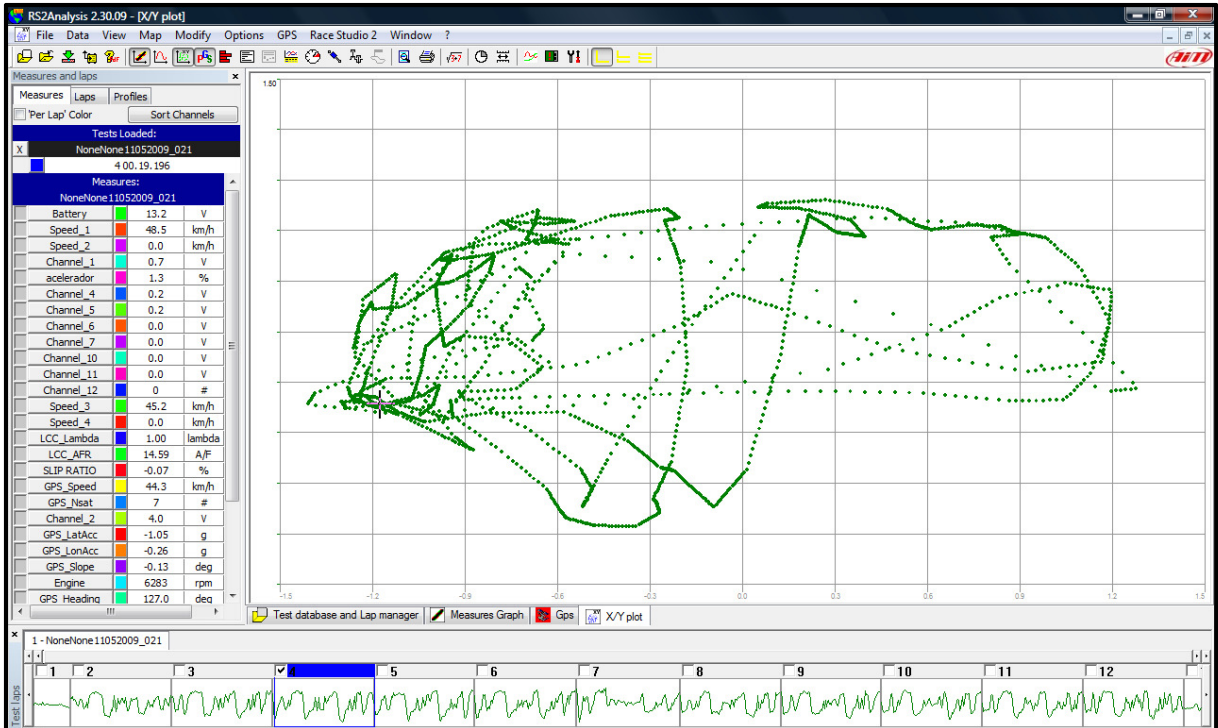


Figura 50 – Diagrama g-g gerado pelo Software Race Studio 2®.

Fonte: autor

A função de sobreposição das curvas é um dos recursos mais utilizados e é praticamente mandatório utilizar um software com essa função. O benefício em sobrepor as curvas pode ser utilizado em diversas aplicações, como por exemplo: monitorar as atividades dos pilotos, comparando os diferentes tipos de pilotagem, comparar os diferentes tipos de regulagens de suspensão, escalonamento de transmissão e quais os trechos em que cada um é melhor. Na figura 51, é possível comparar duas voltas distintas em um circuito de 250 m, com os tempos de 18.669 s e 19.733 s. As velocidades são representadas pelas cores azul e vermelha, e as acelerações laterais são representadas pelas cores verde e amarela. Na parte inferior do gráfico é apresentada a diferença medida em segundos.

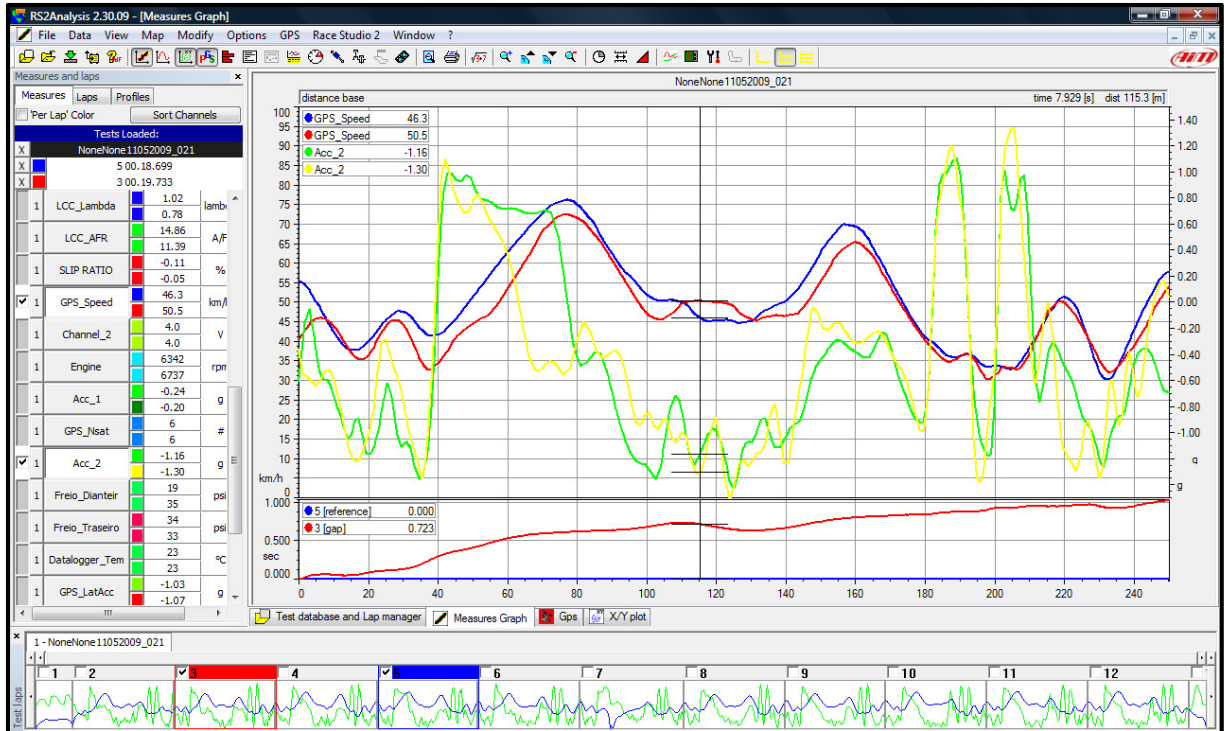


Figura 51 – Sobreposição de curvas geradas pelo Software Race Studio 2<sup>®</sup>.  
Fonte: autor

Os histogramas também são extremamente úteis para gerar relatórios e também para auxiliar na escolha do melhor ajuste, como por exemplo, se o piloto consegue ficar mais tempo com o acelerador no máximo, ou também gerar uma planilha com o histórico de todas as voltas executadas para verificar se o piloto perdeu desempenho por falta de preparo físico, ou se houve uma melhora em função do aprendizado do traçado, conforme pode ser visto na figura 52.

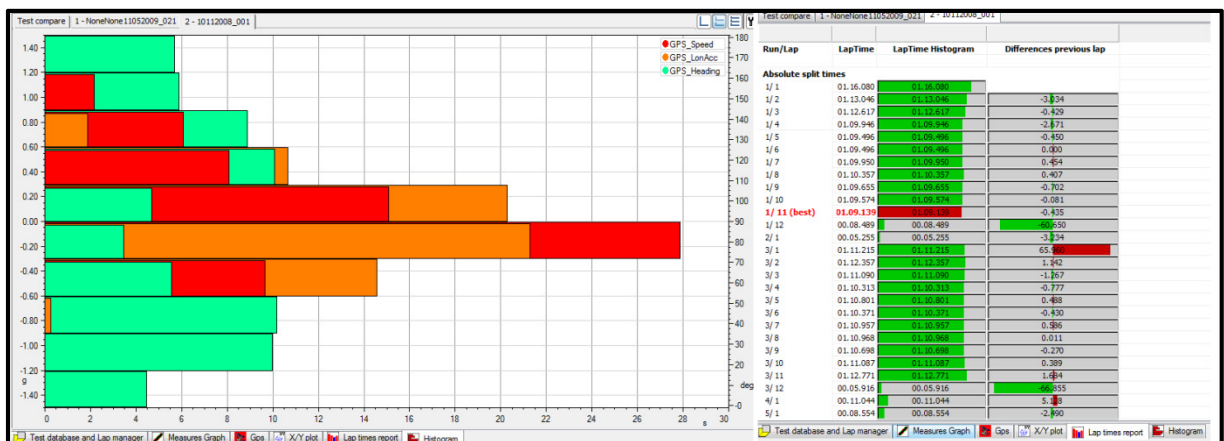


Figura 52 – Histograma de sinais e de tempos de voltas gerados pelo Race Studio 2<sup>®</sup>.  
Fonte: autor

Por fim, os canais matemáticos são obrigatórios nos softwares dos sistemas de aquisição de dados. Eles devem ser capazes de gerar equações matemáticas e transformá-las em um canal adicional, permitindo desta maneira, a visualização de uma grandeza que não pode ser medida através de um sensor. Como por exemplo, o ângulo de escorregamento do pneu ou a transferência de carga.

### **3.8 Incerteza do resultado**

Segundo Segers (2008), toda medida é válida somente se acompanhada da consideração dos erros envolvidos. Antes de iniciar qualquer medição, é necessário identificar as significantes fontes de erros e eliminá-las caso seja possível. Após a medição, faz-se necessário listar os prováveis erros de medição que ainda permanecem. Toda vez que uma medição de um sensor é repetida, os resultados obtidos podem variar. As razões dessas variações podem ser por diversos motivos como podemos ver a seguir:

- a) Insuficiência na medida do objeto;
- b) Insuficiência nos instrumentos de medição;
- c) Insuficiência nos métodos de medição;
- d) Influências do ambiente;
- e) Influência da pessoa que faz as medições;
- f) Mudanças climáticas ao longo do tempo.

Podemos dividir o erro total em uma medição em três categorias:

- a) Erros grandes;
- b) Erros metódicos ou ordenados;
- c) Erros ao acaso.

Erros grandes ocorrem devido a um método de medição impróprio, aplicação incorreta de sensores, ou erros ao baixar os dados. Eles não podem ser corrigidos e só podem ser eliminados se detectados antes da realização das medições. Erros metódicos ou ordenados também são conhecidos como tendência estatística, que é causado por deficiência nos objetos de medida, no método de medição ou nos instrumentos de medição. Os erros de tendência estatística podem ser eliminados ou reduzidos calibrando os instrumentos de medição.



Os erros ao acaso ocorrem devido a fatores que fogem do controle dos engenheiros, como por exemplo:

- a) Meio ambiente (umidade, temperatura, pressão, radiação, etc);
- b) Envelhecimento do objeto de medição;
- c) Envelhecimento dos instrumentos de medição.

Um exemplo de erro ao acaso pode ser encontrado no dígito menos significativo de uma balança digital. Em três medidas distintas, encontram-se os seguintes resultados: 0,567 g, 0,566 g e 0,568 g.

## **4 ESTUDO DE CASO**

### **4.1 Objetivo**

Este capítulo tem como objetivo descrever como funciona a aquisição de dados em um veículo de competição Fórmula SAE, desde a escolha do equipamento, quais os sensores mais adequados para cada situação, como o protótipo RS3 da FEI foi instrumentado, quais foram os testes realizados, quais as vantagens que esse equipamento trás para as equipes.

### **4.2 Equipamentos utilizados e a implicação da precisão no resultado**

#### **4.2.1 Escolha do sistema**

A escolha do sistema de aquisição de dados (software e hardware) não é uma tarefa simples. Diversos fatores devem ser levados em consideração como por exemplo: custo, recursos disponíveis, variedade de sensores, etc. No caso do Fórmula SAE é primordial os sensores como: acelerômetros (para os três eixos), potenciômetros para deslocamentos, sensores de velocidade e rotação. São desejáveis os seguintes sensores: pressão de freio, GPS, temperatura do pneu e ópticos para medir a altura do veículo.

Escolher entre centenas de opções não é uma tarefa muito simples, porém a escolha para equipar o protótipo RS3 foi feita baseada na aplicação de veículos de competição. Com esta direção, o leque ficou reduzido a apenas algumas dezenas de unidades. Quando trabalhamos com esse tipo de equipamento, é importante ter em mente que essa tecnologia evolui rapidamente. Portanto, escolher um fabricante sólido e com tradição na fabricação de equipamentos de aquisição de dados é obrigatório, pois muitas vezes versões mais atuais de software são necessárias e até mesmo sensores com maior capacidade surgem no mercado e podem ajudar a melhorar a qualidade das análises.

Pelos fatores acima, o sistema escolhido foi o AIM EVO 3 Pro/Pista®, porém antes desta escolha, a equipe utilizou um outro sistema de aquisição de dados que não tinha aplicação automotiva da National Instruments®, com o software compact N RIO. Por ser o único recurso disponível na universidade, os primeiros estudos de aquisição de dados foram iniciados com esse sistema que não tinha nenhuma aplicação automotiva e nenhum sensor apropriado para registrar as diversas exigências do Fórmula SAE. Os sensores foram adaptados para a utilização no RS3. Obviamente, os resultados obtidos não foram satisfatórios

sendo que muitos sinais apresentaram ruídos acima do aceitável. Boa parte do tempo de estudo deste trabalho foi dedicada ao desenvolvimento do sistema de aquisição de dados utilizando o equipamento da National Instruments<sup>®</sup>. Porém todos os resultados obtidos indicavam a necessidade de adquirir um equipamento específico para aplicação automobilística. Todo o tempo dedicado foi de extrema importância para adquirir os conceitos básicos da instrumentação e dos princípios de funcionamento dos sensores. Um grande começo para o trabalho que estava apenas iniciando.



Figura 53 – Protótipo RS3 equipado com o sistema de aquisição de dados da NI.  
Fonte: Cortesia Fórmula FEI.

O equipamento da National Instruments<sup>®</sup> foi fabricado para atender diversas aplicações; entretanto, para a aplicação no Fórmula SAE diversas adaptações tiveram que ser feitas, como pode ser observado na figura 53. A unidade central que recebe os sinais de todos os sensores instalados no veículo não é compacta, sendo necessário criar uma caixa de madeira na parte dianteira do veículo. Isso criou um problema, pois a distribuição do peso do veículo foi alterada; outro grande problema é que não existem sensores específicos para a aplicação automotiva, como por exemplo: sensores para medir o deslocamento da suspensão, a posição dos pedais do acelerador e freio, a rotação do volante, as temperaturas do pneu, etc. Como o equipamento precisava ficar embarcado, a única maneira de registrar os dados gravados era instalando um laptop juntamente com a central, vide figura 54. Para complicar ainda mais, a gravação dos dados era contínua, e não havia nenhuma separação em função do

número de voltas. Todos esses fatores, juntamente com o conhecimento da tecnologia de aquisição de dados para aplicação automotiva, motivaram a equipe Fórmula FEI a adquirir outro sistema.

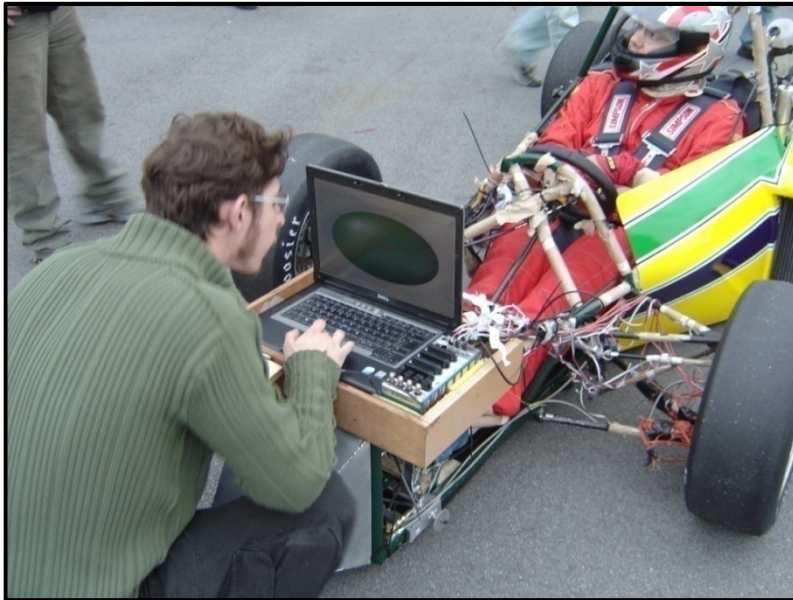


Figura 54 – Primeiras aquisições.  
Fonte: Cortesia Fórmula FEI

O sistema do fabricante AIM modelo EVO 3 Pro/Pista<sup>®</sup> pode ser visto na figura 55. A sua escolha deu-se principalmente por atender às necessidades do experimento, e também devido ao respaldo e credibilidade da empresa, presente nas categorias Formula Renault 2000, Fórmula 3 e Fórmula 1600 italiana, sendo que esses veículos possuem características semelhantes ao Formula SAE. A figura 56 mostra o equipamento instalado no Formula Renault.



Figura 55 – Kit EVO3 Pro / Pista.  
Fonte: Autor

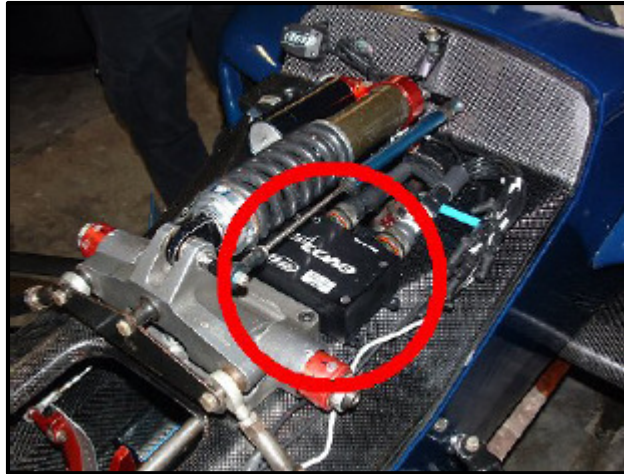


Figura 56 – Kit EVO3 Pro / Pista instalado no F-Renault  
 Fonte: AIM EVO3 for F-Renault installation manual p.3

#### 4.2.2 Conversão do sinal analógico para o digital

O primeiro ponto observado é a conversão do sinal analógico para o digital, pois é conhecido que o equipamento apenas armazena os dados digitais. Segundo Segers (2008), o processo de digitalização consiste na conversão dos valores analógicos em fluxo de dados binário (bit) com valores 0 ou 1. A resolução do equipamento utilizado é de 12 bit, ou seja, cada ponto varia de 0 a 4096 ( $2^{12}$ ), ou 0,02 %. Ao analisarmos os dados resultantes do trabalho da suspensão, que tem o curso total de 50 mm e um potenciômetro linear que mede o sinal na faixa de 0 a 5 V, cada milímetro movimentado na suspensão, gera a variação no sinal do sensor de 0,1 V. Isso significa que somente é possível detectar uma variação do sinal maior do que  $5/4096$  ou 0,00122 V. Portanto, o menor deslocamento da suspensão que pode ser medido é  $0,00122/0,1$  ou 0,0122 mm. O que nos dá a garantia que a mínima movimentação da suspensão será registrada.

Outra preocupação é a taxa de aquisição. Segundo Segers (2008), a taxa de aquisição é o número de pontos contidos dentro de uma amostra pela unidade de tempo. Erros na gravação de um sinal podem ser originados de uma baixa taxa de aquisição; esse fenômeno também é conhecido como *aliasing*. A figura 57 ilustra o problema da baixa taxa de aquisição, neste caso de uma onda senoidal, é possível verificar que os dados entre os pontos são ignorados, resultando em uma incoerência com o sinal original. Esse gráfico mostra um típico problema da utilização de uma taxa de aquisição mais baixa que a frequência da onda senoidal original.

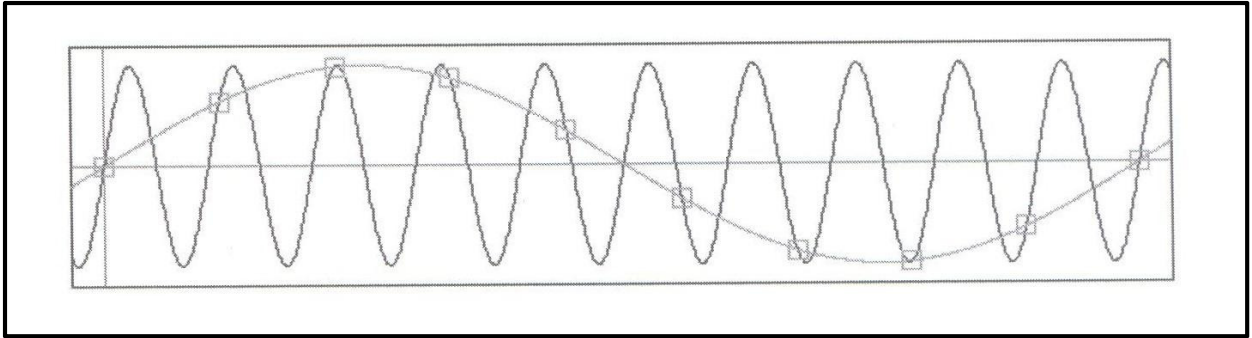


Figura 57 – Baixa taxa de aquisição para uma onda senoidal, causando a falsa representação do sinal  
 Fonte: Segers p. 153

Para evitar esse problema, foi utilizado o teorema de Nyquist Shannon de 1949, onde Harry Nyquist, um profundo conhecedor de tecnologia de telégrafos em conjunto do matemático e engenheiro elétrico Claude Shannon, descobriram que a frequência do sinal de uma amostra deve ser pelo menos duas vezes maior que a frequência do sinal original. Isso quer dizer que para digitalizar uma onda senoidal de 10 Hz, é necessário uma taxa de aquisição de pelo menos 20 Hz. Uma baixa taxa de aquisição pode gerar uma perda valiosa de informações de acordo com cada necessidade específica. Por outro lado, uma alta taxa de aquisição aumenta a precisão da conversão, porém requer maior memória o que muitas vezes pode diminuir o tempo total de aquisição.

De acordo com Segers (2008), foram utilizadas as seguintes taxas de aquisição:

- a) Temperaturas de fluidos e pressões: 1 – 5 Hz;
- b) Chassis e atividades do piloto: 20 Hz;
- c) Movimentação da suspensão: 100 – 200 Hz.

#### 4.2.3 Equipamentos utilizados

A central é a unidade que armazena todos os dados obtidos através dos sensores, como pode ser visto figura 58. Ela ainda possui dois acelerômetros que são utilizados para medir as acelerações laterais e longitudinais do veículo. Portanto, a sua instalação deve ser na linha central do veículo e o mais próximo possível do CG; no caso do RS3, a posição é imediatamente abaixo do banco.





Figura 58 – Unidade de aquisição de dados  
Fonte: Autor

Seguindo as recomendações dos sinais básicos de aquisição de dados e posteriormente os sinais complementares, os seguintes sensores foram utilizados para o levantamento das informações necessárias:

#### Velocidade nas rodas

As quatro rodas estão equipadas com o sensor de rotação, vide figura 59, Esse sensor calcula a rotação, que é posteriormente convertida em velocidade no software de análise de dados *Race Studio 2*. A informação da velocidade individual de cada roda é importante para conhecermos o que está acontecendo com o veículo, como por exemplo: se no momento da frenagem, as rodas dianteiras tiverem velocidade zero, quer dizer que o freio está travado e que é necessário ajustar o balanço do mesmo, aumentando a carga do eixo dianteiro. Se existir um aumento de rotação das rodas traseiras no meio ou na saída de uma curva, o veículo está perdendo a tração. A diferença de rotação do lado esquerdo para o lado direito também é importante para o monitoramento do diferencial.



Figura 59 – Sensor de rotação.  
Fonte: Autor

Os sensores instalados para captar a velocidade de cada roda são do tipo Hall. Esses sensores levam esse nome devido ao físico americano Edwin Hall que o descobriu no ano de 1879. O sensor funciona com a variação do campo magnético conforme pode ser visto na figura 60. Para permitir o correto funcionamento do sensor, foram construídas 4 rodas fônicas, seguindo as recomendações do fabricante, sendo que o sinal em cada ciclo deve apresentar quatro pulsos, a figura 61 representa o diagrama de funcionamento do sensor Hall.

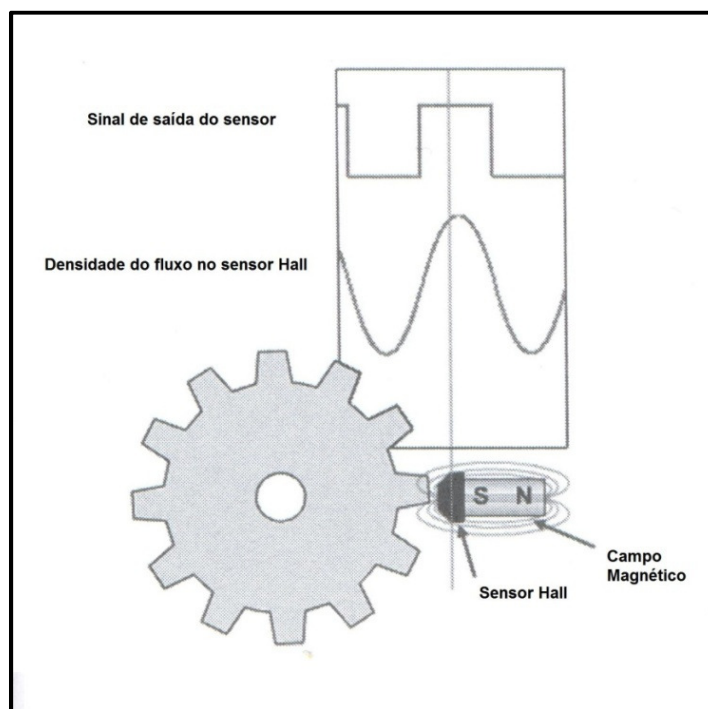


Figura 60 – Funcionamento do sensor Hall.  
Fonte: Segers p. 163



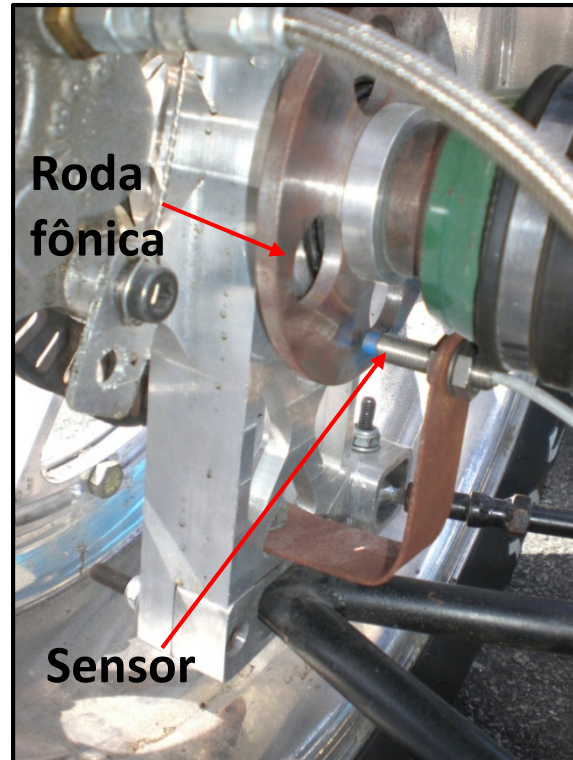


Figura 61 – Instalação do sensor de velocidade no RS3.  
Fonte: Autor.

### Posição do volante

Este sensor também é conhecido como potenciômetro, porém de deslocamento angular, como pode ser visto na figura 62. Sua utilização, apesar de ser simples, é fundamental para o estudo deste trabalho e também para os estudos de dinâmica veicular. Além de identificar as atividades e o estilo de pilotagem, é possível apontar as situações de sub e sobreesterçamento.

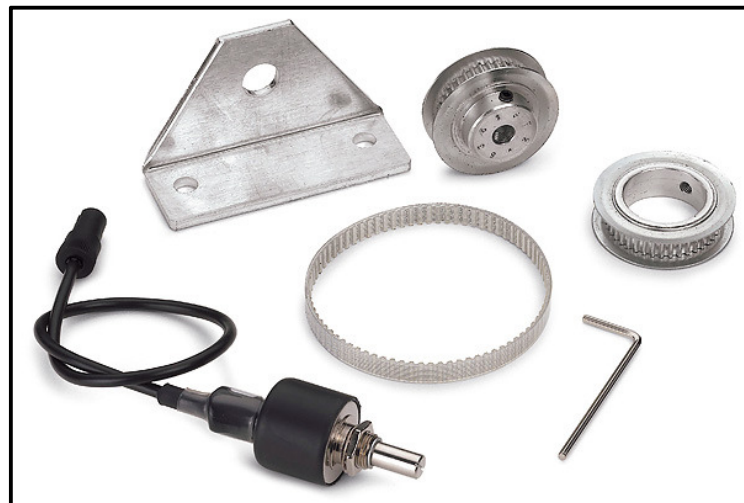


Figura 62 – Sensor de posição do volante.  
Fonte: Autor

A instalação no veículo deve ser feita se possível, diretamente no eixo da coluna de direção. Quando não é possível, pode-se instalar em outra polia acionada por correia. No RS3, o sensor foi instalado diretamente na coluna de direção, como pode ser visto na figura 63.

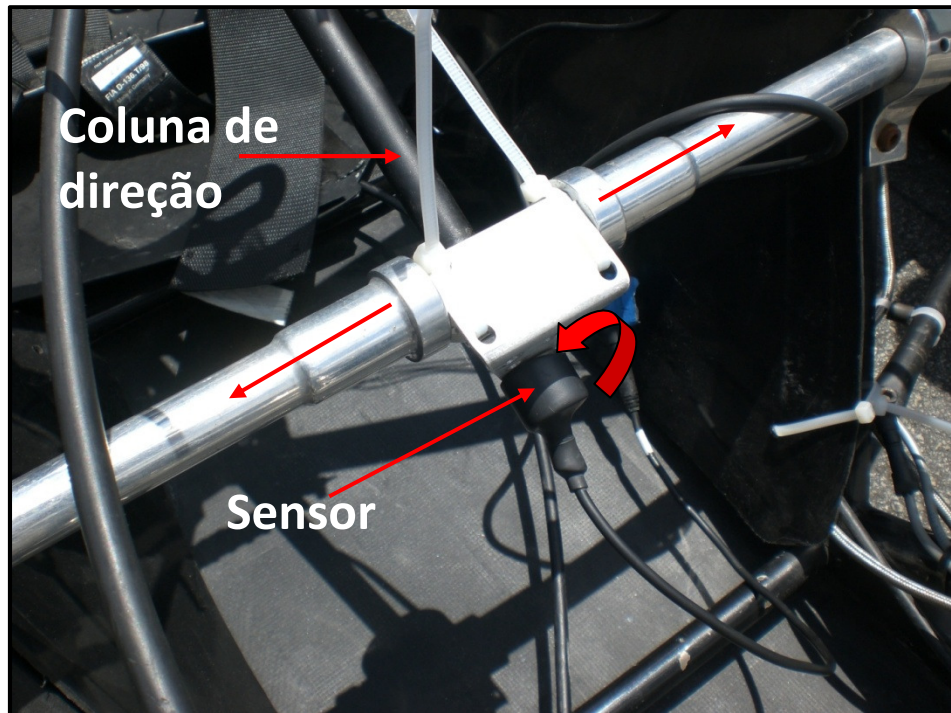


Figura 63 – Instalação do sensor de posição do volante no RS3.  
Fonte: Autor

### Deslocamento da suspensão

Este é outro caso de potenciômetro, porém com deslocamento linear e indutivo, como pode ser visto na figura 64. Neste caso, o potenciômetro transforma o movimento linear em variação de resistência, agindo como divisor de voltagem. Sua faixa de operação é de 0 a 5 V. Utilizando 1 sensor em cada roda, podemos conhecer a frequência de trabalho de cada suspensão, a altura do veículo em cada trecho da pista, os ângulos de *roll*, *pitch*, e *bounce* a velocidade de trabalho de cada amortecedor, podendo conhecer em quais condições de trabalho ele opera.



Figura 64 – Sensor do deslocamento do amortecedor.  
Fonte: Autor.

A instalação no veículo é feita utilizando a mesma fixação do amortecedor, como pode ser visto na figura 65.



Figura 65 – Instalação do LVDT no RS3.  
Fonte: Autor.

## Acelerômetro – Lateral, longitudinal e vertical

Dois conjuntos de acelerômetros foram instalados no RS3, sendo que o principal está posicionado na unidade de aquisição, que fica próximo do centro de gravidade do veículo. Neste conjunto, é possível aquisitar as acelerações no eixo “X” (longitudinais) e as acelerações no eixo “Y” (laterais). Um acelerômetro adicional foi utilizado para aquisitar as acelerações verticais, vide figura 66. Todos os acelerômetros utilizados possuem concepção inercial, ou seja, existe uma massa que tenciona uma mola de constante  $k$  conhecida. As movimentações do veículo provocam o deslocamento da massa  $m$ , e conseqüentemente a variação da folga  $d$  ilustrada na figura 67. A vantagem da escolha do acelerômetro inercial em relação ao piezoelétrico é pelo fato do último não ter a capacidade de manter as acelerações constantes, como o inercial. O acelerômetro piezoelétrico apenas registra o pico da aceleração. Caso não seja utilizado um acelerômetro inercial, não é possível identificar por quanto tempo o veículo consegue manter determinada aceleração lateral, em uma prova de skid pad, por exemplo. Apenas é possível verificar qual foi o pico da aceleração lateral durante a curva.



Figura 66 – Acelerômetro longitudinal ou lateral  
Fonte: Autor



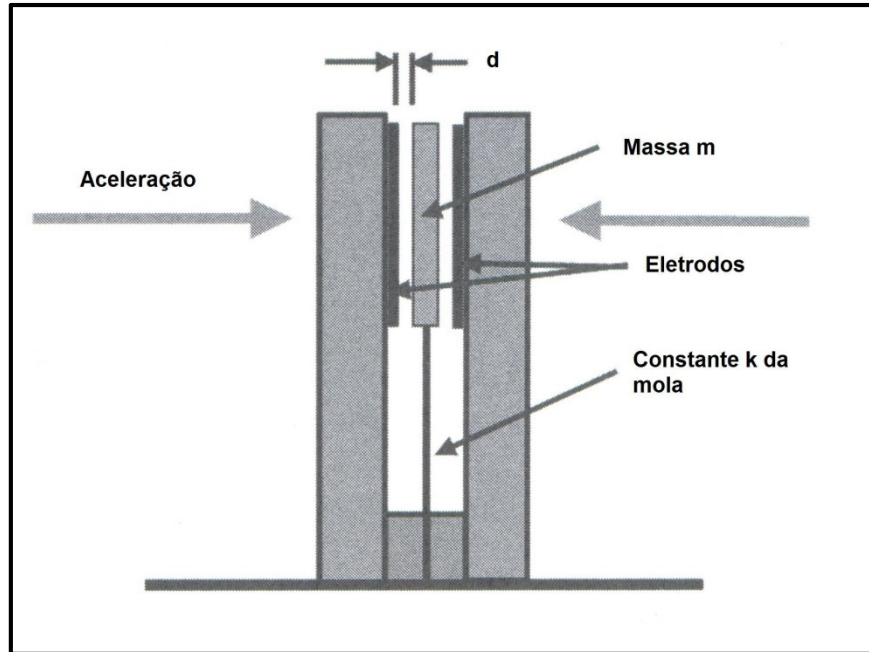


Figura 67 – Funcionamento de um acelerômetro capacitivo.  
Fonte: Segers p. 163

### Pressão do freio

A pressão do freio é obtida através da instalação de um transdutor de pressão. Este sensor é capaz de diferenciar a pressão traseira da dianteira, essa diferenciação é extremamente útil para conhecer e corrigir o balanço do freio. A figura 68 mostra o sensor com capacidade para 14 MPa



Figura 68 – Sensor de pressão do freio.  
Fonte: Autor

## GPS

O módulo GPS, figura 69, fornece informações muito úteis para a aquisição, como por exemplo: o mapa da pista, aceleração lateral e longitudinal, velocidade do veículo e giroscópio. A grande vantagem é que é possível comparar alguns valores dos sensores, como por exemplo: acelerações, velocidade e o próprio giroscópio.



Figura 69 – GPS  
Fonte: Autor.

## Giroscópio

A utilização do giroscópio tem a função de monitorar a velocidade de guinada “*yaw rate*”, ou seja, é possível saber se o veículo está perdendo aderência no eixo dianteiro ou traseiro. Essa informação é muito importante para acertar o equilíbrio do veículo nas curvas. Com a utilização do giroscópio, conforme a figura 70, elimina-se a necessidade de utilizar dois acelerômetros individuais, um para a dianteira e outro para a traseira.

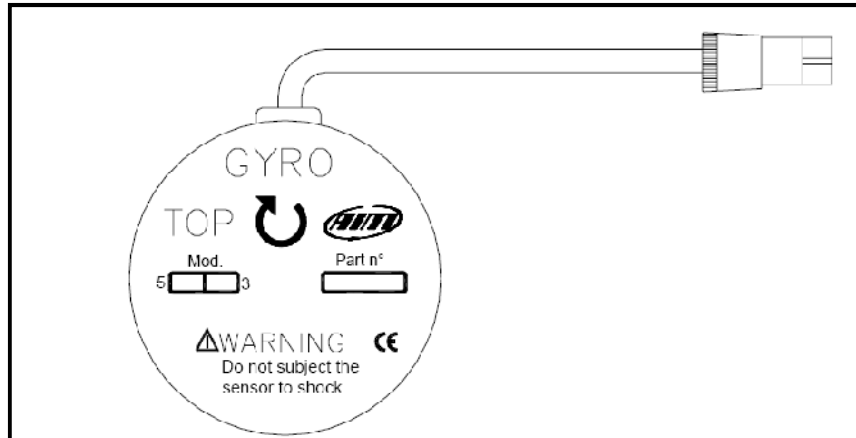


Figura 70 – Giroscópio  
Fonte: Autor

### Transmissor e receptor infravermelho

Esse conjunto transmissor / receptor infravermelho é necessário para permitir que os dados armazenados sejam separados por voltas, ou seja, cada vez que o veículo passa pela linha de chegada, é aberta uma nova volta. Dessa maneira, é mais fácil separar a grande quantidade de informações adquiridas durante o teste. A figura 71 mostra o receptor, à direita, que é instalado na pista e alimentado por uma bateria de 12 V. O transmissor é instalado dentro do veículo, na posição com menor obstrução possível.



Figura 71 – Receptor à esquerda e transmissor à direita  
Fonte: Autor.

### 4.3 Aquisições realizadas

Diversas aquisições foram realizadas com o equipamento AIM<sup>®</sup> durante o período de 1 ano. As aquisições iniciais foram feitas com o protótipo RS3, que serviram como base de dados para a conceituação do veículo sucessor, denominado como RS4. Durante o período de junho de 2008 a maio de 2009, centenas de quilômetros foram registrados. Os registros foram feitos nos seguintes locais:

- No campus do Centro Universitário da FEI em São Bernardo do Campo;
- Na V competição de Formula SAE Brasil na pista de testes da Goodyear;
- No campo de provas do patrocinador da equipe a Pirelli;
- No campus da universidade americana Lawrence Tech, Detroit;
- Na competição internacional F-SAE no Michigan International Speedway, EUA.

Todo o trabalho de aquisição de dados foi feito utilizando o software Race Studio 2<sup>®</sup>; portanto, os dados serão apresentados graficamente em função do tempo, vide figura 72, ou em função do espaço, vide figura 73.

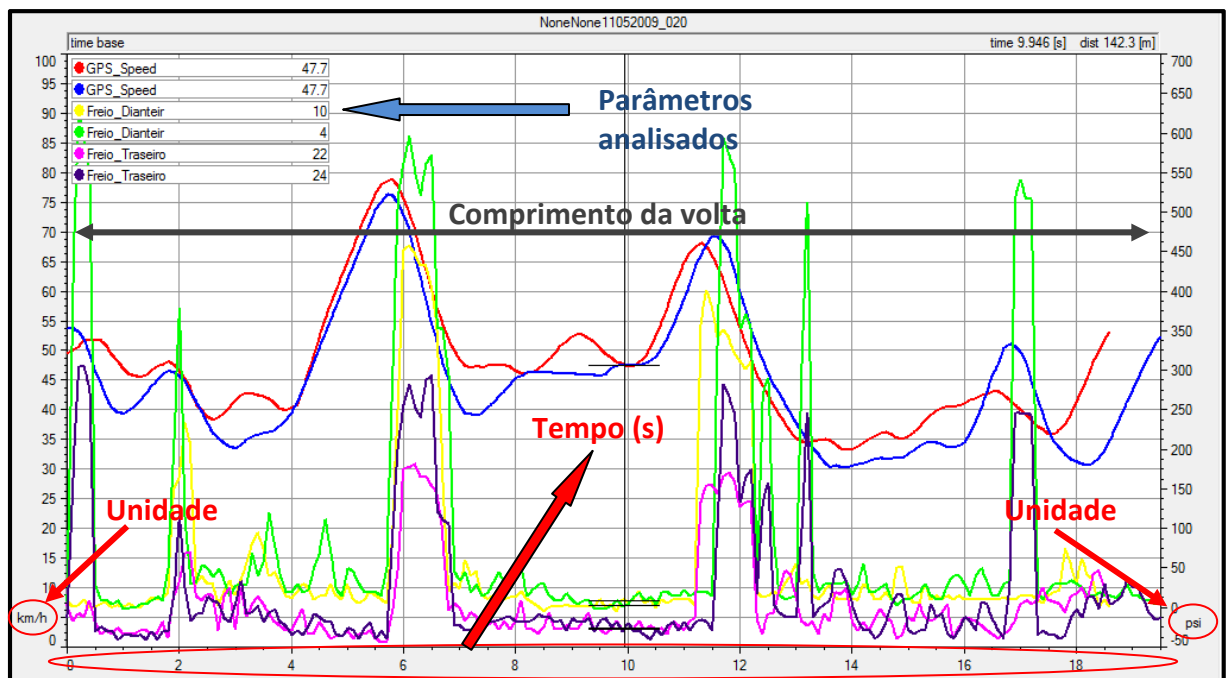


Figura 72 – Race Studio 2<sup>®</sup>, gráficos em função do tempo.  
Fonte: Autor.



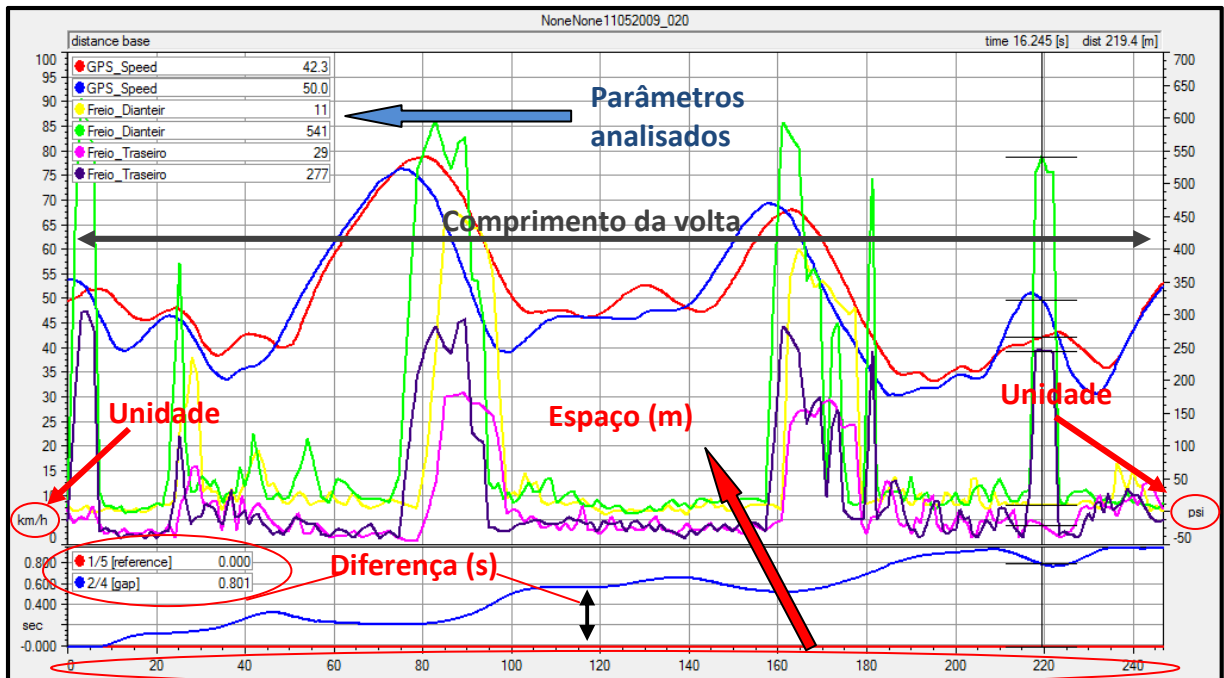


Figura 73 – Race Studio 2<sup>®</sup>, gráficos em função da distância e comprimento da diferença do tempo entre duas voltas na parte inferior.

Fonte: Autor.

Ainda na figura 73, a parte inferior é destinada para identificar a diferença de uma volta para outra. Esse recurso é uma ferramenta muito útil para a verificação de quais são os trechos em que existem ganhos ou perdas.

#### 4.3.1 Skid pad – curva de raio constante

A prova de skid pad é realizada na configuração que pode ser vista na figura 74. O veículo deve percorrer duas voltas para cada lado, sendo que o diâmetro interno é de 15 metros e a largura da pista é de 3 metros. A prova tem como objetivo identificar o veículo que possui a maior aceleração lateral. Nesta prova, o veículo tem comportamento linear e o objetivo do piloto é buscar o limite de aderência e manter a velocidade constante.

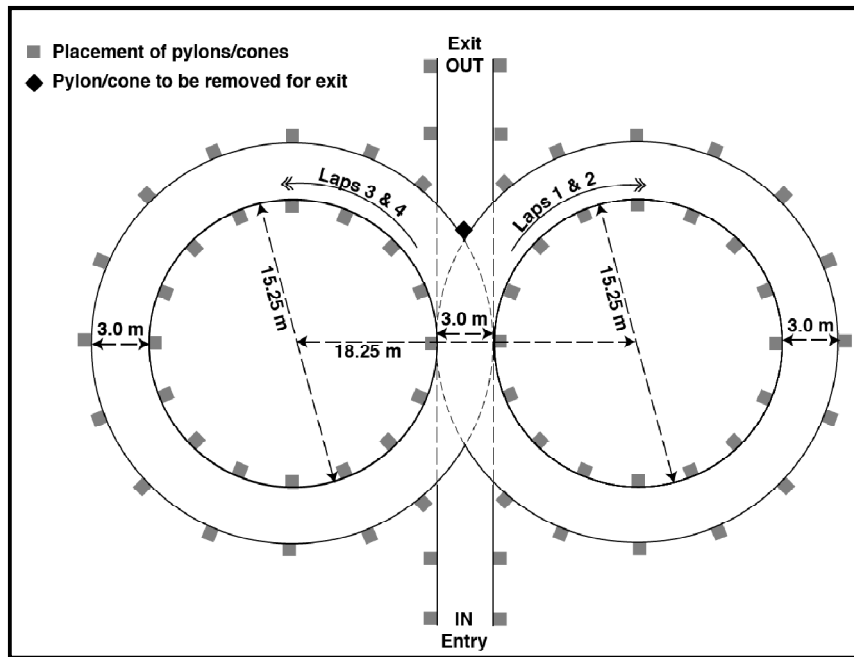


Figura 74 – Configuração do Skidpad  
 Fonte: 2009 Formula SAE rules p. 79

A figura 75 representa graficamente uma volta realizada com o tempo de 5.730 s, os sinais básicos registrados, como por exemplo: ângulo de esterço do volante, rotação do motor, acelerações longitudinais e laterais, e por fim, a velocidade registrada pelo GPS. É possível notar que o veículo permaneceu com uma velocidade constante, o que mostra que não houve problemas com a aderência do pneu.

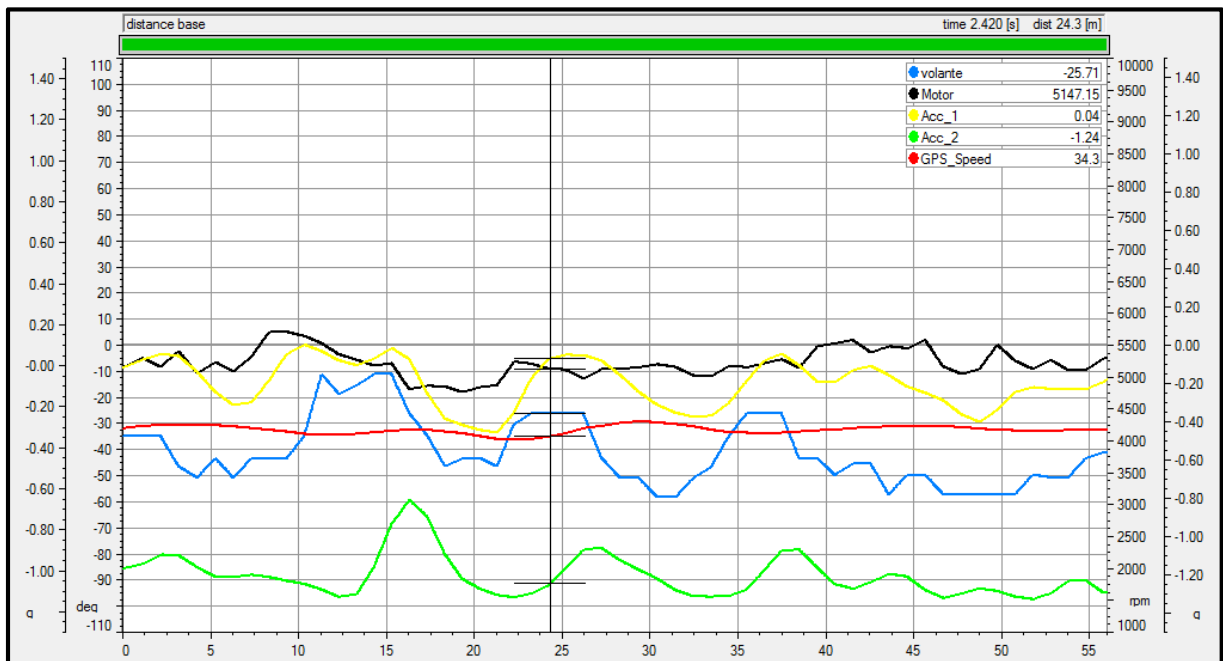


Figura 75 – Aquisição de dados simulando uma volta no skid pad  
 Fonte: Autor.

Já na figura 76, pode-se observar que no trecho a partir dos 3 segundos a velocidade aumenta sensivelmente, porém o veículo provavelmente já estava no limite da aderência. Observa-se que o veículo perde a aderência no eixo dianteiro e o piloto aumenta sensivelmente o ângulo de esterço do volante, sendo que o pico ocorre no período de 4 segundos. Imediatamente o veículo perde a aderência no eixo traseiro e o piloto faz a correção reduzindo pra praticamente zero a posição do volante próximo do período de 4,5 segundos. Mesmo com essa perda de aderência, o tempo da volta registrada foi de 5.379 s. Melhor que a volta anterior, o que indica que o veículo está mais próximo do limite de aderência, que é o objetivo dessa prova.

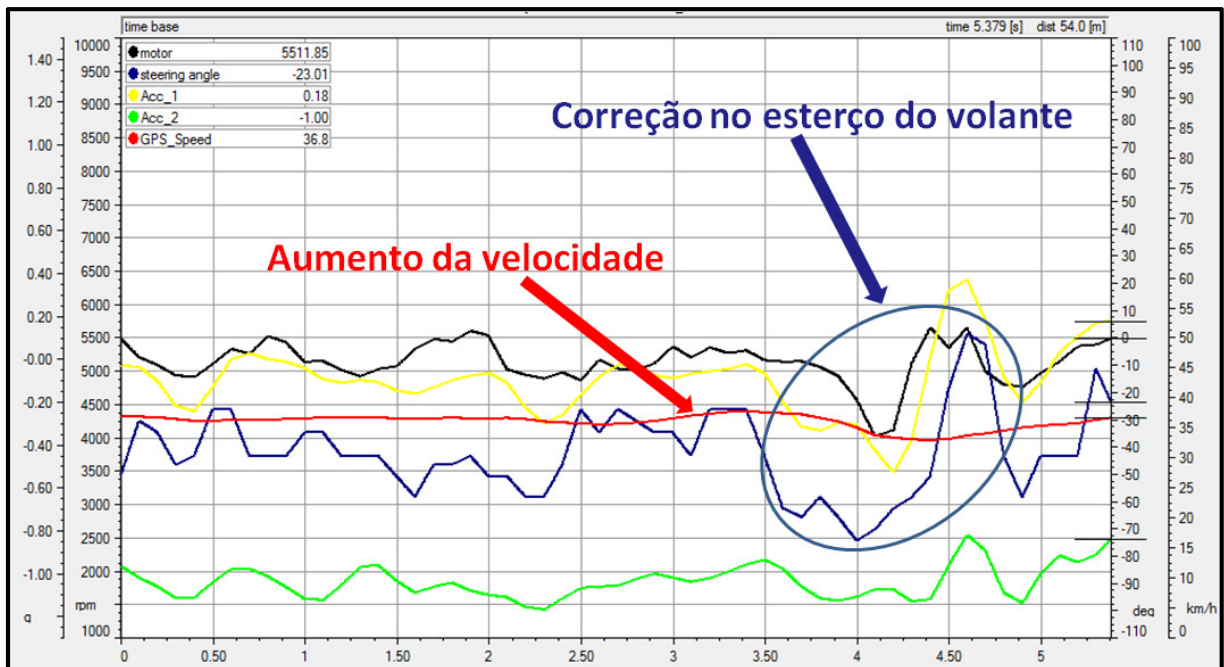


Figura 76 – Skid pad com perda de aderência.

Fonte: Autor.

#### 4.3.2 Enduro

O enduro de resistência é a prova que tem a maior pontuação dentro da competição Fórmula SAE. O veículo deve percorrer uma distância de 22 km sendo 11 km para cada piloto. De acordo com a regra, as retas não podem ter comprimentos superiores a 77 m, curvas de raio constante entre 30 e 54 m, curvas de raio mínimo de 9 m, slalon com cones entre 9 e 15 m, além de curvas e chicanes de raio progressivo.

Normalmente uma volta tem em média 1 km de extensão. Na figura 77, é possível observar o mapa descrito pelo GPS durante a V competição de Formula SAE Brasil no campo de provas da Goodyear. O gráfico possui um recurso muito útil, que varia a cor do traçado em diferentes setores em função da velocidade. Desta maneira é fácil identificar os pontos de alta e baixa velocidade, bem como a transição que o veículo sofre durante todo o trajeto. Essa informação é útil para verificar como é o desempenho e quais pontos podem ser melhorados.

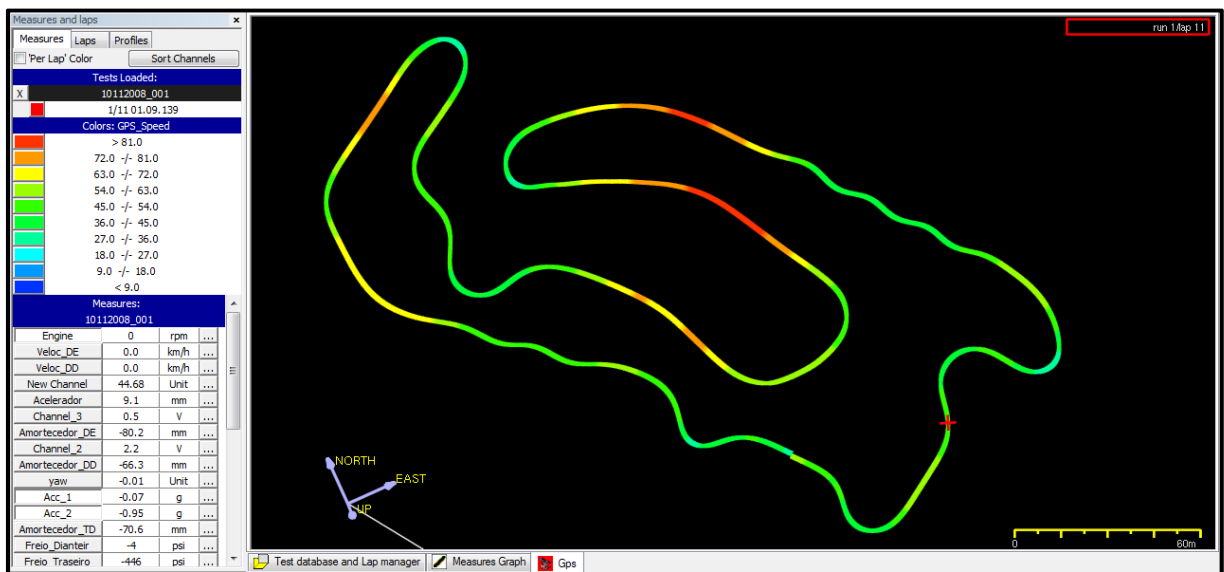


Figura 77 – Mapa do enduro traçado pelo GPS, com o recurso de graduação de cores para diferentes velocidades. Fonte: Autor

Na figura 78, pode-se observar graficamente como é o comportamento do veículo ao longo da volta. Temos em amarelo a aceleração longitudinal e em verde a aceleração lateral. A velocidade é representada pela cor vermelha; outras funções podem ser ativadas, mas é importante tomar cuidado para que a visualização não fique muito carregada.

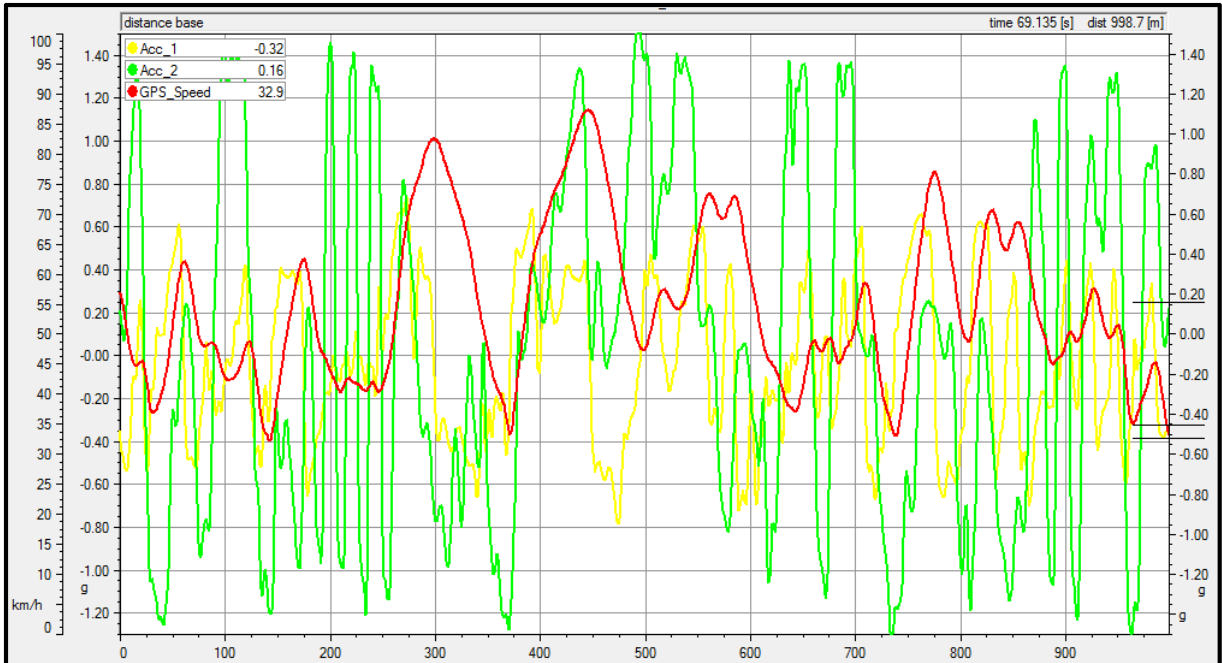


Figura 78 – Gráfico com velocidade, aceleração longitudinal e aceleração lateral  
Fonte: Autor

Para facilitar o entendimento do está acontecendo na pista, o software possui recursos de integração do mapa GPS com os dados representados graficamente. Na figura 79, é possível identificar através do cursor, que o veículo encontra-se em uma frenagem combinada com uma curva à esquerda. Essa trajetória provoca no exato momento uma desaceleração de  $0,61 \text{ m/s}^2$  combinado com uma aceleração lateral de  $0,52 \text{ m/s}^2$ ; neste momento, o veículo encontra-se na velocidade de  $58,4 \text{ km/h}$  medida pelo GPS. Esse parâmetro é muito importante para observar-se a estabilidade na frenagem, uma vez que esse tipo de frenagem sempre é complicado, exigindo muito equilíbrio do veículo e habilidade do piloto. Observando todas as voltas do enduro até completarem os 22 km é possível avaliar como foi a degradação dos pneus, dos freios, e qual é a influência no desempenho do veículo. Ainda na figura 79, no trecho de 200 a 250 m, pode-se observar a variação de  $-1,4$  a  $+1,4 \text{ m/s}^2$  da aceleração lateral (Acc\_2) representada pela cor verde. Isto se deve ao trecho do slalon, que pode ser visto no desenho da pista traçado pelo GPS e é referente ao trecho anterior a curva para a esquerda, sendo que velocidade média que o veículo contorna os cones do slalon é de  $42 \text{ km/h}$ .

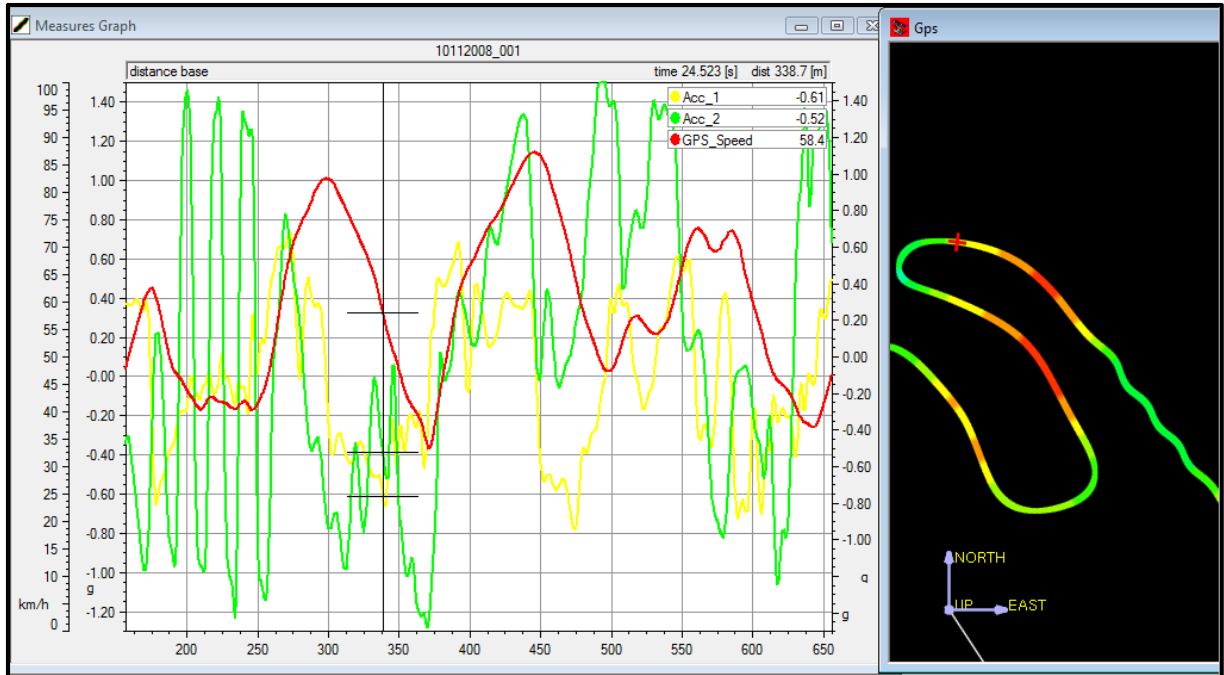


Figura 79 – Gráficos combinados com o mapa da pista, desenhado pelo GPS  
Fonte: Autor

Do lado humano, essa ferramenta tem a mesma importância para verificar como foi o desempenho do piloto durante o enduro. Se o preparo físico dele é aceitável, se o ritmo de corrida cair ao longo das voltas, é sinal que ele deve preparar-se melhor fisicamente. Se o desempenho for melhorando a cada volta, quer dizer que ele deve treinar mais, pois não está apto a tirar o potencial do equipamento desde o início. E também, se tiver momentos de altos e baixos é muito provável que ele não tenha equilíbrio psicológico, talvez por algum tipo de pressão ou outro fator externo. Esse acontecimento é muito comum nesse tipo de competição, onde os pilotos não são profissionais, e sim estudantes de engenharia. Por isso, mais uma vez, o sistema de aquisição de dados é uma ferramenta muito poderosa, pois é possível identificar quais são os pontos fracos, onde eles ocorrem e como podem ser melhorados. De uma maneira geral, podemos dizer que sem um sistema de aquisição de dados após um mal resultado no enduro, determinada equipe não saberia ter certeza onde foi o principal problema do mal resultado e conseqüentemente não estaria apta a solucionar o problema. Já com o sistema de aquisição de dados, a equipe pode identificar onde foi o problema, qual foi a intensidade dele e o que pode ser feito para melhorar. Se foi simplesmente um problema no freio, no motor, nos pneus, na pista, ou com o piloto.

### 4.3.3 Comparação dos estilos de pilotagem

Um dos grandes objetivos ao utilizar o recurso de aquisição de dados, é melhorar não só o desempenho do veículo, mas também o desempenho dos pilotos, que está atrelado a um melhor resultado final para a equipe. Portanto, conhecer como os pilotos estão dirigindo, só foi possível após a utilização do equipamento de aquisição de dados. Saber como cada piloto freia, acelera, esterça o volante e qual o traçado que cada um escolhe, são características muito fáceis de serem identificadas. Nos testes preparatórios para a competição internacional de 2009 em Detroit, EUA, a equipe Fórmula FEI fez os testes preparatórios no campus da Universidade de Lawrence. Uma simulação de enduro foi feita no campus, em um traçado de 250 metros com as condições parecidas com as que a equipe encontraria na competição no Michigan Motor Speedway. As voltas foram registradas e os tempos das melhores voltas de cada piloto foram identificados e analisados. O piloto A teve a melhor volta com o tempo de 18.593s e está identificado com a cor vermelha. O piloto B registrou o tempo de 19.544s e está identificado com a cor azul. Na figura 80, é possível observar que o traçado adotado pelos dois pilotos é bem diferente.

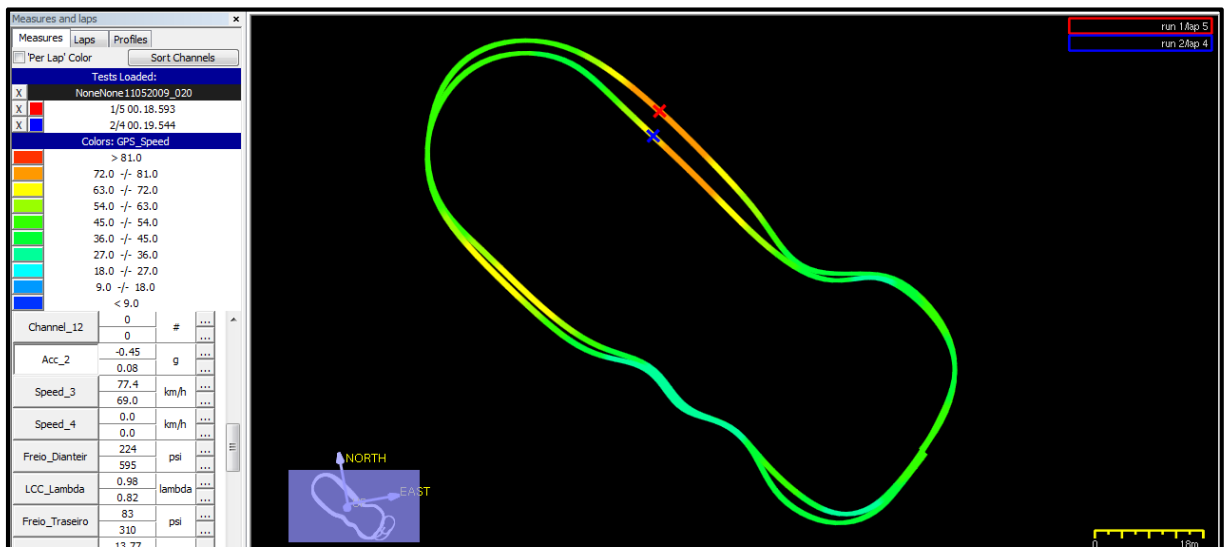


Figura 80 – Comparação dos traçados realizados por dois pilotos distintos  
Fonte: Autor

O piloto A, por utilizar o melhor traçado, tem melhores condições na aproximação da curva, o que permite a maior velocidade na entrada na curva. Na figura 81, pode-se observar que o piloto B já começa a diminuir a velocidade, enquanto o piloto A ainda está em plena aceleração, o que pode ser facilmente notado pela comparação das cores no mapa da pista,

que representam a velocidade. No exato momento do gráfico da figura 81, onde o cursor está posicionado, no trecho da pista logo após 80m, a velocidade do piloto A é de 78,2 km/h, enquanto a do piloto B é de 70,8 km/h.

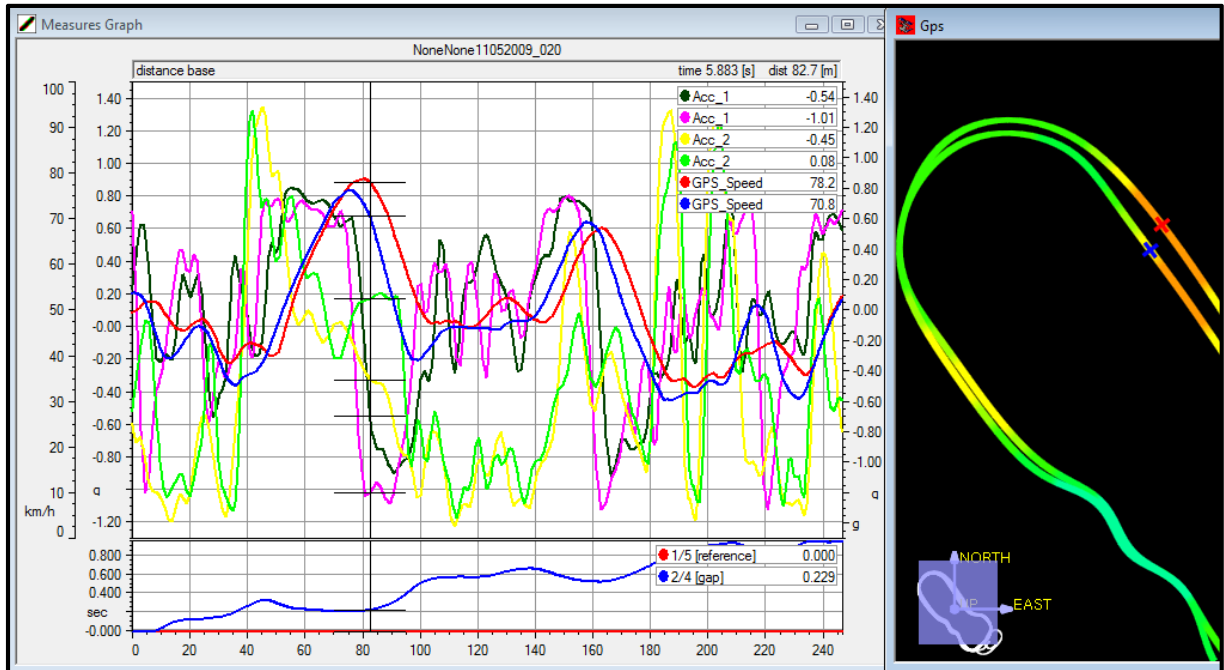


Figura 81 – Comparação da velocidade de entrada na curva entre os pilotos A e B.  
Fonte: Autor

Ainda relacionando o aproveitamento do traçado, a figura 82 é mais um exemplo do mau aproveitamento do traçado do piloto B em relação ao piloto A. A coloração verde do piloto A indica uma velocidade superior a do piloto B, que está na faixa azul. É nítido que o ponto de tangência da curva foi antecipado pelo piloto B, conseqüentemente a velocidade mais baixa é o resultado do mau aproveitamento do traçado, uma vez que ambos os pilotos possuem o mesmo equipamento.



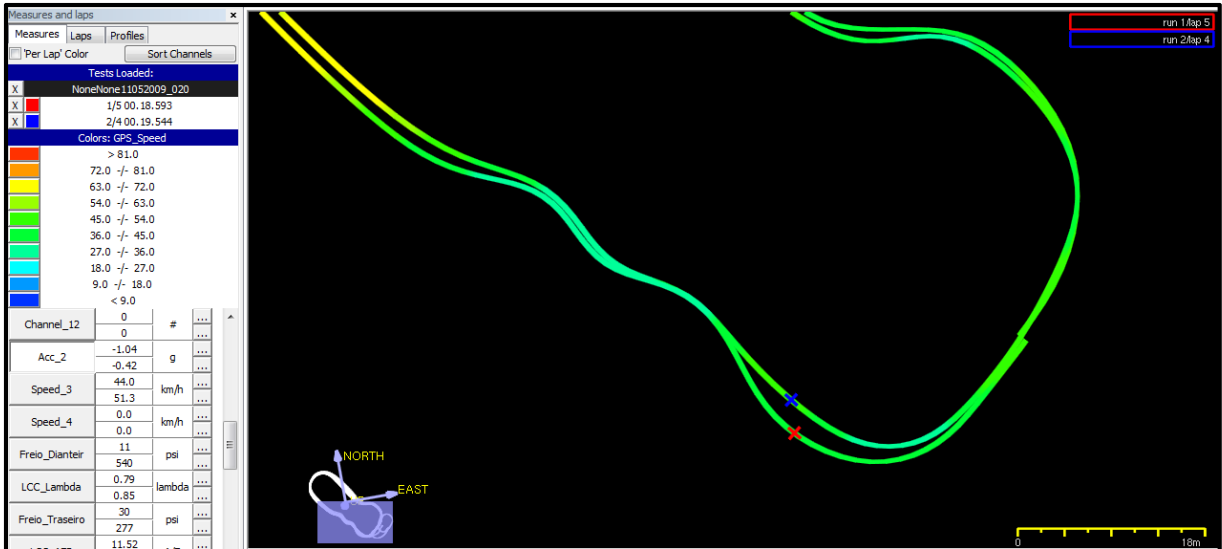


Figura 82 – Ponto de tangência antecipado pelo piloto B.  
Fonte: Autor

A maneira da aproximação dos cones para o slalon também é um item que requer bastante atenção, não só por ser um ponto de baixa velocidade, mas também por ser um ponto em que o piloto passa muito perto dos cones, vide figura 83, e o risco de uma penalização devido ao toque é muito alto.



Figura 83 – Slalon no enduro do F-SAE internacional, Michigan speedway, 2009.  
Fonte: Kimi Bucchi, [www.detroit-scca.org](http://www.detroit-scca.org)

Um traçado otimizado é sempre o objetivo em comum de todos os pilotos; entretanto, o traçado realizado pelo piloto B é o exemplo de uma aproximação ruim no primeiro cone, que compromete a seqüência dos próximos cones, vide a figura 84. Devido ao melhor traçado,

o piloto A consegue entrar no slalon com velocidade de 40,2 km/h contra 33,1 km/h do piloto B. Como consequência da má aproximação, todo o trecho do slalon ficou comprometido e a curva da velocidade de contorno dos cones do piloto A é superior a do piloto B; vide área destacada no gráfico da figura 84.

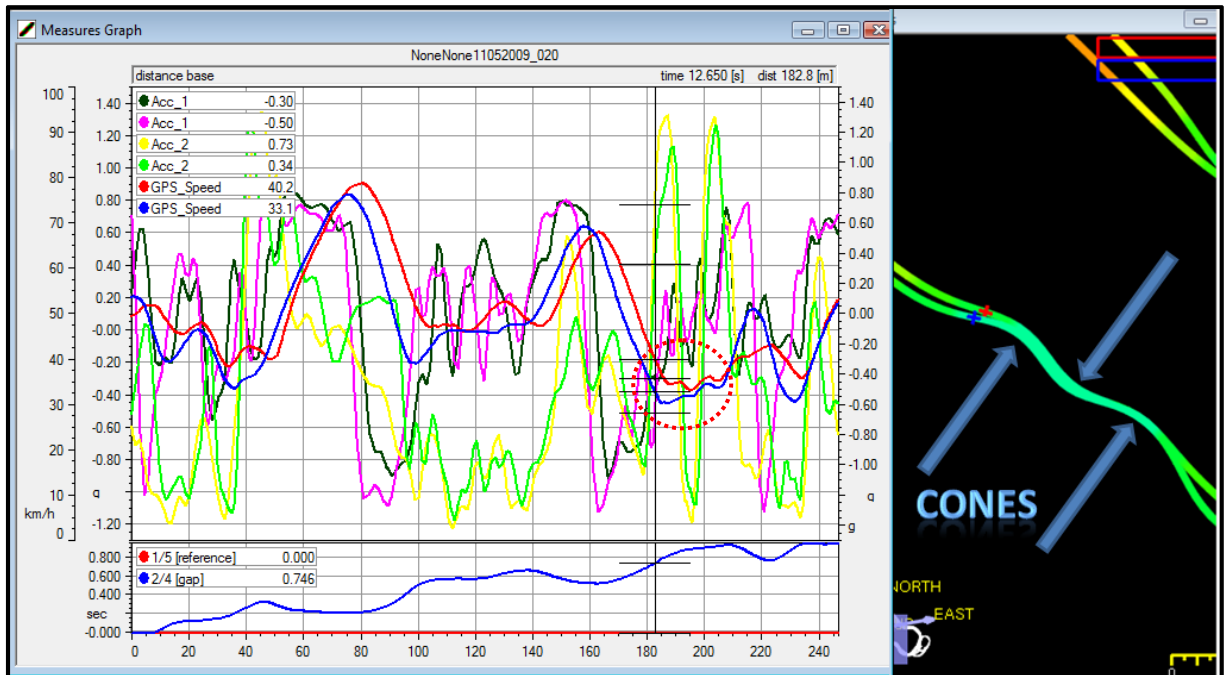


Figura 84 – Velocidade de contorno dos cones.  
Fonte: Autor

A frenagem também deve ser analisada, uma vez que o protótipo RS4 está equipado com sensores de pressão instalados individualmente nas linhas de freio (dianteiro / traseiro). É possível observar na figura 85, como é o modo de frenagem de cada piloto. No gráfico temos: piloto A – pressão de freio dianteiro representado pela cor amarela e traseiro representado pela cor magenta, o piloto B é representado pelas cores verde e roxa para as pressões de freio dianteiro e traseiro respectivamente. Um fato interessante é que o piloto A, além de ser mais rápido, é o que freia menos. Isso se deve também a execução de um traçado que proporciona melhor aproveitamento da pista. Entretanto, observando o gráfico da figura 85, no trecho da pista referente a 80 metros, o ponto de maior velocidade, onde ocorre a frenagem mais forte, o piloto A exige 460 psi de pressão de freio dianteiro, enquanto o piloto B utiliza 550 psi, e para a traseira, o piloto A utiliza 215 psi e o piloto B utiliza 300 psi. Na ultima curva, onde o cursor está posicionado, cerca de 220 m, o piloto A praticamente não freia enquanto o piloto B pressiona fundo o pedal do freio, e atinge 540 psi na dianteira e 280 psi na traseira.

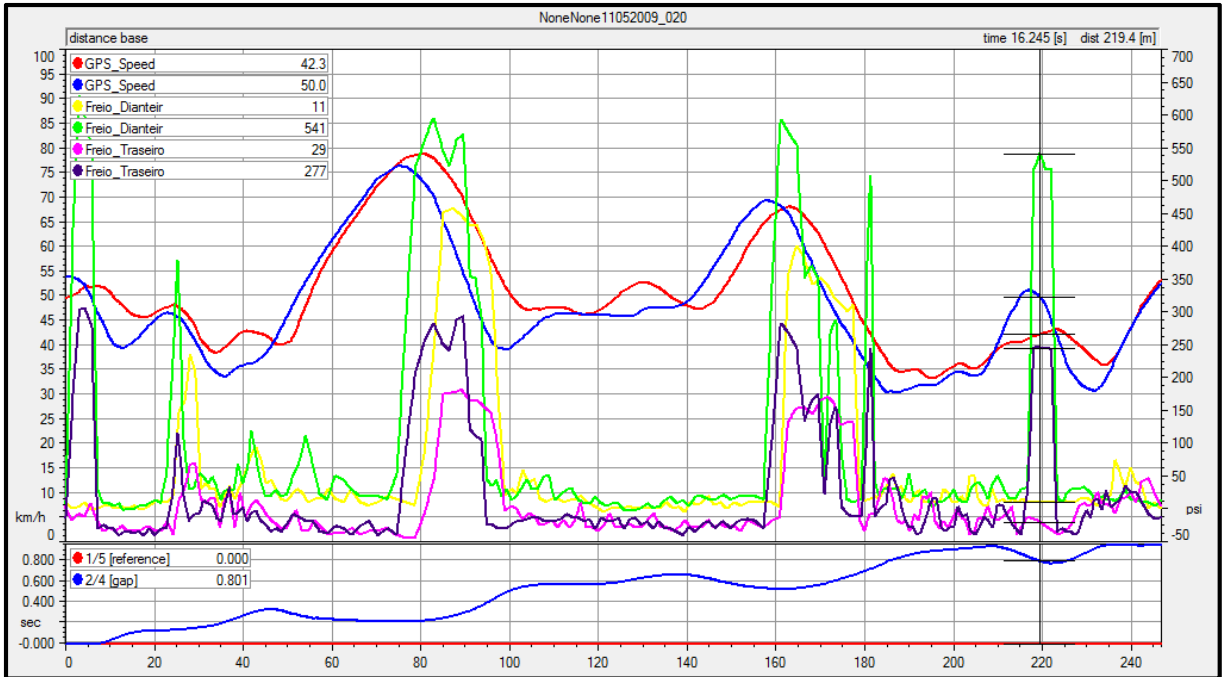


Figura 85 – Comparação da frenagem entre os pilotos A e B, pressões separadas entre dianteira e traseira.  
Fonte: Autor

Utilizando o histograma, podemos comprovar que o piloto B estatisticamente utilizou o freio de maneira mais brusca, vide os resultados das figuras 86 e 87. A figura 86 relaciona a utilização do feio dianteiro. O piloto A, representado pela cor amarela, utilizou o freio nos regimes mais baixos, enquanto que o piloto B, cor verde, utilizou as faixas mais altas.

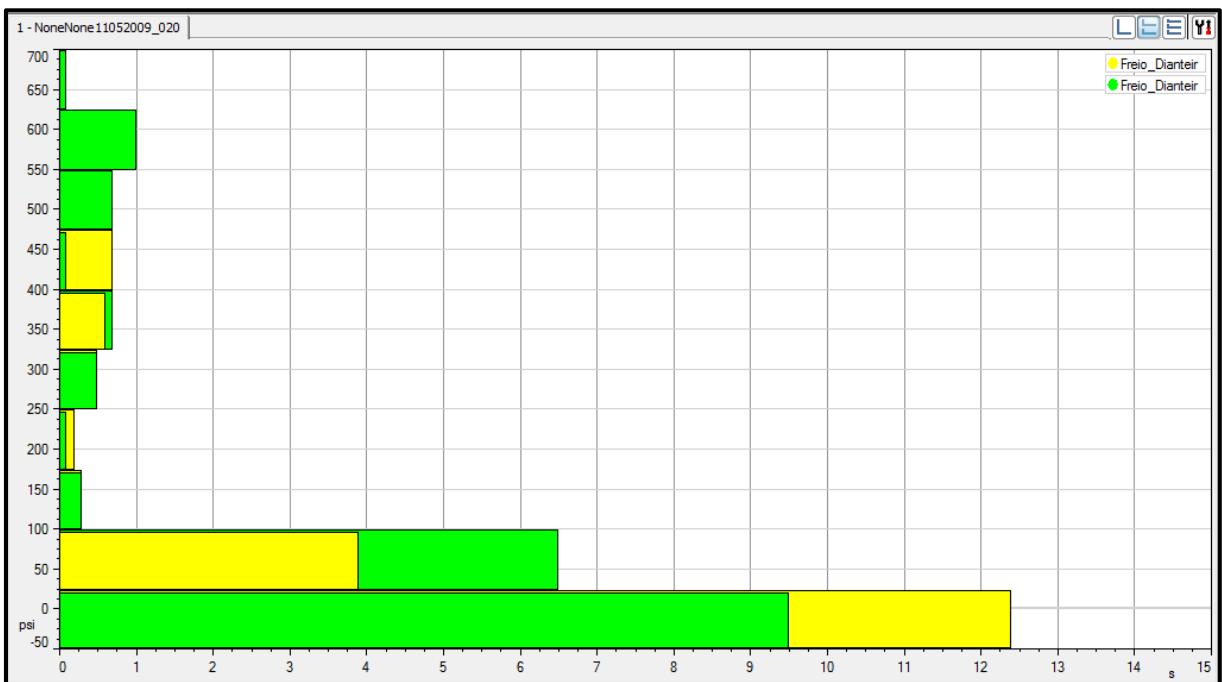


Figura 86 – Histograma de utilização do feio dianteiro. Piloto A amarelo, piloto B verde.  
Fonte: Autor

O histograma do freio traseiro também mostra a tendência do piloto B utilizar mais o freio que o piloto A, como pode ser visto na figura 87.

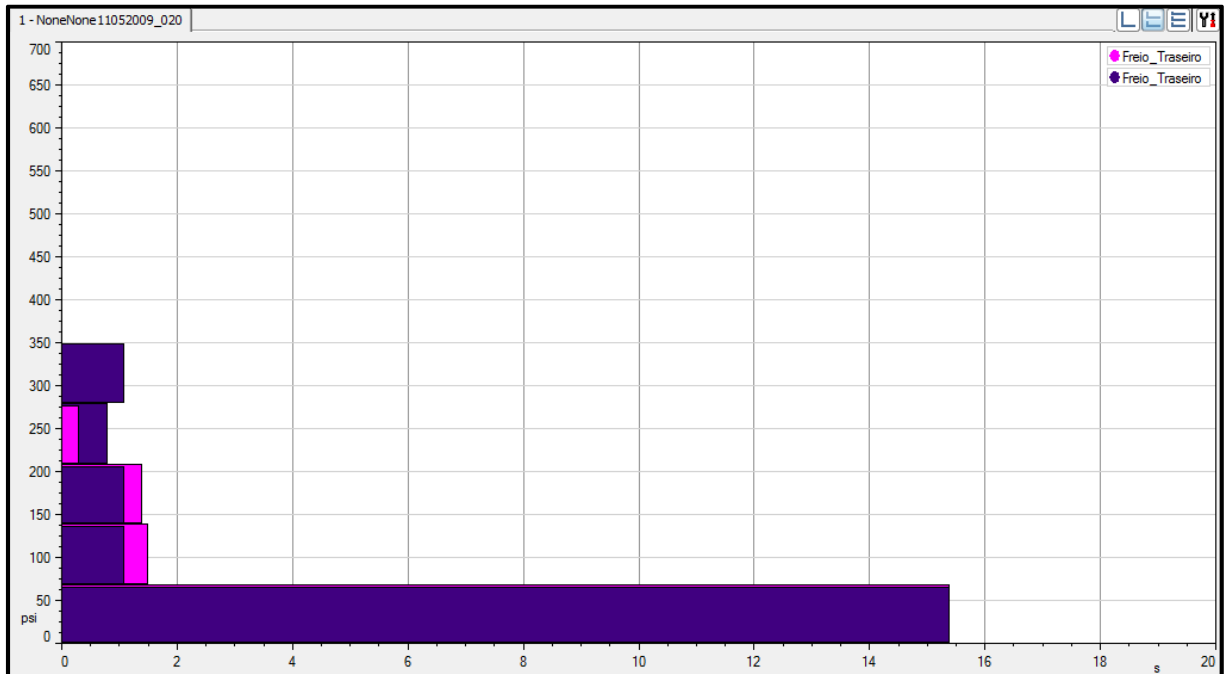


Figura 87 – Histograma de utilização do feio traseiro. Piloto A magenta, piloto B roxo.  
Fonte: Autor

Essa comparação é muito importante, pois é possível identificar que o piloto A utiliza menos o freio e ainda consegue ser 1 segundo mais rápido por volta que o piloto B. O equipamento é menos solicitado na condução do piloto A, o que representa menos riscos de quebra no enduro e maior durabilidade dos componentes. Com certeza, o piloto B, deve corrigir o seu estilo de pilotagem para poder tirar mais proveito do veículo, e também poupar o equipamento.

#### 4.3.4 Aceleração

A aceleração é a prova dinâmica que tem a segunda maior pontuação e o tempo de duração não passa de 5 segundos. Entretanto, esses 5 segundos são cruciais no resultado final da prova. Não é a toa que esse é um dos testes mais ponderados pela equipe Fórmula FEI. De acordo com a regra da competição, o veículo deve partir do repouso em um trecho plano de 75 metros. É possível observar na figura 88 o veículo RS3 na prova de aceleração durante a IV competição Fórmula SAE Brasil em 2007.



Figura 88 – RS3 na prova de aceleração. Americana, 2007.  
Fonte: Cortesia Fórmula FEI.

Devido ao espaço limitado no campus da FEI, a pista de testes utilizada pela equipe Fórmula FEI é de 50 metros. Essa diferença não afeta muito os ajustes para essa prova, pois o maior problema do Fórmula SAE é a arrancada, sendo que o torque transmitido aos pneus é muito alto e o problema de perda de tração é constante. Analisando os dados da figura 89, pode-se ter uma idéia da consistência do gráfico da aceleração.

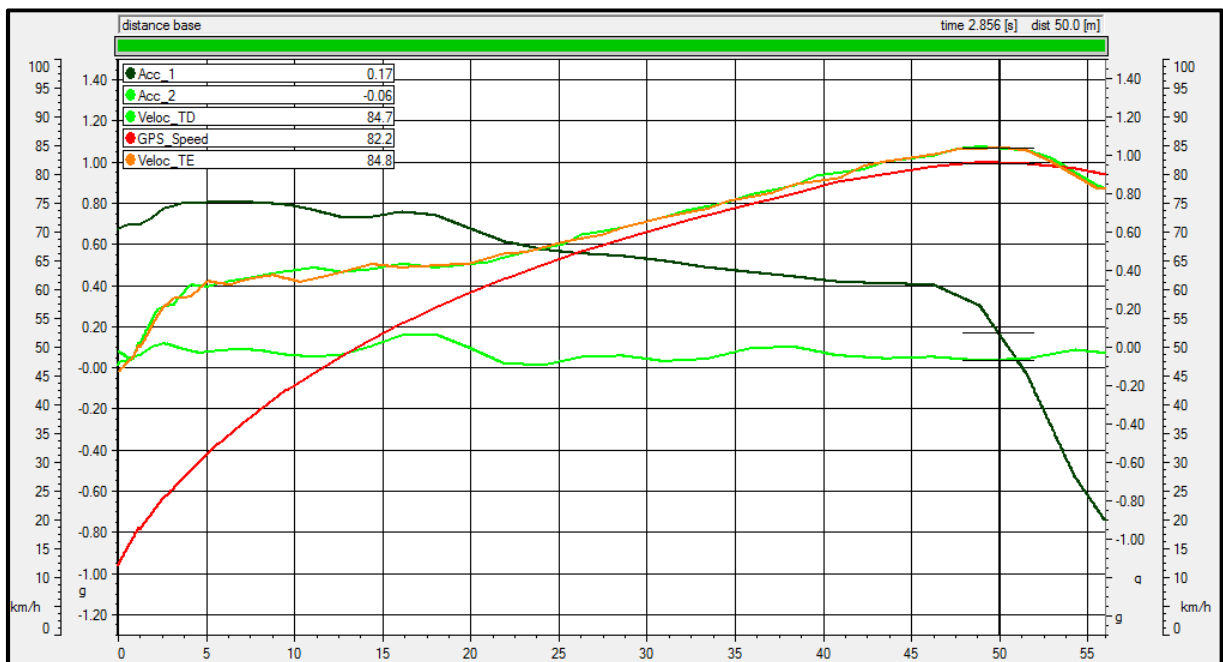


Figura 89 – Gráfico da aceleração na pista de testes da FEI.  
Fonte: Autor.

Nota-se que quando o veículo passa pelo sensor onde se inicia a aquisição, a velocidade é de 12 km/h. Essa diferença aparece porque o veículo está a poucos metros do sensor. É nítido que no trecho inicial, até os 25 metros, o veículo patina demasiadamente as rodas traseiras (TD e TE) e o gráfico aponta uma diferença de 35 km/h no marco zero. A diferença vai diminuindo progressivamente até igualar completamente a partir dos 25 metros. Esse comportamento é indesejado, pois perde-se o potencial do motor. Alguns ajustes podem ser feitos no veículo, como por exemplo, alterar a pressão dos pneus, diminuir a cambagem traseira, alterar o caster traseiro, modificar o composto do pneu, ou alterar o mapa de injeção do motor, na opção do controle de largada. Os valores da aceleração longitudinal também devem ser observados com atenção, pois esse é um indicador de qual é a intensidade que o veículo acelera. No gráfico da figura 89, a aceleração atinge o pico de  $0,8 \text{ m/s}^2$  no trecho de 5 metros e a partir dos 10 metros começa a cair gradativamente. Esse também é sem dúvidas um indicador do desempenho do veículo na aceleração.

#### 4.3.5 Autocross

O autocross consiste em um circuito com as mesmas características do enduro, porém, a diferença é que no autocross apenas é necessário uma volta. Portanto, essa volta deve ser a mais rápida possível e não há margens para erros. Nas competições internacionais ela é conhecida como “flying lap” ou volta voadora. Na figura 90, pode-se observar o RS3 realizando o autocross na Califórnia durante a F-SAE West competition em 2008. As características básicas para o sucesso nessa prova são destacadas a seguir:

- a) O desgaste dos pneus não importa;
- b) O Consumo de combustível não importa;
- c) O conforto do piloto não importa;
- d) O equilíbrio do veículo é importante;
- e) O pneu deve atingir a temperatura ideal no menor tempo possível.





Figura 90 – RS3 na pista do autocross. Califórnia, 2008.  
Fonte: Cortesia Fórmula FEI

Como foi dito anteriormente, o objetivo é realizar uma única volta rápida; portanto, o acerto do veículo deve ser voltado para maximizar a performance, ou seja, todos os ajustes da suspensão, motor, freio e pneus devem ser feitos em função do menor tempo de volta e das maiores acelerações laterais e longitudinais. O sistema de aquisição de dados é fundamental nesta etapa, sendo possível analisar graficamente todos esses parâmetros e decidir qual é o melhor ajuste da suspensão, qual é a melhor relação de transmissão, qual é a melhor pressão dos pneus e qual é o melhor mapa de injeção de combustível no motor.

Para ilustrar como podem ser feitas essas análises, um teste foi realizado na pista de testes da FEI em janeiro de 2009. Este era mais um dos diversos testes realizados no desenvolvimento de novos pneus Pirelli para a aplicação Fórmula SAE. O objetivo era encontrar a melhor opção para um circuito misto, sendo que duas amostras estavam sendo analisadas. A melhor volta obtida com o pneu A foi de 16,861 s e com o pneu B, o melhor tempo foi de 17,190 s, uma diferença de 0,329 s. Primeiramente, o gráfico g-g será analisado para verificar como o veículo se comportou nas curvas, nas acelerações e nas frenagens. É possível observar na figura 91, os resultados das acelerações longitudinais e laterais com o pneu A, representadas pela cor verde escuro. Os pontos são distribuídos durante a volta, na ordenada temos as acelerações laterais e na abscissa as acelerações longitudinais.

Para um melhor entendimento de como esses dados são representados, a figura 91 mostra como identificar e diferenciar as acelerações laterais e longitudinais. Uma característica dos veículos de competição e que pode ser notada no gráfico, é exatamente a combinação entre aceleração lateral e longitudinal. Isso significa que o veículo pode realizar curvas acelerando ou desacelerando. O grande foco da análise é em relação a intensidade desta combinação.

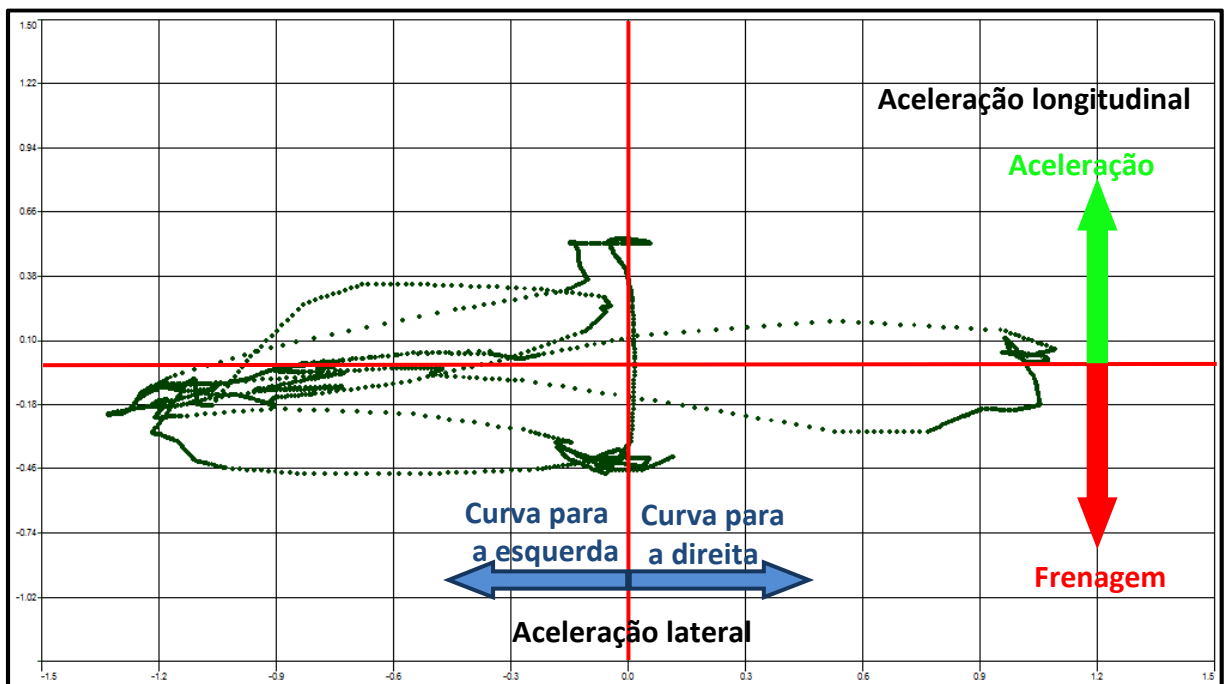


Figura 91 – Interpretação do diagrama g-g com o pneu A.  
Fonte: Autor

A mesma análise é feita com o pneu B, e os valores extraídos são comparados, como pode ser visto na figura 92. Os valores das acelerações do pneu B são representados pela cor magenta.



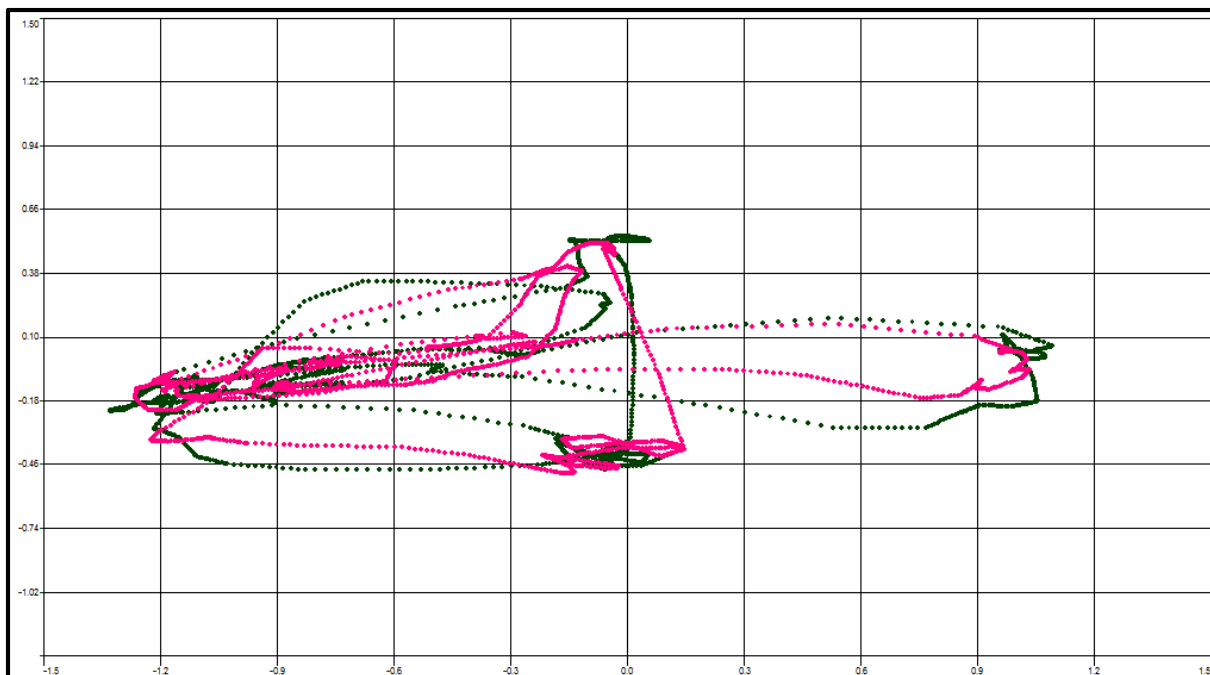


Figura 92 – Diagrama g-g com os pneus A e B.  
Fonte: Autor

É possível observar através da figura 93, que o pneu A possui maior capacidade de entrar na curva desacelerando, manobra conhecida como “braking in a turn”. Essa característica de condução é normalmente favorável aos veículos de competição, principalmente o Fórmula SAE, que tem o circuito de baixa velocidade, com trechos de retas e curvas bem fechadas. O pneu A também é superior ao pneu B com relação a capacidade de acelerar durante a curva. Essa característica é fundamental para atingir melhores velocidades no final da reta, pois o trecho onde é iniciada a aceleração é antecipado.

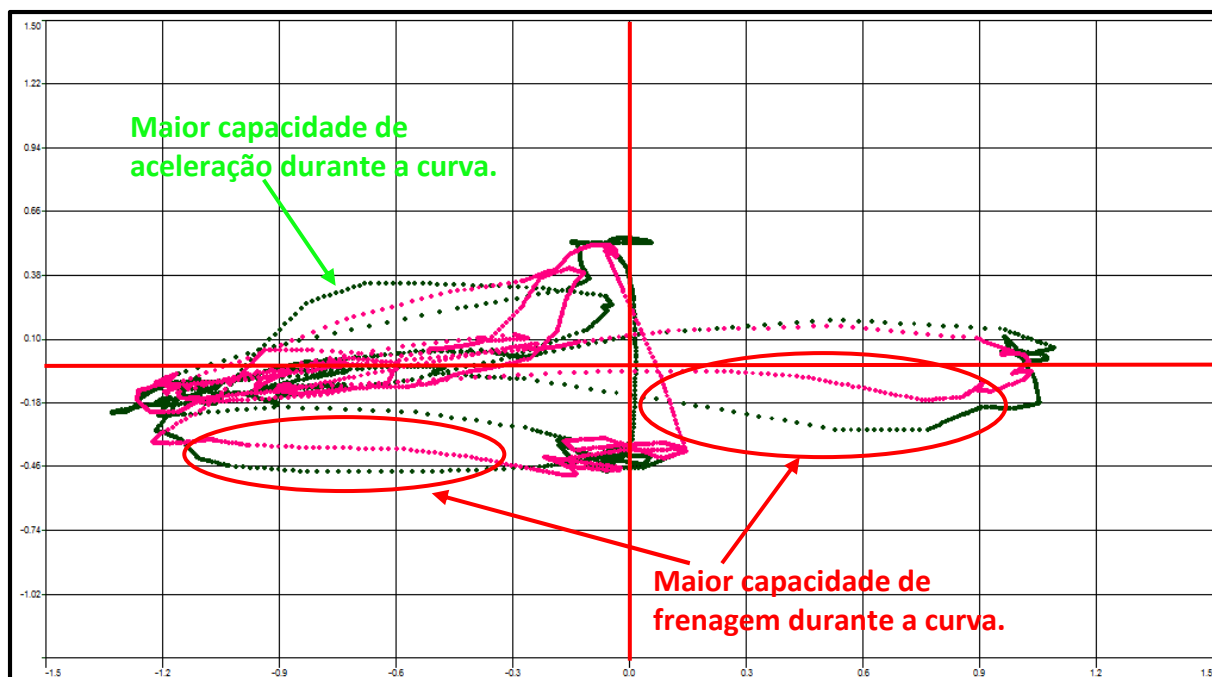


Figura 93 – Diagrama g-g, comparando os dois compostos na pista de testes da FEI.  
Fonte: Autor

Outra conclusão importante nesta análise é o limite de aceleração lateral que cada pneu atingiu. Nota-se que o pneu A atingiu valores maiores tanto para a esquerda quanto para a direita, conforme pode ser visto na figura 94.

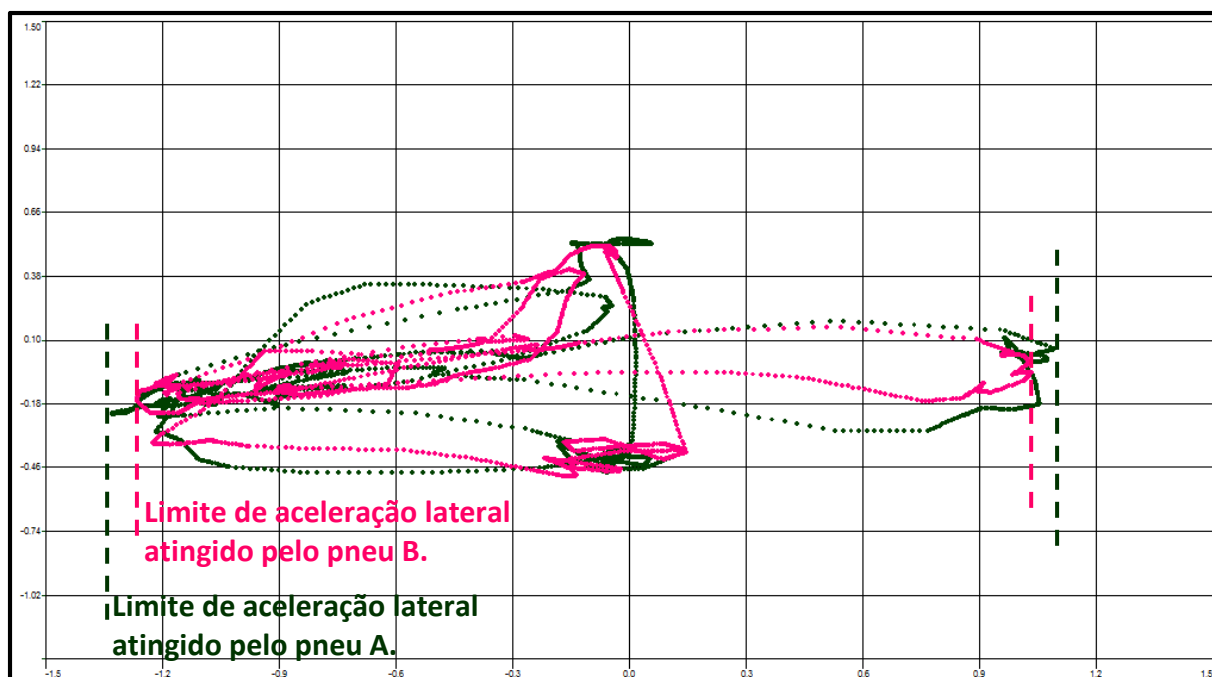


Figura 94 – Limites de aceleração, comparando os dois compostos na pista de testes da FEI.  
Fonte: Autor

É importante destacar que para esse tipo de análise, as influências para a distorção desses resultados devem ser minimizadas. Neste teste, por exemplo, as condições da pista não foram alteradas, não houve variação significativa da temperatura do asfalto, e o mais importante, o piloto era o mesmo. Preferencialmente, deve-se escolher o piloto mais experiente e não necessariamente o mais veloz. É importante ter um piloto que possa ser constante e que dificilmente cometa erros, pois os erros podem mascarar os resultados. Os testes também nunca devem ser únicos, pois as chances de alguma coisa dar errado em apenas uma amostra são significativamente altas.

#### 4.3.6 Manobra Fish Hook

A manobra *Fisch Hook* consiste em verificar o comportamento dinâmico do veículo em condição transiente de transferência de carga, o caminho percorrido para esta manobra foi traçado pelo GPS e pode ser observado na figura 95.

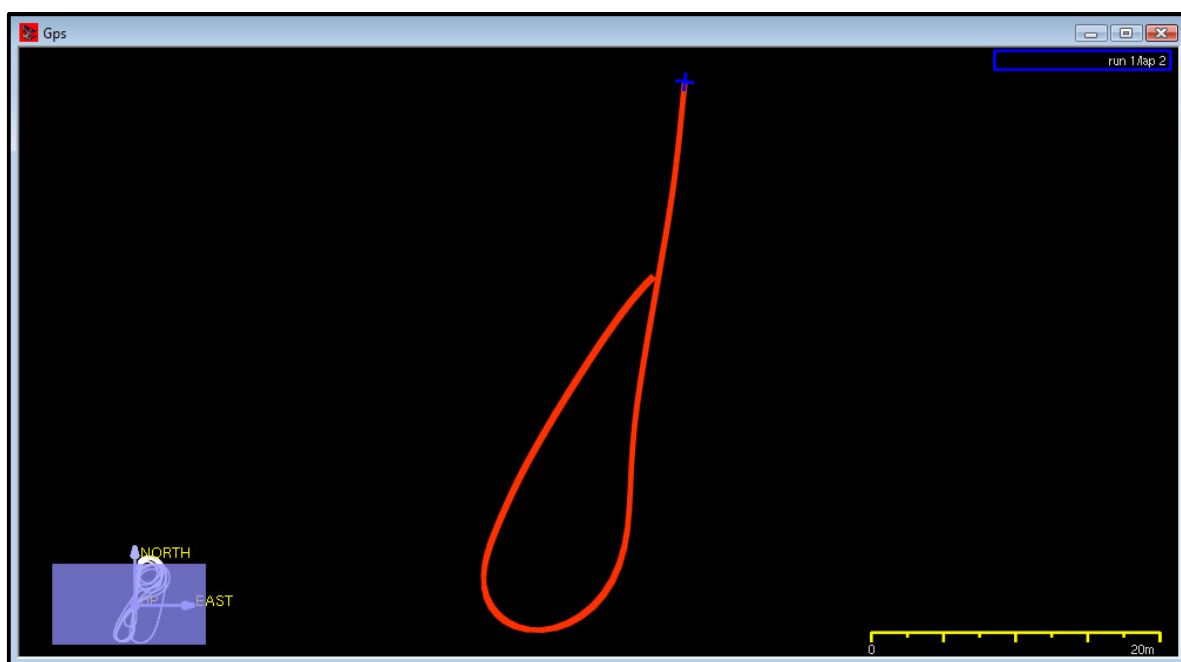


Figura 95 – Manobra Fish Hook – mapa traçado pelo GPS.  
Fonte: Autor

Através do gráfico da figura 96, pode-se observar que a aceleração lateral, representada pela cor azul, é proporcional ao ângulo do esterço do volante em laranja. Nota-se que as velocidades das rodas traseiras mudam conforme o veículo percorre a trajetória ilustrada pelo GPS. No momento em que o veículo faz a curva para a esquerda, a roda traseira

direita tem maior velocidade porque descreve um raio maior e quando o veículo faz a curva para a direita, a roda traseira esquerda atinge maior velocidade. Esse momento de transição pode ser observado no instante 2,9 s na figura 96.

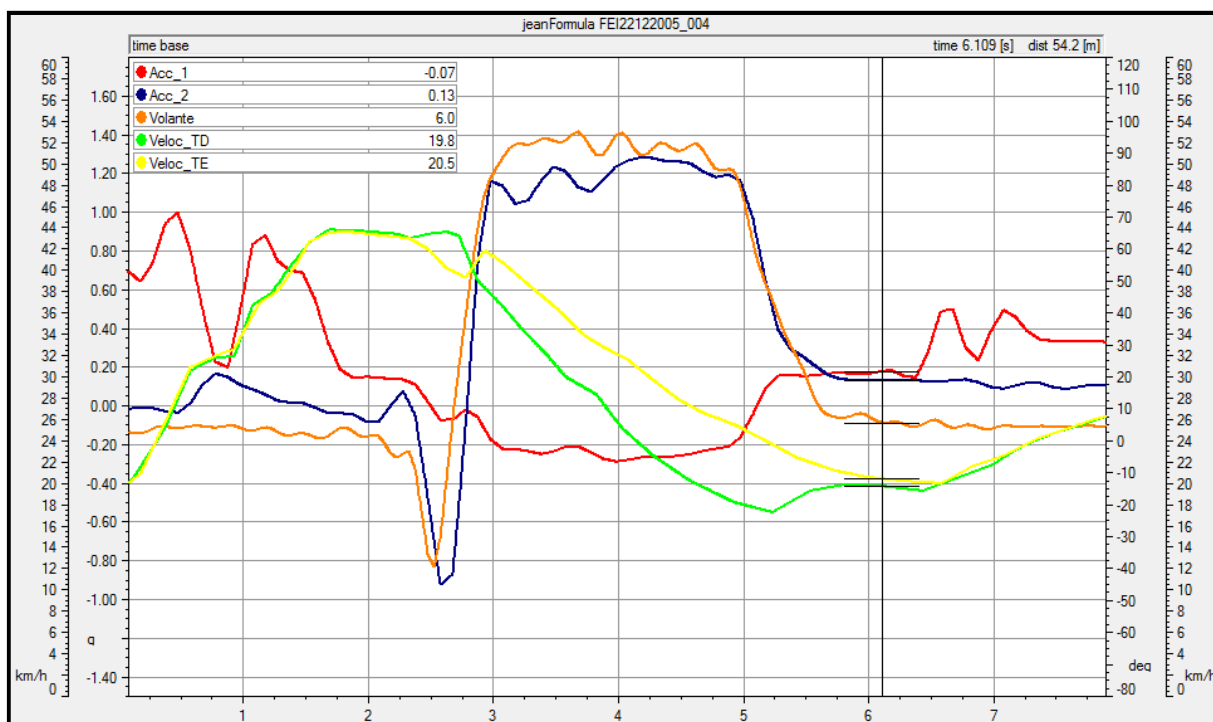


Figura 96 – Gráficos da manobra Fish Hook .  
Fonte: Autor

Com os dados obtidos nesta manobra, é possível alimentar o software de simulação MSC/ADAMS<sup>®</sup> com os valores do esterço do volante de direção em função do tempo. Essa correlação é importante porque quando se obtém um modelo representativo, é possível reduzir o tempo e as despesas despendidos com os testes.

#### 4.4 Correlações entre a aquisição e os dados de projeto

Como foi mostrado no capítulo 2, existem diversos cálculos de dinâmica veicular, que são de extrema importância durante a concepção de um veículo de competição Formula SAE. A utilização do sistema de aquisição de dados é uma ferramenta importante para ilustrar o comportamento dinâmico do veículo e seus subsistemas. Com os dados, é possível comprovar se as condições de contorno do projeto estão coerentes, se existe algum problema de concepção ou até mesmo erros na construção do veículo. Alguns exemplos serão mostrados a seguir.

#### 4.4.1 Ângulo de cambagem

A suspensão do protótipo RS3 foi modelada e simulada no software MD ADAMS R3<sup>®</sup>, onde foi obtido o gráfico com a cinemática das suspensões dianteiras e traseiras. Com o gráfico, é possível gerar a equação que descreve o movimento da suspensão, conforme pode ser visto na figura 97. Nota-se que, por questões de compatibilidade com o software do sistema de aquisição de dados AIM, foi adotado que a posição zero do amortecedor é no momento que o veículo está suspenso e a suspensão totalmente distendida.

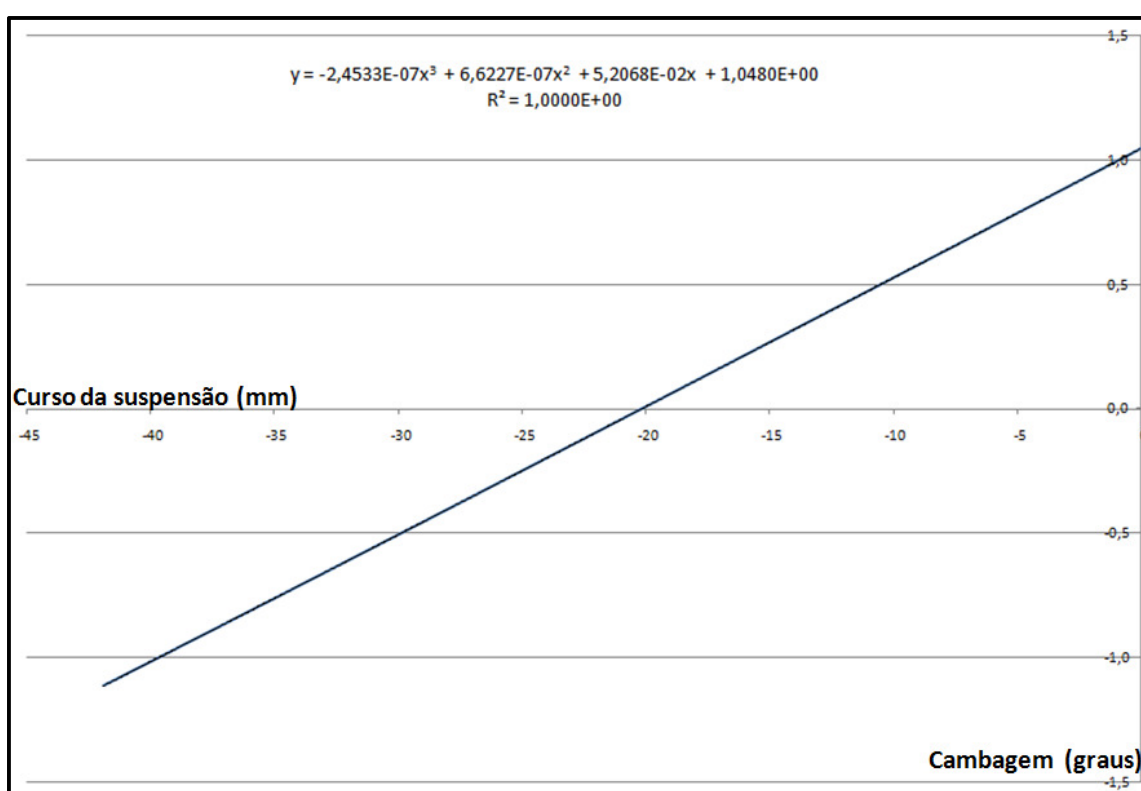


Figura 97 – Gráfico do ângulo de cambagem da suspensão dianteira esquerda.

Fonte: Autor

Nota-se que para a cada 20 mm de curso de suspensão, tem-se um ganho de 1 grau na cambagem. Experimentalmente esses valores foram atingidos com o veículo na pista de testes da FEI, conforme pode ser visto na figura 98, no ponto em que curva da suspensão em verde atinge a posição de - 20,2 mm, o valor do ângulo da cambagem, representado pela curva na cor preta é de 1°.

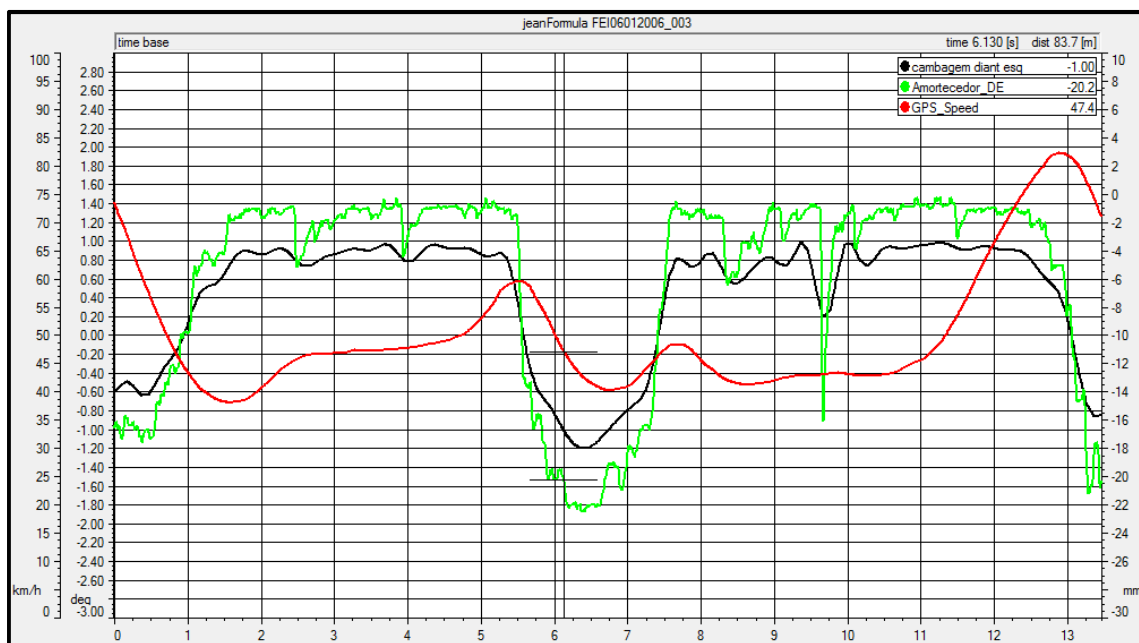


Figura 98 – Gráfico do ângulo de cambagem da suspensão dianteira esquerda obtido no AIM.

Fonte: Autor

#### 4.4.2 Transferência longitudinal de carga

De acordo com a equação 06 para uma aceleração longitudinal de 0,91 g aferida na pista, temos:

$$\Delta P_x = \frac{300.0,91.3000}{1600.9,8} = 52,2 \text{ N}$$

Isto significa que no momento que o veículo atinge a aceleração máxima, o aumento da carga do eixo traseiro é de aproximadamente 50 N. Graficamente, através da aquisição de dados é possível observar na figura 99 como é a transferência de carga no sentido longitudinal representado pela cor verde. Observa-se que no início da aceleração ocorre o pico da transferência, aproximadamente 50 N, gradativamente conforme o veículo vai ganhando velocidade, o valor tende a cair para zero.

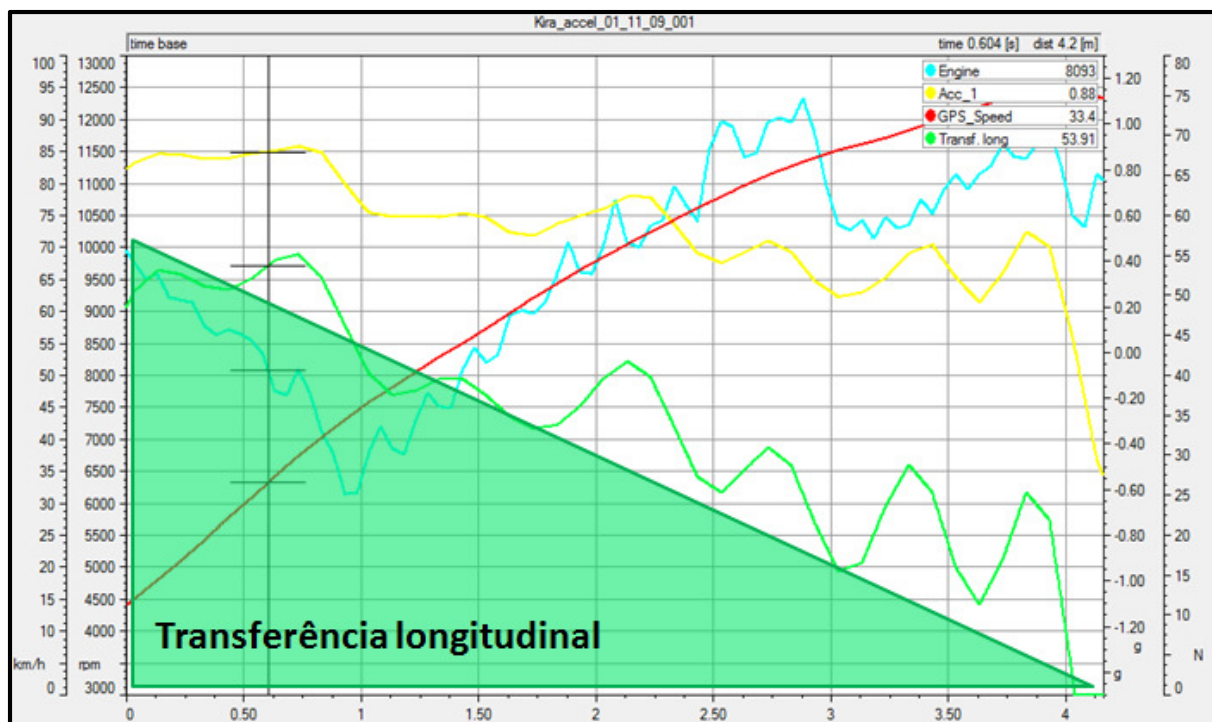


Figura 99 – Transferência de carga longitudinal, representada pela cor verde, durante uma aceleração.  
Fonte: Autor

#### 4.4.3 Transferência lateral de carga

Para a transferência de carga lateral, utilizou-se a equação 10. Com a manobra Skid Pad, obtêm-se os maiores valores de aceleração lateral devido ao veículo estar sempre no limite de aderência. Com o valor máximo da aceleração lateral obtido de 1,5 g, é possível calcular a máxima transferência lateral de carga:

$$\Delta P = \frac{300 \cdot 1,5 \cdot 3000}{1245,98} = 110,6 \text{ N}$$

Isto significa um acréscimo de 110,6 N no lado externo do veículo. Ou seja, se a curva é para a esquerda, o acréscimo é no lado direito e vice-versa. Conforme a figura 100 é possível observar os valores da transferência lateral de carga na cor laranja. A área colorida em laranja do gráfico representa a transferência lateral de carga durante a prova de skid pad. Nota-se que o regime é constante, portanto a variação da transferência de carga é mínima.

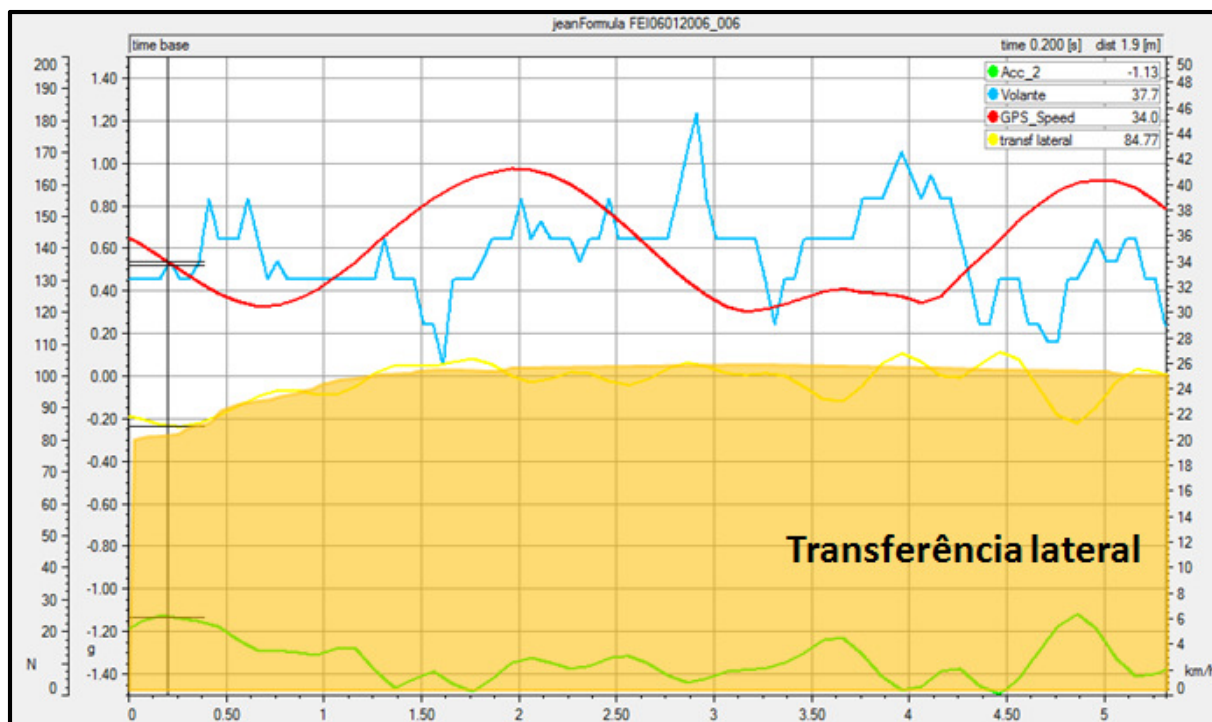


Figura 100 – Transferência de carga lateral, representada pela cor laranja, durante o Skid Pad.

Fonte: Autor

#### 4.4.4 Curvas de potência e torque do motor

A maioria dos sistemas de aquisição de dados possui uma ferramenta capaz de extrair as curvas de potência e torque do motor, considerando as perdas do sistema de transmissão. Neste cálculo são considerados:

- A massa do veículo;
- O coeficiente aerodinâmico ( $C_x$ ) e a área frontal para o cálculo de resistência aerodinâmica;
- Rotação do motor (RPM);
- Velocidade do veículo (km/h);
- Aceleração longitudinal (ACC\_1).

Na figura 101, os parâmetros como: massa, área frontal e o coeficiente aerodinâmico foram preenchidos para que os cálculos possam ser feitos com maior precisão.



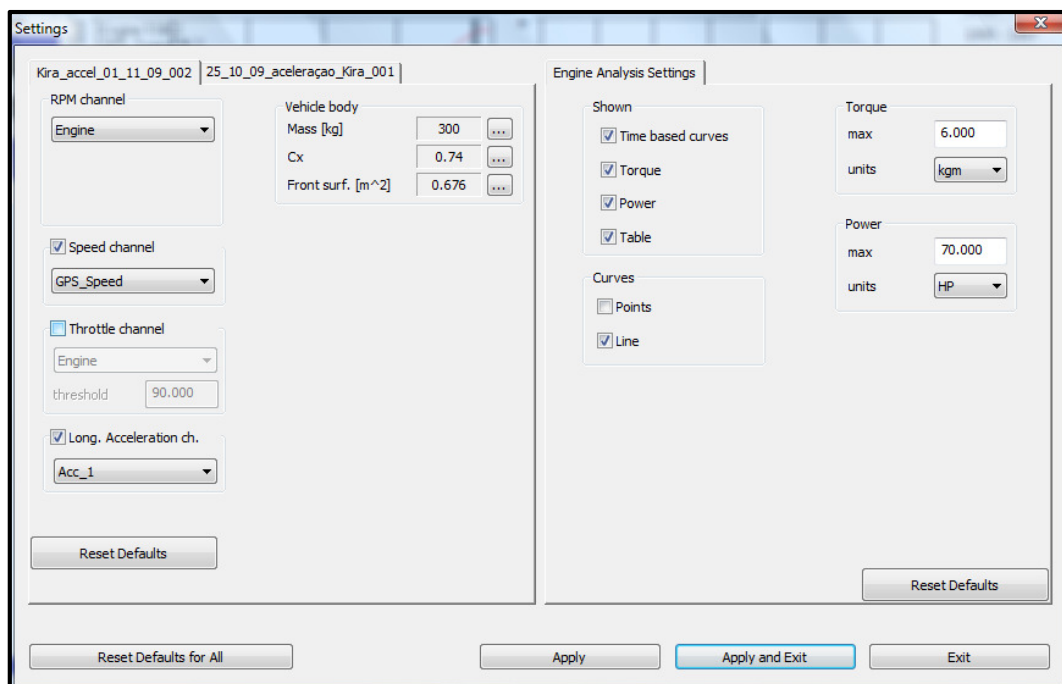


Figura 101 – Configurações para o cálculo da curva de potência e torque do motor.  
Fonte: Autor

Duas acelerações foram realizadas com ajustes de suspensão diferentes, com o objetivo de observar como a potência do motor pode ser melhor aproveitada. No primeiro caso, a curva em azul da figura 102 é possível observar os gráficos de torque e potência.

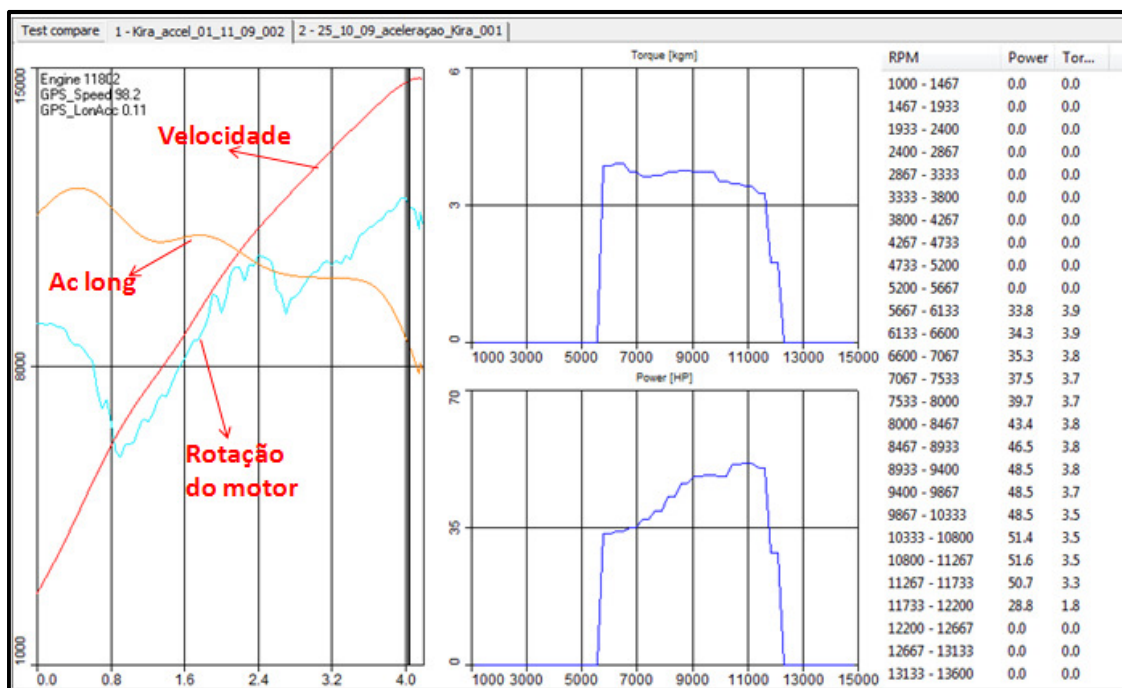


Figura 102 – Gráficos de potência e torque obtidos no software de análise do AIM.  
Fonte: Autor

Para a segunda passagem, foram alterados alguns parâmetros da suspensão, como por exemplo: aumento da pré carga da mola, aumento da carga do amortecedor e a pressão dos pneus, onde foram obtidas as curvas em vermelho da figura 103. Nota-se que houve um melhor aproveitamento da potência e torque do motor. Isso mostra qual direção que a equipe deve seguir para os acertos e regulagens específicas de cada prova.

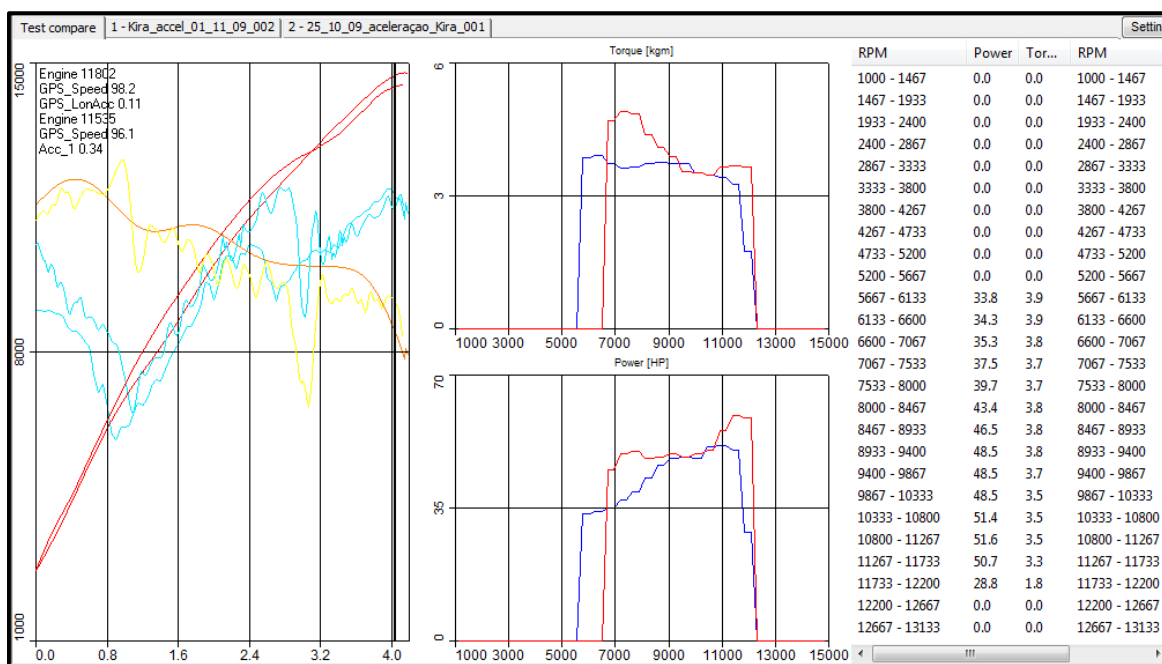


Figura 103 – Comparação das curvas de potência e torque obtidas através de diferentes regulagens.  
Fonte: Autor

As curvas de performance do motor foram extraídas em um dinamômetro de rolo, onde são subtraídas as perdas mecânicas da transmissão bem como a resistência ao rolamento. Como pode ser visto na figura 104, a potência máxima é de 85,2 HP a 13069 rpm e o torque máximo é de 5.9 m.kgf a 8795 rpm.

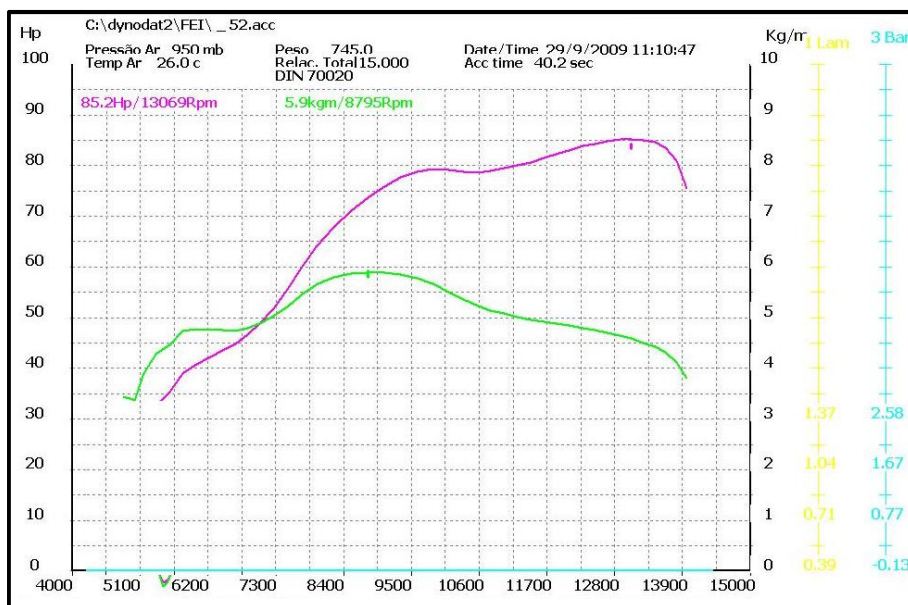


Figura 104 – Curva de potência e torque do motor medido em dinamômetro.

Fonte: Autor

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após demonstrar os resultados da aquisição de dados no capítulo anterior, é possível observar que essa ferramenta tornou-se um recurso fundamental para o aperfeiçoamento das equipes que participam da competição Fórmula SAE. Conhecer detalhadamente o desempenho é fundamental para uma possível evolução do veículo. O desenvolvimento torna-se mais rápido e preciso, pois os dados demonstram se as modificações realizadas são eficientes e quais foram os ganhos ou perdas. Com o equipamento de aquisição de dados, é possível conhecer todos os parâmetros do veículo em qualquer situação.

O equipamento completo de aquisição de dados exerce um papel fundamental para o desempenho do piloto e para o aperfeiçoamento das técnicas de pilotagem. Um programa de desenvolvimento de pilotos pode ser feito pela equipe, não só visando a melhora do desempenho, mas também para selecionar os pilotos mais adequados para as diversas provas da competição, como por exemplo: skid pad, aceleração, autocross e o enduro, pois cada prova exige uma habilidade particular em cada piloto que normalmente não são encontradas em um único piloto. Para a atividade do engenheiro de pista, todos os dados apresentados são de extrema importância para a tomada de qualquer decisão, como por exemplo, a estratégia de corrida ou escolha de um tipo de configuração ou ajuste do veículo. Todos os engenheiros de corrida devem ter acesso irrestrito ao sistema de aquisição de dados e quanto mais informações disponíveis, maior a chance de sucesso com o desempenho do piloto e do veículo.

Apesar de não ser a realidade da maioria das equipes brasileiras em 2009, esse sistema tornou-se uma tendência para os próximos anos e praticamente será um equipamento obrigatório para as equipes. Uma prova disto é a utilização em quase todas as equipes nas competições internacionais, onde o poder aquisitivo das universidades é maior, além dessa tecnologia ser mais acessível para a população dos países do primeiro mundo.

Para a equipe Fórmula FEI, o equipamento de aquisição de dados teve um papel fundamental para a conceituação do novo veículo, o RS4, que será utilizado durante a temporada de competições de 2009 e início de 2010. Baseado no desempenho do RS3, a equipe pôde definir metas para o novo veículo e conseqüentemente quais as modificações em cada sistema. Uma prova disso foi o desenvolvimento de novos pneus para aplicação exclusiva do Formula SAE em parceria com a multinacional Pirelli. Todos os direcionais e

tomadas de decisões foram feitos baseados nos resultados obtidos através do sistema de aquisição de dados AIM, e não somente pelo tempo de volta. O projeto do sistema de transmissão também foi feito baseado nos dados extraídos da potência e torque provenientes do motor. Todo o dimensionamento da árvore de transmissão, dos eixos do diferencial e da coroa, foi feito com as informações do sistema de aquisição de dados, que mostra os valores reais que o veículo deve ser dimensionado e não somente em dados teóricos provenientes de catálogos dos fabricantes. Com o sistema de aquisição de dados, é possível ficar muito mais próximo da realidade e trabalhar com dados mais confiáveis no projeto e dimensionamento dos sistemas

Este trabalho é baseado em equipamentos que envolvem tecnologia de ponta, sendo que atualmente estamos utilizando os últimos lançamentos do mercado específico para aquisição de dados em veículos de competição e alto desempenho. É natural sabermos que os sistemas de aquisição de dados evoluem constantemente; portanto, é sempre muito importante acompanhar a tendência desta tecnologia, e sempre que possível adquirir os últimos lançamentos para que a análise possa ficar ainda mais refinada.

Como proposta para trabalhos futuros, existem muitas melhorias a serem realizadas no atual sistema de aquisição de dados do Fórmula FEI. Como por exemplo, instalar sensores de temperatura dos pneus. Esses sensores medem a temperatura nas três faixas da banda de rodagem (interior, centro e exterior), com a utilização desses sensores será possível verificar se os ângulos de cambagem, caster, convergência / divergência estão corretos ou até mesmo se a pressão dos pneus está adequada. Para o dimensionamento do sistema de transmissão, existe a proposta de instalação de um sensor para medir o torque do eixo, que já está sendo desenvolvido pela equipe do Baja. Para medir a altura do assoalho do veículo em relação à pista, pode-se utilizar um sensor óptico, que já existe no mercado e que será adquirido pela equipe nos próximos meses. Com esse três parâmetros incorporados, será possível refinar o acerto da suspensão e garantir um melhor aproveitamento dos pneus, minimizando o desgaste, além de melhorar a eficiência da frenagem. Será possível refinar o dimensionamento estrutural do chassi, principalmente na parte traseira e também revisar todo o sistema de transmissão, modificando as árvores de transmissão e mancais do diferencial.

O sistema de telemetria deve ser desenvolvido para que a equipe possa ter todas as informações em tempo real. Esse recurso já tem sido aplicado por equipes de ponta nas competições internacionais dos Estados Unidos e Europa; entretanto, aqui no Brasil ainda não

foi aplicado. A prova de maior benefício será o enduro, que estatisticamente é a prova mais difícil de ser completada, justamente por causa das quebras. Com esse monitoramento, a equipe estará apta a avisar o piloto sobre qualquer problema e sendo possível, uma correção dentro do veículo pode ser feita para que o problema não se agrave e que ele possa concluir a prova com segurança.

## REFERÊNCIAS

ALFORD, D. **Lightweight, low cost, automotive data acquisition and telemetry system.** 2005. 112 f Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) – University of Cincinnati, Ohio, Estados Unidos.

BARRETO, M. A. Z. **Dinâmica longitudinal: efeitos da geometria de suspensão nas mudanças de atitude da massa suspensa e esforços nos elementos de suspensão.** 2004. 103 f Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) – Escola de engenharia São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

BYAM, B. et al. **Formula SAE design, test, tune and set up: a design of experiment approach.** 2003 SAE paper 2003-01-1320.

DEAKIN, A; CROLLA, D. **Fundamental parameter design issues which determine race car performance.** 2000 SAE paper 2001-01-3537.

DIXON, John C. **Tires, suspension and handling, 2<sup>nd</sup> edition.** Warrendale: Society of automotive engineers, 1996.

GILLESPIE, Thomas D. **Fundamentals of vehicle dynamics.** Warrendale: Society of automotive engineers, 1992.

HALCONRUY, Thierry. **Les liaisons au sol.** Boulogne - Billancourt: ETAI, 1995.

HANEY, Paul. **The racing & high-performance tire.** Warrendale: Society of automotive engineers, 2003.

HENNING, Wallentowitz. **Automotive engineering II vertical dynamics.** Aachen: Vervielfältigungsstelle der hochschule, 2004.

JAWARD, B. A. et al. **Aerodynamic drag and fuel economy in a formula SAE design vehicle.** 2001 SAE paper 2001-01-2554.

JAWARD, B. A. et al. **Traction control applications in engine control.** 2000 SAE paper 2000-01-3464.

JAWARD, B. A; NAGY, k. **Remote data acquisition using audio, video and data transmission.** 2001 SAE paper 2001-01-2467.

JAWARD, B. POLEGA B. D. **Design of formula SAE suspension components.** 2002 SAE paper 2002-01-3308.

KATZ, Joseph. **Racecar aerodynamic.** Cambridge, MA: Bentley publishers, 1995.

MAGGIO, F. et al. **How gearbox ratios influence lap time and driving style. An analysis based on time-optimal maneuvers.** 2003 SAE Japan paper 2003-32-0056.

MALUF, F. W. M. **Rudimentos da mecânica dos pneumáticos**. 2002. 231 f Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

MILLER, A. et al. **Testing a formula SAE racecar on a seven-poster vehicle dynamics simulator**. 2002 SAE paper 2002-01-3309.

MILLIKEN, William F.; MILLIKEN, Douglas L. **Race car vehicle dynamics**. Warrendale: Society of automotive engineers, 1995.

NYBACKA, M. **Validation of ADAMS/Car simulations and dynamic performance in multi-link suspensions**. 2005. 56 f Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) – Lulea University of Technology, Suécia.

PARK, John; MACKAY, Steve. **Data acquisition for instrumentation and control system**. Oxford: Elsevier, 2003.

PIOLA, Giorgio. **Formula 1 technical analysis**. Vimodrone: Giorgio Nada editore, 2007.

PUHN, Fred. **How to make your car handle**. Tucson, AZ: H P Books, 1976.

REIMPELL, J; STOLL, H; BETZLER, J. **The automotive chassis: Engineering principles**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001

REVISTA MANCHETE. Rio de Janeiro, Bloch editores S/A, 1995. Nº 2.248 ano 44

RILEY, Robert Q. **Automobile ride, handling, and suspension design**. Disponível em: <http://www.rqriley.com/suspensn.html> >Acesso em 02 out. 2008.

RILL, Georg **Vehicle dynamics**. Fachhochschule Regensburg: University of applied science, 2007.

SEGRS, Jörg **Analysis techniques for racecar data acquisition**. Warrendale: Society of automotive engineers, 2008.

SHIH, S; BOWERMAN, W. **An evaluation of torque bias and efficiency of Torsen differential**. 2003 SAE paper 2002-01-1046.

SOARES, A. L. V. **Análise de conforto e elastocinemática das suspensões de duplo estágio de um veículo de competição off-road em ambiente multicorpos**. 2005. 98 f Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) – Escola de engenharia São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

SMITH, Carroll **Drive to win**. Via Landeta: Society of automotive engineers, 1996.

SMITH, Carroll **Engineering to win**. Osceola: Society of automotive engineers, 1984.

SMITH, Carroll **Prepare to win**. [S.I.] Society of automotive engineers, 1975.

SMITH, Carroll **Tune to win**. Fallbrook: Society of automotive engineers, 1978.



STONE, Richard; BALL, Jeffrey K. **Automotive engineering fundamentals**. [S.I]: Society of automotive engineers, 2004.

TREMAYNE, David. **The science of Formula 1 design**. Somerset: Haynes publishing, 2006.

WINKIPEDIA. **Nyquist-Shannon sampling theorem**. Disponível em: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Nyquist%E2%80%93Shannon\\_sampling\\_theorem](http://en.wikipedia.org/wiki/Nyquist%E2%80%93Shannon_sampling_theorem)> acesso em 14 dez 2008.

WRIGHT, Peter. **Formula 1 technology**. Warrendale: Society of automotive engineers, 2001.

DIN 70000 e 70020. **Road vehicles; vehicle dynamics and road-holding ability; vocabulary**. Deutsches Institut Fur Normung E.V. German National Standard, 1994

2008 **Formula SAE rules**. Warrendale: Society of automotive engineers, 2007.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)