

FELIPE PEREIRA MARCHESIN

Dinâmica vertical de veículos de competição de alto desempenho  
aerodinâmico

São Paulo  
2018

FELIPE PEREIRA MARCHESIN

Dinâmica vertical de veículos de competição de alto desempenho  
aerodinâmico

Tese apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para obtenção  
do título de Doutor em Ciências.

São Paulo  
2018

FELIPE PEREIRA MARCHESIN

Dinâmica vertical de veículos de competição de alto desempenho  
aerodinâmico

Tese apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para obtenção do  
título de Doutor em Ciências.

Área de concentração:

Engenharia de Controle e Automação  
Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Roberto Spinola  
Barbosa

São Paulo  
2018

Dedico este trabalho para a minha esposa, Mariana Matayoshi Marchesin, que me apoiou em todos os momentos dessa aventura, que bagunçou as nossas vidas nos últimos anos.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de São Paulo por todo o apoio durante esses anos. Foi uma longa jornada desde o início da pós-graduação.

Ao Prof. Dr. Eng. Roberto Spinola Barbosa por toda a orientação recebida, durante o período do doutorado e do mestrado. Sua disponibilidade e paciência sempre me ajudaram a ter os pés no chão quando as ideias eram demasiadamente complexas.

Ao Sr. Jamie Dye da Fortec Motorsport no Reino Unido; sem a sua permissão para utilização dos dados, esta tese não existiria.

Parte desse trabalho não seria possível sem a contribuição do grupo de Engenharia Automotiva da Universidade de Brescia na Itália. Sou muito grato ao Prof. Dr. Eng. Marco Gadola pelo tempo que estive com o seu grupo, por sua co-orientação e pela disponibilidade do laboratório.

*“Quando mi dicono ‘tu hai vinto una corsa’, in quel momento la gente non sa che io mi sento bene perché ho pagato un debito verso tutti coloro che hanno creduto in me.”*

(Enzo Ferrari)

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho em dinâmica vertical de um veículo do tipo Formula de alta eficiência aerodinâmica. Diferentemente da abordagem utilizada atualmente pela indústria, este trabalho analisa o veículo com todas as suas características não lineares relacionadas à aerodinâmica e à rigidez de suspensão, e avalia a influência da velocidade longitudinal do veículo na sua resposta. Um modelo matemático foi desenvolvido e validado, utilizando dados experimentais relativos à influência das forças aerodinâmicas no sistema de suspensão e aos principais modos de vibrar da massa suspensa. Foi demonstrado que as forças aerodinâmicas influenciam na rigidez e no amortecimento do sistema. Para medir o seu desempenho, foram criados índices de desempenho calculados a partir da resposta em frequência do sistema, relacionados à força de contato dos pneus e ao momento de arfagem aerodinâmico. Esses índices de desempenho avaliam a variabilidade dessas respostas às entradas da pista de acordo com a faixa de velocidade longitudinal que um determinado circuito impõe ao veículo. De maneira a incluir as não linearidades nas funções de transferência, o sistema foi linearizado para cada valor de velocidade longitudinal analisada. Os resultados desses índices demonstram que a resposta do veículo pode apresentar tendências distintas quando ele é submetido a diferentes faixas de velocidade, e que as não linearidades influenciam significativamente o seu desempenho.

Palavras-chave: Dinâmica veicular. Dinâmica vertical. Aerodinâmica.

## **ABSTRACT**

The aim of this work is to evaluate the vertical dynamics performance of race cars subjected to high downforce aerodynamics. It shows a different approach than the one currently used by the motorsport industry, where the vehicle is analysed with all non-linearities related to aerodynamics and suspension stiffness. It also evaluates the influence of vehicle longitudinal speed. A mathematical model was developed and validated using experimental data related to the suspension compression due to aerodynamic forces and the sprung mass vibration modes. This work shows that the aerodynamic forces change the system stiffness and damping. To measure the vehicle performance a performance index related to the tyre contact load and the pitch aerodynamic moment were developed from the system frequency response. These indexes evaluate the vehicle response variance to track inputs and highlight the influence of the system non-linearities according to the speed range imposed by a specific circuit. To include the system non-linearities in the transfer functions, the system was linearized for each speed value. The results show that the same vehicle when subjected to different speed ranges (different circuits) can present different performance trends. They also show that the non-linearities change significantly the vehicle performance.

**Keywords:** Vehicle dynamics. Vertical dynamics. Aerodynamics.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Manobra de curva padrão.....	23
Figura 2 -	Altura dos eixos dianteiros e traseiros. ....	24
Figura 3 -	Curva polar de um veículo de competição (GT Sport, 2017). ....	31
Figura 4 -	Superfície com os mapas aerodinâmicos (GT Sport, 2017). ....	33
Figura 5 -	<i>4/7 post rig</i> – vista lateral 1.....	39
Figura 6 -	<i>4/7 post rig</i> – vista lateral 2.....	39
Figura 7 -	Função de entrada dos atuadores. ....	41
Figura 8 -	Evolução do índice de desempenho final proposto pela Multimatic..	44
Figura 9 -	Variação da altura do solo e dos coeficientes aerodinâmicos em função da velocidade longitudinal.....	46
Figura 10 -	Características do circuito 2.....	51
Figura 11 -	Características do circuito 5.....	51
Figura 12 -	Características do circuito 6.....	52
Figura 13 -	Transformada de Fourier dos movimentos de arfagem e balanço da carroceria nos circuitos 2, 5 e 6. ....	52
Figura 14 -	Etapas da metodologia .....	55
Figura 15 -	Modelo de meio carro. ....	60
Figura 16 -	Modelo didático do ângulo de ataque induzido.....	63
Figura 17 -	Modelo didático do efeito de massa adicional. ....	64
Figura 18 -	Sustentação negativa em função do ângulo de arfagem.....	66
Figura 19 -	Momento de arfagem em função do ângulo de arfagem. ....	67
Figura 20 -	Sustentação negativa em função da altura do eixo dianteiro. ....	67
Figura 21 -	Momento de arfagem em função da altura do eixo dianteiro.....	68
Figura 22 -	Força em função do deslocamento de um batente de suspensão....	69
Figura 23 -	Folga do batente de suspensão.....	70
Figura 24 -	Faixa de configuração das curvas dos amortecedores.....	71
Figura 25 -	Comparação entre o sinal bruto e o sinal após o janelamento. ....	78
Figura 26 -	Potenciômetro instalado na suspensão dianteira (AIM, 2008).....	79
Figura 27 -	Potenciômetro instalado na suspensão traseira (AIM, 2008). ....	79
Figura 28 -	Validação do deslocamento no circuito 6. ....	80

Figura 29 - Validação do deslocamento no circuito 5. ....	81
Figura 30 - Validação do deslocamento no circuito 2. ....	81
Figura 31 - Densidade espectral de pista de acordo com a norma ISO.....	83
Figura 32 - Modos de balanço do eixo dianteiro e do eixo traseiro.....	85
Figura 33 - Comparação da resposta em frequência dos modos de balanço e arfagem. ....	86
Figura 34 - Comparação da resposta em frequência do deslocamento da suspensão. ....	87
Figura 35 - Alturas dinâmicas (esquerda), deslocamento do sistema de suspensão (centro) e deflexão dos pneus (direita) em função da velocidade.....	91
Figura 36 - Coeficiente de sustentação negativa, balanço aerodinâmico e coeficiente do momento de arfagem em função da velocidade. ....	92
Figura 37 - Função de transferência dos modos de balanço e arfagem do corpo rígido veículo. ....	94
Figura 38 - Lugar das raízes em função da velocidade. ....	95
Figura 39 - Frequência natural do sistema.....	96
Figura 40 - Fator de amortecimento sistema. ....	96
Figura 41 - Função de transferência do balanço aerodinâmico. ....	97
Figura 42 - Função de transferência força de contato entre o pneu e solo. ....	98
Figura 43 - Sequência de cálculo do índice de desempenho.....	101
Figura 44 - Inertância da força de contato entre pneu e pista dos eixos dianteiro e traseiro.....	102
Figura 45 - Índice de desempenho da força de contato para os pneus dianteiros e traseiros em função da velocidade. ....	103
Figura 46 - Sensibilidade dos índices de desempenho da força de contato (Grupo 1). ....	104
Figura 47 - Sensibilidade dos coeficientes aerodinâmicos.....	105
Figura 48 - Sensibilidade da rigidez do sistema de suspensão dianteira à folga do batente dianteiro. ....	106
Figura 49 - Sensibilidade da rigidez da suspensão traseira à folga do batente traseiro.....	107

Figura 50 -	Varição da rigidez dos sistemas de suspensão dianteiro e traseiro nas configurações rígida e flexível.....	108
Figura 51 -	Sensibilidade dos índices de desempenho (Grupo 2). .....	108
Figura 52 -	Índice de desempenho final da força de contato (Grupo 1). .....	109
Figura 53 -	Índice de desempenho final da força de contato (Grupo 2). .....	110
Figura 54 -	Sequência de cálculo do índice de desempenho de momento de arfagem. ....	111
Figura 55 -	Sequência de cálculo do índice de desempenho de balanço aerodinâmico. ....	111
Figura 56 -	Ganho do balanço aerodinâmico e do momento de arfagem (curvas mais escuras representam velocidades mais altas). ....	112
Figura 57 -	Índice de desempenho do balanço aerodinâmico (tracejado) e do momento de arfagem (linha contínua). ....	112
Figura 58 -	Análise de sensibilidade do índice de desempenho (Grupo 1). .....	113
Figura 59 -	Análise de sensibilidade dos coeficientes aerodinâmicos. ....	114
Figura 60 -	Integral do índice de sensibilidade e desempenho aerodinâmico para diferentes configurações do veículo (Grupo 1). ....	115
Figura 61 -	Análise da sensibilidade do índice de desempenho (Grupo 2). .....	116
Figura 62 -	Integral do índice de sensibilidade e desempenho aerodinâmico para diferentes configurações do veículo (Grupo 2). ....	116
Figura 63 -	Sensibilidade do índice de desempenho final (Grupo 1). .....	118
Figura 64 -	Sensibilidade do índice de desempenho final (Grupo 2). .....	118
Figura 65 -	Sistema de coordenadas das forças aerodinâmicas proposto pelo autor. ....	129
Figura 66 -	Superfícies geradoras de sustentação negativa em um veículo do tipo Formula. ....	130
Figura 67 -	Influência do ângulo de ataque do <i>flap</i> dianteiro. ....	132
Figura 68 -	Influência do ângulo de ataque da asa traseira. ....	134
Figura 69 -	Coeficiente de arrasto em função das alturas dos eixos .....	136
Figura 70 -	Coeficiente de sustentação negativa em função das alturas dos eixos. ....	136
Figura 71 -	Balanço aerodinâmico em função da altura dos eixos.....	137

Figura 72 - Análise do erro entre o modelo de regressão e os resultados brutos do túnel de vento. ....	140
Figura 73 - Formula 4 no 4 <i>post rig</i> – vista frontal.....	143
Figura 74 - Formula 4 no 4 <i>post rig</i> – vista lateral.....	143
Figura 75 - Formula 4 no 4 <i>post rig</i> – vista traseira.....	144
Figura 76 - Sensores no 4 <i>post rig</i> - atuador.....	144
Figura 77 - Sensores no 4 <i>post rig</i> – veículo.....	145
Figura 78 - Sinal de entrada utilizado como deslocamento nos atuadores hidráulicos.....	146
Figura 79 - Respostas do veículo aos deslocamentos nos atuadores hidráulicos. ....	147
Figura 80 - Resposta em frequência das forças de contato dos pneus e alturas dianteiras e traseiras. ....	147
Figura 81 - Equipamento utilizado na medição de molas, batentes e amortecedores.....	148
Figura 82 - Montagem de uma configuração de batente composto por mola mais elastômero.....	149
Figura 83 - Tela do programa utilizado para controle do dinamômetro.....	149
Figura 84 - Curva de força e função do deslocamento dos batentes de suspensão. ....	150
Figura 85 - Amortecedor montado no dinamômetro linear hidráulico. ....	151
Figura 86 - Curva de força e função da velocidade de um amortecedor. ....	152
Figura 87 - Curva de força e função de deslocamento de um amortecedor com problemas entre a transição de velocidades.....	153
Figura 88 - Vistas lateral, superior e frontal do veículo de Formula 3 Dallara F312 (GT Sport, 2017).....	153
Figura 89 - Sistema de suspensão dianteira conforme manual do fabricante (GT Sport, 2017), e no lado esquerdo, o mesmo sistema modelado em ambiente multicorpos.....	155
Figura 90 - Deslocamento do amortecedor dianteiro, função do deslocamento da roda. ....	156
Figura 91 - Sistema de suspensão traseiro conforme manual do fabricante (GT Sport, 2017), e à direita, modelo em ambiente multicorpos.....	156

Figura 92 - Deslocamento do amortecedor traseiro em função do deslocamento da roda. .... 158

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Canais da Figura 2. ....	23
Tabela 2 -	Configurações aerodinâmicas de um Formula 3 (GT Sport, 2017). ....	30
Tabela 3 -	Mapas aerodinâmicos.....	32
Tabela 4 -	Parâmetros utilizados para mapear os parâmetros aerodinâmicos. .....	34
Tabela 5 -	Faixa de velocidade em diferentes circuitos. ....	50
Tabela 6 -	Frequências naturais do sistema.....	84
Tabela 7 -	Configurações do veículo avaliadas. ....	100
Tabela 8 -	Erro entre os valores do modelo e os valores brutos do ensaio em túnel de vento. ....	141
Tabela 9 -	Canais utilizados no ensaio experimental no <i>4 post rig</i> .....	145
Tabela 10 -	Dados genéricos do veículo (GT Sport, 2017).....	154
Tabela 11 -	Pontos do sistema de suspensão dianteira. Adaptado do fabricante (GT Sport, 2017).....	155
Tabela 12 -	Pontos do sistema de suspensão traseira. Adaptado do fabricante (GT Sport, 2017).....	157
Tabela 13 -	Canais analógicos .....	159

## LISTA DE SIGLAS

<i>ARC</i>	Auto Research Centre
<i>CAN</i>	Controller Area Network
<i>CFD</i>	Computational Fluid Dynamics – Dinâmica dos fluidos computacional
<i>CPL</i>	Contact Patch Load – Carregamento vertical entre pneu e solo
<i>ID</i>	Índice de desempenho
<i>IDF</i>	Índice de desempenho final
<i>ISO</i>	International Organization for Standardization
<i>MR</i>	Motion Ratio – Razão de instalação da suspensão
<i>PSD</i>	Power spectral density – Densidade de potência espectral
<i>PMI</i>	Índice de momento de arfagem
<i>r. m. s.</i>	root mean square – raiz do valor quadrático médio
<i>UnBs</i>	Universidade de Brescia

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Distância do centro de massa suspensa até o eixo dianteiro
$AB$	Balanço aerodinâmico
$b$	Distância do centro de massa suspensa até o eixo traseiro
$C_m$	Coefficiente do momento de arfagem
$C_w$	Coefficiente de amortecimento
$C_z$	Coefficiente de sustentação negativa
$C_x$	Coefficiente de arrasto aerodinâmico
$C_y$	Coefficiente de força lateral aerodinâmica
$C_\theta$	Coefficiente de momento de rolagem
$C_\psi$	Coefficiente de momento de guinada
$F_a$	Força aerodinâmica
$F_{a\ mass}$	Força aerodinâmica devido ao efeito de massa adicional
$F_{spring}$	Força na mola do sistema de suspensão
$F_t$	Força da vertical resultante no pneu
$F_{wheel}$	Força da mola na roda
$F_x$	Força de arrasto aerodinâmico
$F_y$	Força lateral aerodinâmica
$F_z$	Força de sustentação negativa
$f$	Frequência temporal
$gap$	Distância na posição estática que o amortecedor deve ser comprimido para que o batente inicie a exercer força
$G(f)$	Espectro de frequência
$G_n$	Fator de ganho
$H$	Função de resposta em frequência genérica
$h$	Altura genérica
$I$	Inertância
$K_w$	Rigidez da mola na roda
$L$	Comprimento do entre-eixos
$M_a$	Momento de arfagem aerodinâmico
$M_\theta$	Momento de rolagem aerodinâmico

$M_{\psi}$	Momento de guinada aerodinâmico
$m_{ns}$	Massa não suspensa
$m_s$	Massa suspensa
$n$	Índice da classificação do perfil de pista
$rh$	Altura do eixo
$R$	Raio de curva
$r$	Raio do pneu
$S$	Área frontal de referência do veículo
$t$	Tempo
$V$	Velocidade longitudinal
$x_{spring}$	Deslocamento da mola
$x_{wheel}$	Deslocamento relativo entre a roda e a massa suspensa
$x_s$	Deslocamento longitudinal da massa suspensa
$x_{us}$	Deslocamento vertical da roda
$y_s$	Deslocamento lateral da massa suspensa
$y_{us}$	Deslocamento lateral da roda
$\gamma_{us}$	Ângulo de cambagem da roda
$z_{ns}$	Deslocamento vertical da massa não suspensa
$z_r$	Deslocamento da pista usado como entrada no sistema
$z_s$	Deslocamento vertical da massa suspensa
$\alpha_{ff}$	Ângulo de ataque do <i>flap</i> dianteiro
$\alpha_{lrw}$	Ângulo de ataque da asa traseira inferior
$\alpha_{urw}$	Ângulo de ataque da asa traseira superior
$\omega$	Frequência circular
$\theta_s$	Ângulo de rolagem da massa suspensa
$\psi_s$	Ângulo de guinada da massa suspensa
$\delta_{us}$	Ângulo de esterçamento da roda
$\varphi_s$	Ângulo de arfagem da massa suspensa
$\rho$	Densidade do ar

$\tau$	Tempo de atraso entre a entrada no eixo dianteiro e a entrada no eixo traseiro
$\vartheta$	Volume de ar deslocado

### **Subscritos**

<i>cpf</i>	Referente ao contato pneu solo dianteiro
<i>cpr</i>	Referente ao contato pneu solo traseiro
<i>f</i>	Referente ao eixo dianteiro
<i>r</i>	Referente ao eixo traseiro
<i>prob</i>	Probabilístico

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>20</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO</b> .....	<b>26</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>27</b>
3.1	AERODINÂMICA .....	27
3.2	DINÂMICA VERTICAL.....	35
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>49</b>
<b>5</b>	<b>MODELO ANALÍTICO</b> .....	<b>58</b>
5.1	FORÇAS AERODINÂMICAS .....	61
5.2	FORÇAS DO SISTEMA DE SUSPENSÃO.....	68
5.3	EQUAÇÕES NO ESPAÇO DE ESTADO.....	72
<b>6</b>	<b>VALIDAÇÃO DO MODELO</b> .....	<b>75</b>
6.1	VALIDAÇÃO DOS EFEITOS AERODINÂMICOS .....	76
6.2	VALIDAÇÃO MODAL.....	82
<b>7</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>88</b>
7.1	REGIME QUASE-ESTÁTICO .....	88
7.2	REGIME TRANSIENTE .....	93
<b>8</b>	<b>ÍNDICES DE DESEMPENHO</b> .....	<b>99</b>
8.1	VARIAÇÃO DE FORÇA DE CONTATO COM O SOLO .....	100
8.2	SENSIBILIDADE E DESEMPENHO AERODINÂMICO .....	110
8.3	ÍNDICE DE DESEMPENHO FINAL .....	117
<b>9</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>120</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>124</b>
	<b>APÊNDICE A - AERODINÂMICA DE VEÍCULOS DE COMPETIÇÃO</b> .....	<b>128</b>
1	SISTEMA DE COORDENADAS .....	128
2	CONFIGURAÇÃO AERODINÂMICA .....	130
3	COMPILAÇÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS .....	131
3.1	ÂNGULO DE ATAQUE DO FLAP DIANTEIRO .....	131
3.2	ÂNGULO DE ATAQUE DA ASA TRASEIRA .....	133
3.3	ALTURAS DOS EIXOS DIANTEIRO E TRASEIRO.....	135
4	MODELO EM REGIME PERMANENTE .....	137

5	COMPARAÇÃO ENTRE MODELO E OS DADOS DE TÚNEL DE VENTO .....	139
	<b>APÊNDICE B – EXPERIMENTO COM VEÍCULO COMPLETO .....</b>	<b>142</b>
	<b>APÊNDICE C – CARACTERIZAÇÃO DE COMPONENTES .....</b>	<b>148</b>
	<b>APÊNDICE D – DADOS DO VEÍCULO DE FORMULA 3.....</b>	<b>153</b>
1	LAYOUT .....	153
2	GEOMETRIA DE SUSPENSÃO .....	154
3	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	158

## 1. INTRODUÇÃO

*“Se lo puoi sognare, lo puoi fare.”*

(Enzo Ferrari)

Atualmente, o desempenho aerodinâmico dos veículos de competição é dominante sobre o desempenho dos demais componentes mecânicos. Na Formula 1, o projeto de diversos componentes mecânicos é comprometido de maneira a melhorar a eficiência aerodinâmica do veículo completo (FORGHIERI, 2017). A sustentação negativa<sup>1</sup> melhora o desempenho em frenagem, em curvas e em aceleração (KATZ, 1995). Do ponto de vista da dinâmica longitudinal e lateral, o aumento de desempenho é possível de ser quantificado com modelos quase-estáticos. A influência da aerodinâmica na resposta da dinâmica vertical é secundária em comparação à dinâmica lateral e longitudinal, porém, em um esporte que é decidido em décimos de segundos, a interação entre aerodinâmica e dinâmica vertical também se torna importante.

Tradicionalmente, a dinâmica vertical é aplicada ao problema de conforto, com o objetivo de minimizar a aceleração da massa suspensa, e ao problema de dirigibilidade (que também pode ser entendido como segurança) com o objetivo de diminuir a variação de carga vertical no pneu. Quando analisamos um veículo de competição<sup>2</sup>, o objetivo é sempre maximizar a aderência<sup>3</sup> (MILLIKEN; MILLIKEN, 1995) e a minimização da variação de carga vertical no pneu contribui diretamente para isso. Porém, somente essa minimização não é suficiente. Outros fatores, como a estabilidade aerodinâmica do veículo e a temperatura de trabalho do pneu, também estão associados à dinâmica vertical.

A teoria atual utilizada na dinâmica veicular foi desenvolvida para carros de passeio. Porém, os veículos de competição dos dias atuais, diferentemente dos carros de passeio, possuem o seu comportamento dinâmico fortemente associado ao seu desempenho aerodinâmico. Nos últimos 40 anos, os veículos do tipo Formula tiveram

---

<sup>1</sup> Tradução feita pelo autor da palavra *downforce* devido à falta do termo oficial em português; significa força aerodinâmica que comprime o veículo no solo. No caso de um aerofólio, possui mesma direção e sentido oposto à força de sustentação.

<sup>2</sup> No presente trabalho, sempre que se faz referência a veículos de competição, eles são do tipo Formula, que são definidos como monopostos de rodas descarenadas que utilizam superfícies aerodinâmicas para geração de sustentação negativa. Quando a referência for a carros de passeio, ela será explicitada.

<sup>3</sup> Aderência é a tradução do autor do termo *grip*, que significa a capacidade de aderência do veículo à pista, diretamente relacionado aos pneus e ao carregamento aerodinâmico.

as suas asas e carrocerias modeladas nos túneis de vento, aumentando significativamente a sua eficiência aerodinâmica<sup>4</sup>. Atualmente todos os demais subsistemas do veículo são projetados com o objetivo de aumentar a eficiência aerodinâmica.

A caracterização das forças e momentos aerodinâmicos de um veículo de competição tem como objetivo quantificar a sustentação negativa, o arrasto e a posição longitudinal do centro de pressão aerodinâmico. Esses parâmetros são calculados utilizando as forças medidas por balanças instaladas entre a carroceria e o túnel de vento. As forças são medidas para diversas combinações de altura dos eixos<sup>5</sup> dianteiro e traseiro e também para as diversas combinações de asas e seus respectivos ângulos de ataque. De maneira geral, essa caracterização é feita em situação de regime permanente. A proximidade do assoalho do veículo ao solo e o seu perfil implicam a geração de sustentação negativa, e essa é afetada pela proximidade com o solo. A eficiência aerodinâmica aumenta com a proximidade da carroceria do veículo ao solo até atingir a altura de estol do difusor. Nesse instante, ocorre perda de sustentação negativa e diminuição do arrasto aerodinâmico. Essa particularidade no comportamento do veículo de Formula é muito importante no seu comportamento e deve ser incluída no estudo de seu desempenho.

A dinâmica veicular é tradicionalmente dividida em: dinâmica longitudinal, vertical e lateral (MITSCHKE; WALLENTOWITZ, 2004). Como primeira abordagem, o comportamento dinâmico do veículo é estudado desacoplando as manobras, ou seja, quando o veículo acelera ou freia ele se encontra em uma superfície plana e sem esterçamento do volante. A abordagem padrão utilizada pela engenharia é a de analisar o comportamento de forma desacoplada antes de analisar uma manobra mais complexa (frenagem durante curva, por exemplo), partindo de um modelo em regime quase-estático e evoluindo para um modelo transiente. Geralmente, o problema real sempre é uma manobra complexa em regime transiente.

A mesma abordagem (desacoplamento) é usada para caracterizar os modelos dos componentes do veículo. A caracterização das forças de um pneu também é

---

<sup>4</sup> Eficiência aerodinâmica é a razão entre o coeficiente de sustentação negativa e arrasto aerodinâmico.

$$e = \frac{C_z}{C_x}$$

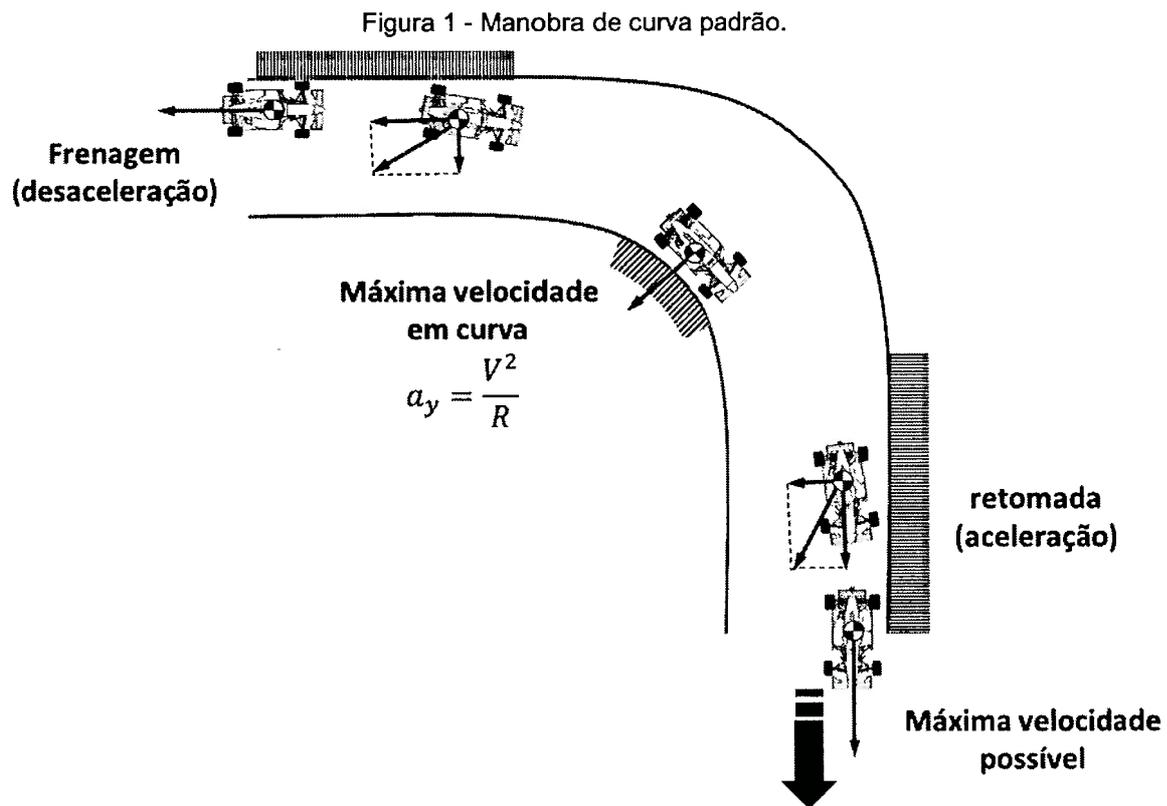
<sup>5</sup> As suspensões dos veículos estudados nesta tese são do tipo independente, porém é comum se referir à altura do eixo dianteiro e traseiro (tradução de *front ride height* e *rear ride height*) como a altura do assoalho do veículo (ou da projeção do plano do assoalho) no plano transversal das rodas dianteiras e traseiras.

realizada de forma desacoplada (força lateral e longitudinal caracterizadas de forma singular) e quando caracterizadas de forma acoplada, o problema não possui todos os graus de liberdade acoplados como no problema real (força lateral e longitudinal são caracterizadas de forma combinada, porém a força vertical é sempre constante). Uma analogia pode ser feita também para a aerodinâmica de veículos de competição. Os resultados dos ensaios em túnel de vento medem as forças e momentos em situação de regime permanente, com o veículo fixo em uma determinada atitude<sup>6</sup>, enquanto no problema real o veículo está sempre em movimento.

Uma manobra padrão de um veículo de corrida é composta por três fases: entrada de curva, meio de curva e saída de curva – conforme apresentado na Figura 1. A manobra é extremamente transiente e combina a situação de curva com frenagem (entrada) e com aceleração (saída). Durante a entrada de curva, o piloto freia, diminuindo a altura do eixo dianteiro e aumentando a altura do eixo traseiro; ele diminui o acionamento do freio de forma progressiva e inicia a esterçar o volante até chegar no meio da curva (ápice). Desse ponto em diante, inicia a saída de curva; ele aciona o pedal do acelerador e desesterça o volante de forma gradual, fazendo com o que a altura do eixo dianteiro aumente e a do eixo traseiro diminua.

---

<sup>6</sup> Por atitude, entende-se uma combinação de altura do eixo dianteiro e do eixo traseiro, ou seja, a carroceria possui uma altura e um ângulo de arfagem fixos.

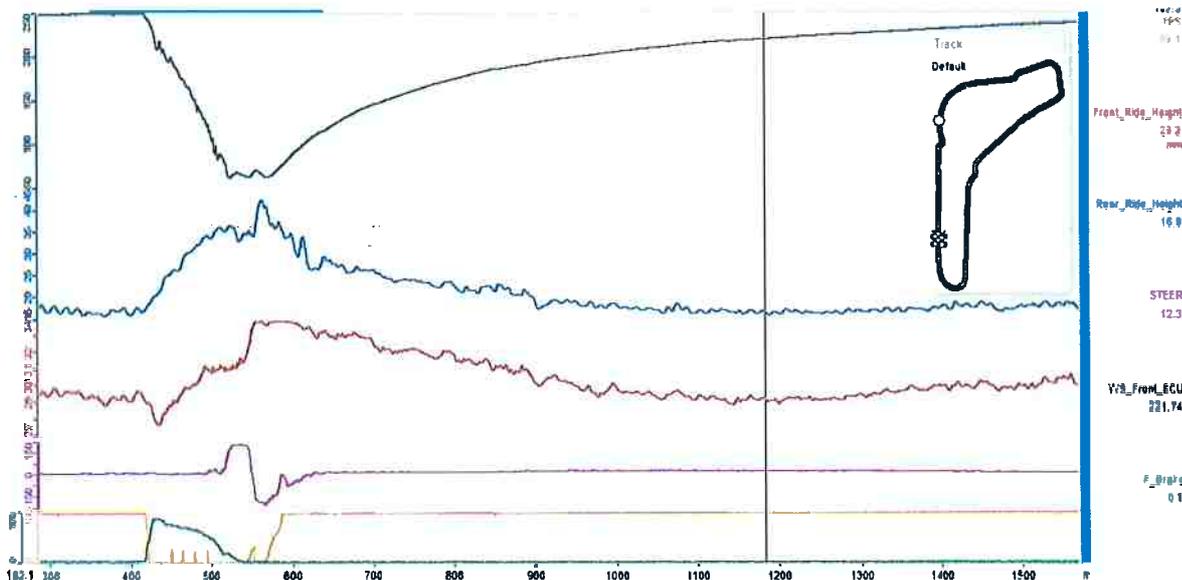


Todo esse movimento descrito da carroceria influencia o desempenho aerodinâmico do veículo. Durante uma curva, as alturas mudam de forma significativa, alterando a eficiência aerodinâmica. A Figura 2 apresenta a variação de altura dos eixos do veículo durante a execução da primeira variante (chicane) no circuito de Monza. A Tabela 1 explica os nomes dos canais utilizados na Figura 2.

Tabela 1 - Canais da Figura 2.

Nome	Significado
TPS	Posição da borboleta do motor (ie. Pedal do acelerador)
Front_Ride_Height	Altura do eixo dianteiro
Rear_Ride_Height	Altura do eixo traseiro
STEER	Ângulo de esterçamento do volante
WS_Front_ECU	Velocidade do veículo
F_Brake	Pressão na linha de freio dianteiro

Figura 2 - Altura dos eixos dianteiros e traseiros.



Na engenharia aeroespacial, a caracterização aerodinâmica feita pela dinâmica de voo utiliza as derivadas de estabilidade. Elas representam a taxa de variação das forças e momentos aerodinâmicos em função da atitude do avião. Durante os anos 50, foi apresentada uma série de artigos em conjunto (MILLIKEN et al., 1956) analisando pela primeira vez a dinâmica lateral de um carro de passeio em regime transiente, utilizando as mesmas ferramentas do estudo de estabilidade de aviões. Esse trabalho é ainda hoje utilizado como base na análise de dirigibilidade de carros de passeio, como se pode constatar pelas manobras de dirigibilidade padronizadas pela ISO (ISO, 2003).

Para incluir os efeitos aerodinâmicos na dinâmica de um veículo de competição, a abordagem utilizada nos estudos de dinâmica de voo deve ser aplicada à dinâmica vertical. Quantificando dessa forma, as variações dos coeficientes aerodinâmicos (força e momentos) ocorrem em função dos movimentos do veículo, tanto em regime-quase estático quanto em regime transiente.

Esta tese tem como foco a dinâmica vertical de veículos do tipo Formula. Ela propõe uma nova abordagem que acopla o sistema de suspensão e as forças aerodinâmicas e permite analisar o desempenho dos veículos para as suas diversas configurações<sup>7</sup>, de acordo com as características do circuito onde o veículo irá competir.

<sup>7</sup> No presente trabalho, o termo “configuração do veículo” é utilizado como tradução do termo *setup*. Para um veículo de competição o *setup* é a configuração e os ajustes dos componentes permitidos no

Todas as figuras presentes nesta tese são de autoria própria, exceto aquelas identificadas. Os dados experimentais utilizados estão sujeitos a um acordo de confidencialidade. Dessa forma, diversas figuras e gráficos não possuem valores absolutos e, em alguns casos, os valores não puderam ser apresentados.

---

regulamento. Por exemplo, a configuração do veículo implica: valores de rigidez das molas dianteiras e traseiras, batentes de suspensão utilizados, pressões de inflação a frio dos pneus, tipo de asas utilizadas, ângulos de ataque dessas asas, alturas dos eixos dianteiros e traseiros, configuração dos amortecedores, alinhamento das rodas (ângulos de cambagem e convergência) e etc.

## 2 OBJETIVO

*"To achieve anything in this game you must be prepare to  
dabble in the boundary of disaster."  
(Stirling Moss)*

Esta tese tem como objetivo a proposição de um novo índice de desempenho de dinâmica vertical para veículos de competição do tipo Formula que acopla a dinâmica do sistema de suspensão com as forças aerodinâmicas.

Para atingir esse objetivo, foi necessário desenvolver as tarefas apresentadas a seguir:

- Caracterização dos componentes e das forças aerodinâmicas (todos baseados em testes experimentais);
- Construção de um modelo analítico de veículo que represente o seu comportamento em dinâmica vertical;
- Validação do modelo analítico;
- Desenvolvimento de um índice de desempenho que represente a influência da dinâmica vertical na aderência mecânica do veículo em um circuito específico;
- Desenvolvimento de um índice de desempenho que represente a sensibilidade e o desempenho aerodinâmico na dinâmica vertical do veículo em um circuito específico;
- Desenvolvimento de um índice de desempenho combinado para ser utilizado em um circuito específico.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

*“Freni? A cosa servono i freni?”*

(Tazio Nuvolari)

A revisão bibliográfica desta tese foi dividida em duas partes: aerodinâmica e dinâmica vertical. Em ambas, foi feito um histórico do desenvolvimento e foram analisadas as abordagens atualmente utilizadas pela indústria. Essa revisão foi feita de forma a explicitar as lacunas das atuais técnicas utilizadas pela indústria.

A indústria do esporte motorizado é muito competitiva e as suas inovações mais importantes são geralmente mantidas sob sigilo. Em função disso, uma revisão bibliográfica por si só é uma tarefa desafiadora. O autor pode coletar importantes dados devido ao seu acesso à indústria, porém nem todos podem ser divulgados em público.

#### 3.1 AERODINÂMICA

Até meados dos anos 60, a aerodinâmica de veículos de competição se baseava na diminuição da área frontal e no formato cilíndrico da carroceria para diminuição do arrasto aerodinâmico e, conseqüentemente, o aumento de aceleração e velocidade máxima. Em meados dos anos 60, é iniciada a utilização de aerofólios nos veículos de competição com a Chaparral 2F 1967 na categoria de protótipos e a Ferrari 312 1968 na categoria de monopostos. Na década seguinte, a ideia era gerar o máximo de pressão positiva possível na parte superior da carroceria para aumentar a sustentação negativa (utilizando-se de asas e carrocerias no formato de cunha). No final dos anos 70, verifica-se ganhos com a geração de pressão negativa na parte inferior da carroceria com a utilização do efeito solo (FORGHIERI, 2017).

Com o advento do efeito solo, a configuração geral do veículo começa a ser definida pela sua aerodinâmica (WRIGHT, 2001). No efeito solo, a interferência do solo nos vórtices gerados pelo assoalho e pela asa dianteira aumenta a geração de pressão negativa, aumentando a sustentação negativa (KATZ, 1995).

Os primeiros trabalhos científicos sobre aerodinâmica de veículos de competição foram publicados nos anos 80. Basicamente, eles apresentavam dados

experimentais das configurações utilizadas e sua influência no desempenho. Nessa época, os túneis de vento ainda não eram equipados com esteiras rolantes capazes de replicar o fluxo de ar embaixo do carro (WRIGHT, 1982; DOMINY; DOMINY, 1984; METZ, 1987).

Durante os anos 80, devido à evidente influência da altura do veículo no desempenho aerodinâmico, é iniciado o procedimento de mapeamento das forças e momentos aerodinâmicos em função da atitude do veículo (MARSHAL, 2017). Posteriormente, essas medições são convertidas nos coeficientes de arrasto e sustentação negativa e disponibilizadas na forma de tabela em função das alturas dos eixos dianteiros e traseiros<sup>8</sup>.

Atualmente, a aerodinâmica de veículos de competição é analisada com três ferramentas:

- Simulação de modelos matemáticos utilizando, em sua grande maioria, a técnica dos volumes finitos (CFD);
- Medição de forças e momentos, em sua grande maioria, com modelos em escala, em túnel de vento com pista rolante;
- Teste em pista, geralmente em linha reta.

As três ferramentas são complementares (LUCA, 2014). Ainda hoje não é possível projetar um veículo de corrida competitivo utilizando somente uma dessas ferramentas. Para validar o resultado de um novo conceito ou componente, é necessário que pelo menos duas das ferramentas obtenham resultados compatíveis.

As medições das forças aerodinâmicas utilizadas atualmente são baseadas em condições de regime permanente (DALLARA, 2005; 2008, 2017; MYGALE, 2008a). O modelo em escala possui uma configuração fixa para cada rodada de medições, que também é realizada com velocidade constante. Os sistemas de suspensão e os pneus são rígidos, de forma que o fluxo do ar não mude nenhuma característica do veículo. Os túneis de vento utilizados possuem uma esteira rolante (*rolling road*) de forma a reproduzir corretamente a pressão negativa do assoalho e também a aerodinâmica do conjunto roda/pneu em rotação. Em alguns modelos, os radiadores, a admissão do motor e a pressão do sistema de escapamento também são simulados (DALLARA, 2008).

---

<sup>8</sup> Essas tabelas são chamadas pela indústria de Aeromaps.

Alguns túneis de vento apresentam um mecanismo capaz de reproduzir as oscilações da carroceria do veículo e quantificar as forças aerodinâmicas em regime transiente. Essa nova abordagem ainda se encontra em fase de pesquisa (ASCHWANDEN et al., 2006; ASCHWANDEN et al., 2008). Existem algumas publicações sobre aerodinâmica de veículos em regime transiente analisando componentes isoladamente (BLANES et al., 2017), mas ainda não existe um modelo desenvolvido para aplicar esses resultados de forma satisfatória nas simulações de dinâmica veicular.

Os parâmetros comumente medidos em túnel de vento para veículos de competição são:

1. Força de arrasto na massa suspensa;
2. Força de sustentação negativa na massa suspensa;
3. Força lateral na massa suspensa;
4. Momento de arfagem<sup>9</sup> na massa suspensa;
5. Momento de rolagem na massa suspensa;
6. Força de arrasto nas rodas;
7. Força de sustentação nas rodas.

Utilizando os dados acima, são calculados os três parâmetros aerodinâmicos principais de um veículo de competição: o coeficiente de arrasto, o coeficiente de sustentação negativa e o balanço aerodinâmico (percentagem da sustentação negativa total no eixo dianteiro)<sup>10</sup>. Esses parâmetros são calculados com o veículo em diversas configurações do ângulo de ataque das asas dianteiras e traseiras, e diferentes configurações de altura dos eixos dianteiro e traseiro. Para simplificar os cálculos dos coeficientes aerodinâmicos, eles são disponibilizados já multiplicados pela área frontal do veículo.

Similar à caracterização de uma asa, o veículo completo é analisado em uma atitude fixa com diferentes ângulos de ataque das asas (mantendo-se o balanço aerodinâmico com a menor variação possível entre as configurações analisadas) conforme apresentado na Tabela 2. Com esses dados, é possível gerar uma curva

---

<sup>9</sup> Arfagem é a tradução de *pitch*, que é o movimento da massa suspensa no qual a carroceria do veículo rotaciona no eixo transversal (vista lateral). A tradução é a mesma utilizada pela dinâmica de voo em português. Na linguagem do automobilismo, esse termo é chamado de *rake*.

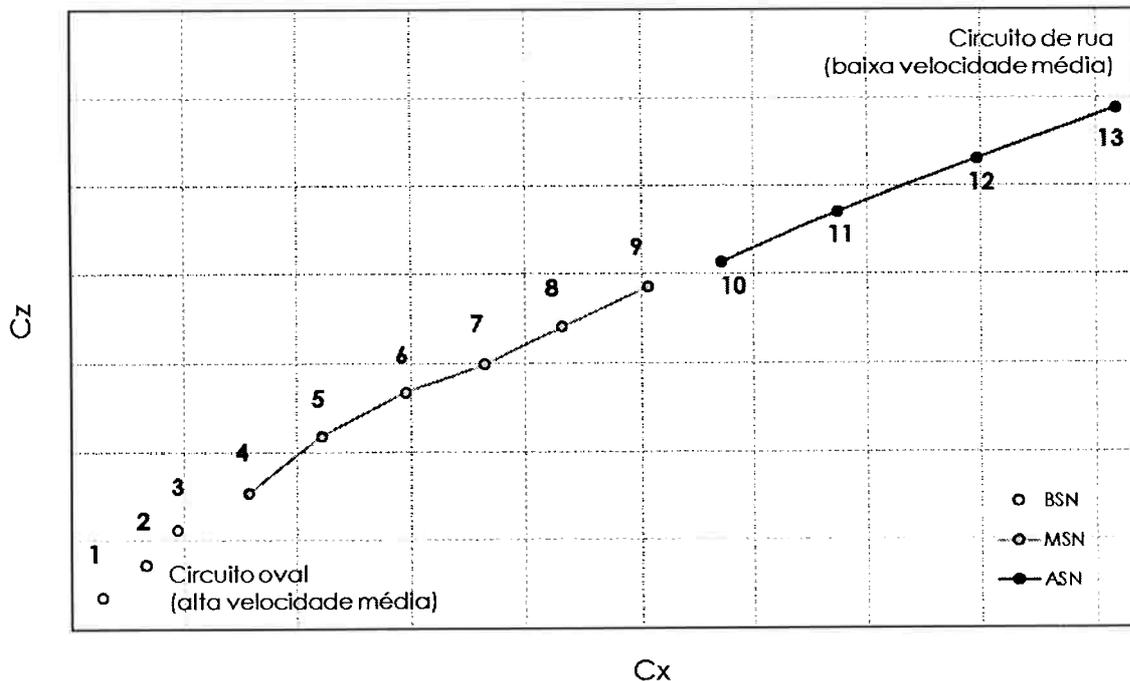
<sup>10</sup> Tradução do autor para o termo Aerobalance. Algumas abordagens calculam, ao invés do balanço aerodinâmico, dois coeficientes de sustentação negativa, um para o eixo dianteiro e outro para o eixo traseiro.

polar do veículo completo (DALLARA, 2017), similar ao que se faz para análise de eficiência de aerofólios (ETKIN, 2005). A Figura 3 apresenta a curva polar de um veículo de competição. A curva polar apresenta a relação entre o arrasto aerodinâmico  $C_x$  e a sustentação negativa  $C_z$ . Essa curva é utilizada como referência na escolha da configuração das asas em função do traçado do circuito. Configurações de baixa sustentação negativa são utilizadas, geralmente, em circuitos de alta velocidade e configurações de alta sustentação negativa são utilizadas, geralmente, em circuitos de baixa velocidade.

Tabela 2 - Configurações aerodinâmicas de um Formula 3 (GT Sport, 2017).

Configuração do veículo	Nível de sustentação negativa	Flap dianteiro		Asa traseira superior		Asa traseira inferior Ângulo [°]
		Tipo	Ângulo [°]	Tipo	Ângulo [°]	
1	Baixa sustentação negativa (BSN)	Sem flap			0	1
2		BSN	-1	Asa simples	5	
3			2	(BSN)	10	
4	Média sustentação negativa (MSN)	BSN	4		5	7
5			7	Asa biplano	9	
6			9		(MSN)	
7		ASN	9		17	
8			11		21	
9	13		25			
10	Alta sustentação negativa (ASN)	ASN	14		11	13
11			16	Asa biplano	15	
12			19	(ASN)	20	
13			22		25	

Figura 3 - Curva polar de um veículo de competição (GT Sport, 2017).

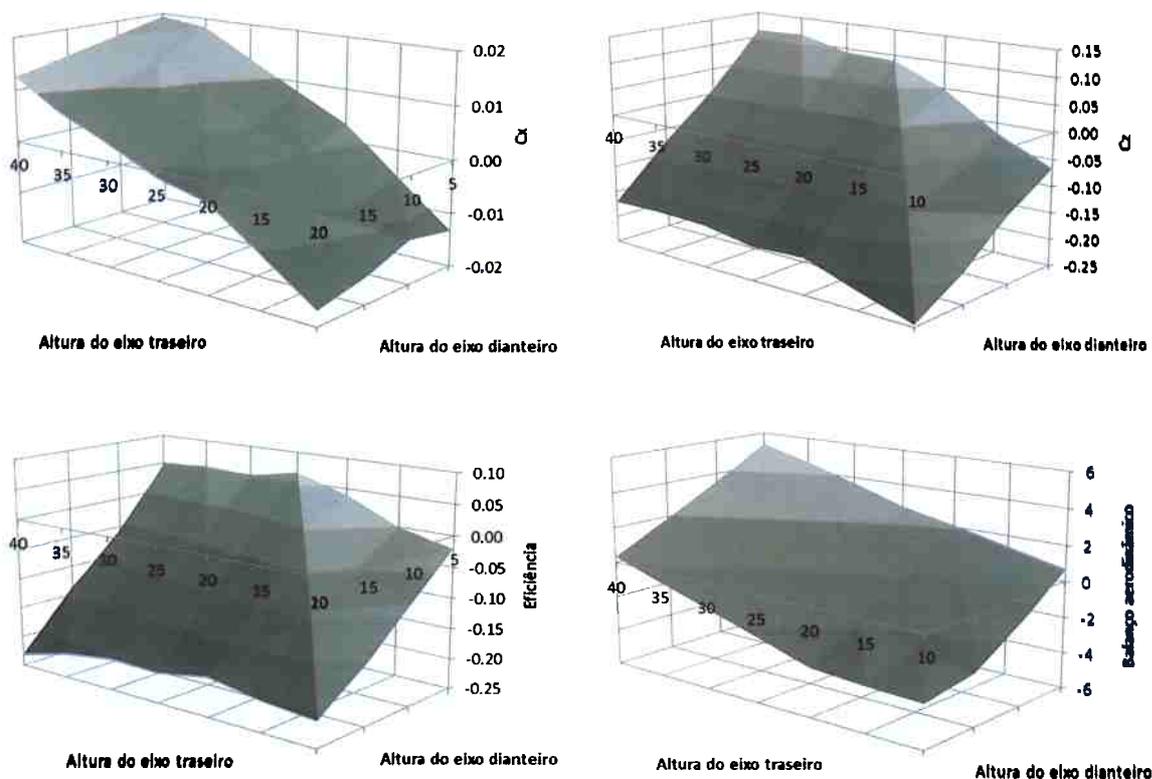


A Tabela 3 e a Figura 4 apresentam os mapas aerodinâmicos de um veículo do tipo Formula na forma de tabela e na forma de superfície. Cada um desses mapas apresenta um parâmetro aerodinâmico do veículo completo (coeficiente de arrasto e sustentação negativa, e balanço e eficiência aerodinâmica) em função das alturas dos eixos dianteiros traseiros. Os dados são apresentados em valores relativos às alturas de referência (10 mm no eixo dianteiro e 20 mm no eixo traseiro) devido ao sigilo necessário. As superfícies permitem que os pontos de máximo e de mínimo sejam facilmente identificados e, posteriormente, utilizados para a escolha da configuração do veículo de acordo com o circuito. De forma menos comum, esses dados também são disponibilizados em gráficos de curva de nível (TATUUS, 2010).

Tabela 3 - Mapas aerodinâmicos (GT Sport, 2017).

Cx		Altura do eixo traseiro [mm]						
		10	15	20	25	30	35	40
Altura do eixo dianteiro [mm]	5	-0.013	-0.005	0.003	0.008	0.013	0.018	0.019
	10	-0.012	-0.008	0.000	0.003	0.009	0.014	0.017
	15	-0.015	-0.006	0.000	0.004	0.008	0.010	0.015
	20	-0.017	-0.010	-0.003	-0.001	0.003	0.007	0.013
Eficiência aerodinâmica		Altura do eixo traseiro [mm]						
		10	15	20	25	30	35	40
Altura do eixo dianteiro [mm]	5	-0.020	-0.001	0.040	0.066	0.050	0.055	0.048
	10	-0.087	-0.050	0.000	-0.021	-0.037	-0.050	-0.057
	15	-0.154	-0.092	-0.096	-0.110	-0.117	-0.130	-0.138
	20	-0.209	-0.201	-0.187	-0.202	-0.200	-0.212	-0.233
Cz		Altura do eixo traseiro [mm]						
		10	15	20	25	30	35	40
Altura do eixo dianteiro [mm]	5	-0.066	-0.019	0.048	0.089	0.093	0.116	0.114
	10	-0.120	-0.074	0.000	-0.008	-0.001	0.004	0.009
	15	-0.192	-0.105	-0.086	-0.085	-0.079	-0.082	-0.075
	20	-0.245	-0.215	-0.182	-0.187	-0.171	-0.168	-0.170
Balanço aerodinâmico		Altura do eixo traseiro [mm]						
		10	15	20	25	30	35	40
Altura do eixo dianteiro [mm]	5	0.700	1.408	2.097	2.716	3.671	4.550	5.329
	10	-1.357	-0.490	0.000	0.877	1.831	2.675	3.521
	15	-3.075	-2.564	-1.716	-0.778	0.179	0.994	1.886
	20	-3.575	-3.475	-3.275	-2.332	-1.443	-0.572	0.333

Figura 4 - Superfície com os mapas aerodinâmicos (GT Sport, 2017).



Quanto maior o orçamento da categoria, maior é o número de parâmetros que podem ser analisados no ensaio de túnel de vento. A influência do ângulo de esterçamento das rodas, do ângulo de escorregamento do veículo<sup>11</sup> e do ângulo de rolagem da massa suspensa também pode ser analisada (MAVROUDAKIS, 2010). A tabela a seguir exemplifica os parâmetros básicos medidos na caracterização aerodinâmica e os parâmetros adicionais medidos quando a categoria (ou equipe) possui orçamento disponível.

<sup>11</sup> Ângulo de escorregamento do veículo foi a tradução feita pelo autor do termo *sideslip angle*. O ângulo de escorregamento do veículo é o ângulo entre as velocidades longitudinal e lateral do veículo no plano horizontal.

Tabela 4 - Parâmetros utilizados para mapear os parâmetros aerodinâmicos.

	CONFIGURAÇÃO AERODINÂMICA			ATTITUDE DA MASSA SUSPensa				ângulo de esterçamento
	ângulo do flap dianteiro	ângulo da asa traseira inferior	ângulo da asa traseira superior	altura do eixo dianteiro	altura do eixo traseiro	ângulo de rolagem	ângulo de deriva do veículo	
Medição padrão	X	X	X	X	X			
Medição completa	X	X	X	X	X	X	X	X

O principal parâmetro para caracterizar um escoamento em baixas velocidades é o número de Reynolds. Para uma faixa entre 72 km/h e 288 km/h ao nível do mar, o número de Reynolds varia entre 4.106 e 16.106. Essa faixa de variação é bastante grande e pode implicar mudanças no comportamento do escoamento. O ângulo de ataque em que ocorre a máxima sustentação em um aerofólio é dependente do número de Reynolds (MCCORMICK, 1995). Apesar desses veículos trabalharem em uma determinada faixa de número de Reynolds, as medições em túnel de vento são realizadas com velocidade fixa. Essa velocidade é selecionada testando o modelo com uma configuração fixa no túnel em diferentes velocidades. As diferenças entre os resultados são analisadas e se usa a menor velocidade possível por conta dos custos de operação do túnel (MCBEATH, 2012). A análise do escoamento à velocidade variável ainda é objeto de pesquisa e desenvolvimento.

Para que os resultados do túnel de vento possam ser utilizados nas equações de dinâmica de movimento do veículo, eles precisam ser transformados em equações com as variáveis de estado do veículo que influenciam o comportamento aerodinâmico. Essas equações são regressões não lineares de múltiplas variáveis ou interpolações dos mapas aerodinâmicos (linear, cúbica, etc.). A abordagem utilizando regressões foi utilizada para veículos de Formula 1 em relação às alturas dos eixos, ângulo de deriva, rolagem e esterçamento (MAVROUDAKIS, 2010), e para a análise de ângulos de ataque das asas de veículos de Formula 2 e Formula 3 (DALLARA, 2010; MAVROUDAKIS, 2010). Alguns autores (DALLARA, 2009, 2012a) utilizam interpolação linear aplicada aos mapas aerodinâmicos com referência às alturas dos eixos para calcular os coeficientes aerodinâmicos em diversas combinações de altura dos eixos dianteiros e traseiro. No caso específico de veículos de Formula 2 e Formula 3, o fabricante fornece os mapas aerodinâmicos, porém não fornece a equação da superfície, ficando a cargo do usuário saber como utilizá-los. Analisando os mapas de diferentes veículos, fica claro que eles apresentam tendências similares em relação

às variáveis de estado. Isso também fica claro no trabalho prático, quando engenheiros com experiência e sem nenhum dado experimental aerodinâmico conseguem configurar os veículos de forma satisfatória.

Algumas publicações apresentam resultados de componentes individuais. A asa dianteira foi estudada com modelos de simulação e de túnel de vento em situação de oscilação em proximidade ao solo (MOLINA; ZHANG, 2011). Nesse trabalho, foi identificado que as forças aerodinâmicas são proporcionais à altura do solo, à velocidade e à aceleração da oscilação. Esses resultados são condizentes com os estudos teóricos do começo do século vinte, utilizados como base para o cálculo de *Flutter* aerodinâmico (THEODORSEN, 1935). Modelos simplificados de carroceria com um difusor também foram ensaiados, sujeitos a oscilações de baixa frequência (RUHRMANN; ZHANG, 2003), evidenciando que a frequência de oscilação influencia no comportamento das forças e também no estol do difusor.

O Apêndice A apresenta um estudo realizado pelo autor com os dados de túnel de vento de diversos veículos do tipo Formula. Nele são apresentadas as equações utilizadas neste trabalho para calcular os valores de arrasto, suspensão negativa e balanço aerodinâmico e também uma análise do erro entre modelos de regressão e os dados brutos do túnel de vento.

### 3.2 DINÂMICA VERTICAL

Historicamente, o estudo da dinâmica vertical se inicia com o problema de conforto dos passageiros. Maurice Olley foi pioneiro no estudo da dinâmica veicular e também no estudo do problema de conforto com o seu protótipo de veículo do começo do século XX, que permitia a variação do momento de inércia em arfagem do veículo (MILLIKEN et al., 2002).

Posteriormente, a dinâmica veicular se divide em três frentes: dinâmica longitudinal, dinâmica lateral e dinâmica vertical. A dinâmica vertical estuda as oscilações da massa suspensa e não suspensa do veículo (MITSCHKE; WALLENTOWITZ, 2004).

A dinâmica vertical, no que tange à suspensão primária, é tradicionalmente dividida (GILLESPIE, 1992; MITSCHKE; WALLENTOWITZ, 2004; GENTA; MORELLO, 2009) em dois objetivos: conforto e segurança/dirigibilidade.

Basicamente, o objetivo de conforto é relacionado às acelerações da massa suspensa, e o de dirigibilidade à força de contato entre pneu e pavimento.

De forma simplista, a análise de conforto é realizada comparando os valores da raiz dos valores quadráticos médios (r.m.s.) de aceleração da carroceria com os valores máximos a que o ser humano pode ser exposto durante um determinado número de horas. A ISO possui uma norma que sugere valores de intensidade e tempo de exposição a vibrações que o ser humano pode suportar sem efeitos colaterais (ISO, 1997). Porém, os fabricantes de carros de passeio têm como objetivo desenvolver um veículo confortável. Dessa forma, os critérios utilizados são mais severos do que as normas. Os testes são feitos em circuitos especialmente construídos para testar conforto da suspensão dos veículos, seja do ponto de vista de eventos discretos (lombadas e buracos) ou do ponto de vista de irregularidades do asfalto.

A análise de dinâmica vertical pode ser feita tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência. De maneira geral, para eventos discretos se utiliza o domínio do tempo, enquanto para eventos contínuos se utiliza o domínio da frequência (RILL, 2007).

Do ponto de vista de desempenho em competições, o critério de conforto é desconsiderado e o objetivo é basicamente segurança/dirigibilidade. A segurança/dirigibilidade em dinâmica vertical pode ser traduzida em minimizar a variação da força de contato entre o pneu e o solo (GENTA; MORELLO, 2009). As forças longitudinais e laterais disponíveis nos pneus são função do seu carregamento vertical. Qualquer oscilação da força vertical resultará, como consequência, em variação nas forças disponíveis nos pneus.

Em um circuito de competição, a passagem do veículo sobre as zebras pode ser considerada evento discreto, enquanto os eventos contínuos são determinados pelo perfil de irregularidade da pista.

Os eventos discretos podem ser analisados quanto a sua resposta no tempo. Uma maneira de avaliar a resposta do veículo é utilizar o método dos mínimos quadrados (RILL, 2007), conforme apresentado na Equação (1). Essa técnica busca minimizar a variação em função do tempo para uma entrada discreta, por exemplo, uma entrada em degrau.

$$INDICE = \sqrt{\int_{t=0}^t (\Delta F_{contato})^2 . dt} \quad (1)$$

A abordagem no domínio da frequência utiliza a inércia da força de contato do pneu com o solo, que é função da resposta em frequência da força de contato -  $M(f)$  - e do espectro de frequência do perfil da pista -  $G(f)$ . A raiz quadrada da integral dessa curva no domínio da frequência é a variância desse parâmetro (valor r.m.s), conforme apresentado pela Equação (2) (BARBOSA; NETO, 2001). Dessa forma, quanto maior o valor desse índice, maior a variabilidade do parâmetro.

$$INDICE = \sqrt{\int_{f_{min}}^{f_{max}} |M(f)|^2 \cdot G(f)} \quad (2)$$

Essa abordagem probabilística permite que a resposta de um sistema seja condensada em um único índice (BARBOSA; NETO, 2001). Essa abordagem é também utilizada para cálculos de fadiga em eixo de veículos comerciais e no dimensionamento da capacidade de carga de rodovias.

A influência da minimização da variação da força de contato no tempo de uma volta completa já foi estudada (BARCELO, 2012), assim como a influência dos *inerters*<sup>12</sup>. Ela também foi estudada quanto a sua influência no desempenho de veículos de arrancada (NEW, 2008). Em todas essas situações, ela pode melhorar o desempenho do veículo.

Algumas particularidades dos veículos de competições devem ser levadas em consideração na abordagem de dinâmica vertical. Entre as principais, podemos citar:

1. Os veículos de competição pesam entre 50% e 70% do peso de um carro de passeio;
2. A altura do seu centro de massa é cerca de 50% menor do que a de um carro de passeio;
3. A altura do solo é de cerca de 25 mm;
4. A rigidez vertical de um pneu *slick*<sup>13</sup> é muito similar à rigidez do sistema de suspensão (muito diferente de um carro de passeio, no qual a rigidez do pneu é cerca de 10 vezes a rigidez do sistema de suspensão). Dessa forma, a otimização dos amortecedores não fica tão óbvia, já que um aumento de

<sup>12</sup> O *inertor* é um dispositivo que pode ser acoplado ao sistema de suspensão de veículos de competição; ele gera uma força proporcional à diferença de aceleração entre a massa suspensa e a massa não suspensa multiplicada por uma constante, que é o fator de inércia do componente (SMITH, 2002). Inicialmente, foi utilizado pela McLaren na Formula 1 (Pioggia) e em categorias menores como Formula 3 (KOUROS, 2017). Atualmente, o componente é banido em diversas categorias.

<sup>13</sup> Pneu do tipo *slick* é o pneu utilizado exclusivamente em competição, que apresenta composto sensível à temperatura e pode atingir elevados valores de aderência (coeficiente de atrito maior do que 1). O autor não encontrou tradução formal para o termo.

amortecimento pode gerar menos amortecimento global do sistema (MULTIMATIC, 1998);

5. Uma configuração de suspensão superamortecida, apesar de não recomendável, é utilizada na prática, principalmente quando o objetivo é a geração de calor nos pneus;

6. O desempenho aerodinâmico tem grande influência no desempenho global do veículo. As alturas dos eixos são fatores chave no desempenho aerodinâmico e são determinadas pelas propriedades de suspensão. Quanto maior a sustentação negativa gerada, maior a compressão do sistema, o que implica a utilização de molas de alta rigidez, para que o veículo não toque no chão em altas velocidades;

7. Os movimentos da massa suspensa mudam a resposta aerodinâmica e podem criar instabilidade aerodinâmica no sistema;

8. Em teoria, as forças aerodinâmicas, por serem proporcionais à altura do solo e à velocidade dos movimentos da carroceria do veículo, criam rigidez e amortecimento aerodinâmicos no sistema (MÜHLMEIER; THEODORSEN, 1935; FLOYD; LAW, 1994);

9. O balanço mecânico e a aderência são controlados pelos pneus e têm uma dependência direta com a sua temperatura de trabalho. As molas e os amortecedores podem ser selecionados para aumentar a geração de temperatura e, conseqüentemente, mudar o balanço mecânico.

O principal ensaio utilizado pela indústria do esporte motorizado para avaliação dos indicadores de desempenho de dinâmica vertical é feito com o equipamento chamado de *4 post rig* (CAMBIAGHI et al., 1998; MTS, 2010). Esse equipamento, basicamente, replica o comportamento de dinâmica vertical do veículo (acelerações longitudinais e laterais são excluídas), usando atuadores hidráulicos posicionados para cada conjunto roda/pneu, conforme apresentado nas Figuras 5 e 6. É possível adicionar mais três atuadores fixos na carroceria para replicar as forças aerodinâmicas. Nesse caso, o equipamento é chamado de *7 post rig* (WRIGHT, 2001). Ele é utilizado normalmente para estudar veículos que geram elevados valores de sustentação negativa.

Figura 5 - 4/7 *post rig* – vista lateral 1.

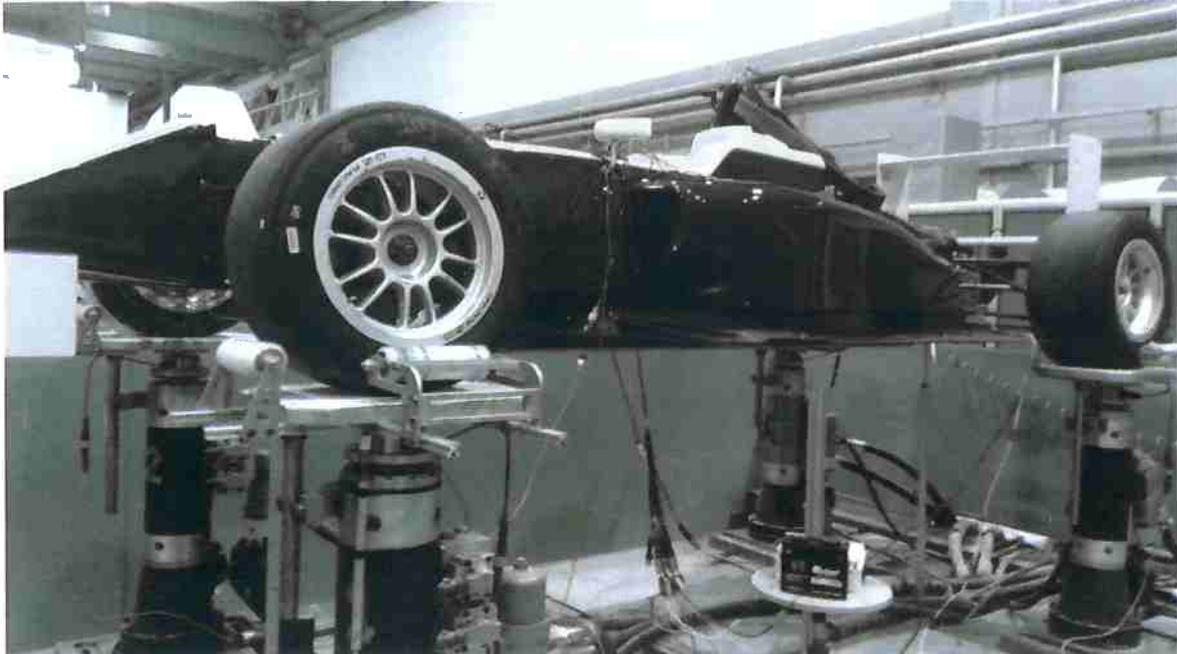


Figura 6 - 4/7 *post rig* – vista lateral 2.



Essa abordagem tem sido utilizada nos últimos 20 anos e seus resultados podem ajudar na configuração do sistema de suspensão.

A *Auto Research Center* (ARC) é uma empresa em Indianópolis (KELLY et al., 2002; KOWALCZYK, 2002) que possui equipamentos para ensaio em laboratório de veículos de competição (túnel de vento, *7 post rig* e etc.). Eles publicaram alguns trabalhos com procedimentos de análise dos resultados em *7 post rig* no domínio do tempo e da frequência. O mesmo equipamento também é utilizado na Universidade de Brescia (UniBs) (CAMBIAGHI et al., 1998), na Itália, porém sem os três atuadores extras para a simulação dos carregamentos aerodinâmicos<sup>14</sup>.

Esse ensaio pode ser feito no domínio do tempo, utilizando um perfil de pista artificial ou replicando o perfil de um teste em pista. Tanto a ARC quanto a UniBs utilizam um sistema de controle interativo que é capaz de replicar as acelerações das mangas de eixo de um teste, criando um perfil artificial de pista para o ensaio em laboratório. Esse processo é feito de forma automática, utilizando um processo de malha fechada até que as acelerações sejam corretamente replicadas (KELLY et al., 2002). A ARC sugere no mínimo 8 ciclos para que uma volta completa em circuito possa ser corretamente replicada.

Para o ensaio no domínio do tempo, são necessários diversos dados de campo, como as acelerações verticais das quatro mangas de eixo (massa não suspensa), o deslocamento relativo entre as mangas e a massa suspensa, e no mínimo três acelerômetros na massa suspensa. Com esses dados, uma rotina cria um perfil de entrada que tenta replicar as acelerações da massa não suspensa e da massa suspensa. Mesmo quando as acelerações são replicadas, não significa que o perfil de deslocamento do atuador calculado é o perfil da pista (GADOLA et al., 2003), o que não permite a utilização desse perfil de entrada para outros veículos.

Existem alguns programas de computador que, com o deslocamento relativo entre as mangas de eixo e a massa suspensa (deslocamento dos amortecedores), recriam o perfil de pista. Mas, assim como no procedimento anterior, essa abordagem não implica a obtenção de um perfil de pista que pode ser utilizado para outros veículos (NOWLAN, 2010).

Quando um veículo disputa em uma categoria na qual testes são limitados, assim como o número de sensores permitidos no veículo, a abordagem no domínio do tempo não é possível. Nesses casos, é utilizada uma abordagem no domínio da

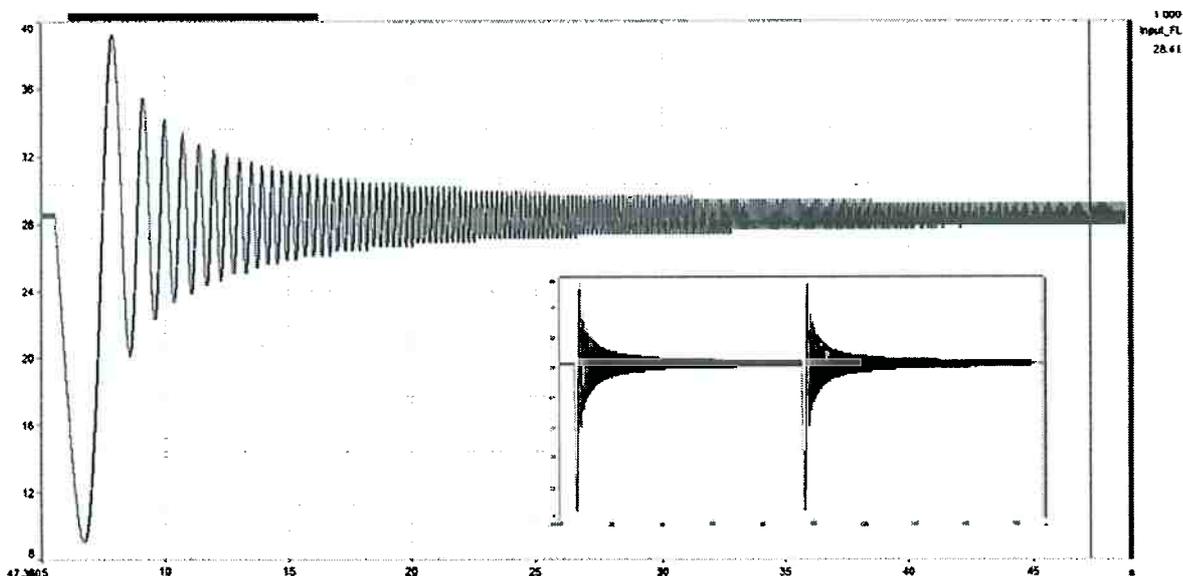
---

<sup>14</sup> Esse equipamento foi utilizado pelo autor e os detalhes de sua operação se encontram no Apêndice B.

frequência. Essa abordagem é a mais utilizada atualmente, porque, com exceção de categorias de elevado orçamento técnico (por exemplo, Formula 1 e LMP1), as demais categorias possuem limitações que as impedem de utilizar sensores suficientes para a abordagem no domínio do tempo. A abordagem no domínio da frequência é feita utilizando um sinal que faz uma varredura senoidal em uma determinada faixa de frequência, mantendo a potência do sinal constante (com o aumento da frequência, a amplitude do sinal diminui). O sinal de entrada pode excitar o veículo em qualquer um dos seus modos de frequência (balanço<sup>15</sup>, arfagem, rolagem e etc.), porém, de maneira geral, é utilizado um sinal com os quatro atuadores se movimentando em fase (modo de balanço).

A Figura 7 apresenta o sinal de entrada utilizado no ensaio padrão de um *4 post rig* no domínio da frequência. Ela apresenta o deslocamento do atuador (mm) – que se encontra em contato com pneu – em função do tempo (s). Na Universidade de Brescia, são feitas duas rodadas consecutivas, como precaução caso ocorra qualquer problema durante alguma delas.

Figura 7 - Função de entrada dos atuadores.



Para a análise no domínio da frequência, a ARC excita o veículo somente no modo de balanço (os quatro atuadores se movem juntos em fase) com um sinal que

<sup>15</sup> O autor utiliza o termo "modo de balanço" como tradução para o modo de *Bounce*.

varre senoidalmente uma faixa de frequência pré-determinada à potência constante. O objetivo de ensaio é configurar as molas e os amortecedores para que se minimize o ganho de arfagem com uma entrada de balanço. Eles obtiveram bons resultados com veículos do tipo Formula com alto carregamento aerodinâmico e também com veículos de NASCAR (KOWALCZYK, 2002). Esse mesmo método é utilizado pela UniBs e pela *Multimatic*.

O objetivo de minimizar o ganho de arfagem é justificado como (KASPRZAK; FLOYD, 1994):

1. Reduzindo a resposta de arfagem, reduz-se a instabilidade aerodinâmica, pois a posição longitudinal do centro de pressão aerodinâmico é função do ângulo de arfagem;
2. Existe ganho de aderência mecânica reportado por pilotos profissionais em testes em pista;
3. Toda vez que o veículo arfa, ele transfere carga de um eixo para o outro, mudando conseqüentemente o balanço mecânico do veículo.

A minimização da resposta de arfagem para uma entrada de balanço (*Bounce* – quatro atuadores movimentando em fase) não implica que o veículo não irá responder a uma entrada da pista sem arfar. As excitações da pista irão excitar o veículo tanto nos modos de arfagem como no de balanço. Porém, de acordo com resultados práticos, a minimização da resposta de arfagem com a entrada de balanço resulta em aumento de desempenho.

Todos os procedimentos de ensaio em domínio da frequência pedem que os veículos sejam configurados sem componentes não lineares (Multimatic, 1998). Essa abordagem faz sentido, tendo em vista que a técnica utilizada foi desenvolvida para sistemas lineares, porém não faz sentido com a configuração prática utilizada em pista. As não linearidades são necessárias para manter a correta altura do veículo devido às elevadas cargas aerodinâmicas.

A Multimatic, uma das principais empresas na execução de ensaios de dinâmica vertical para veículos de competição, utiliza a abordagem do domínio da frequência. De acordo com eles, a abordagem no domínio do tempo somente é real para uma configuração específica do veículo. Com a mudança da configuração, o perfil de entrada não é mais válido. Essa opinião também é compartilhada pelos pesquisadores da UniBs (GADOLA et al., 2003).

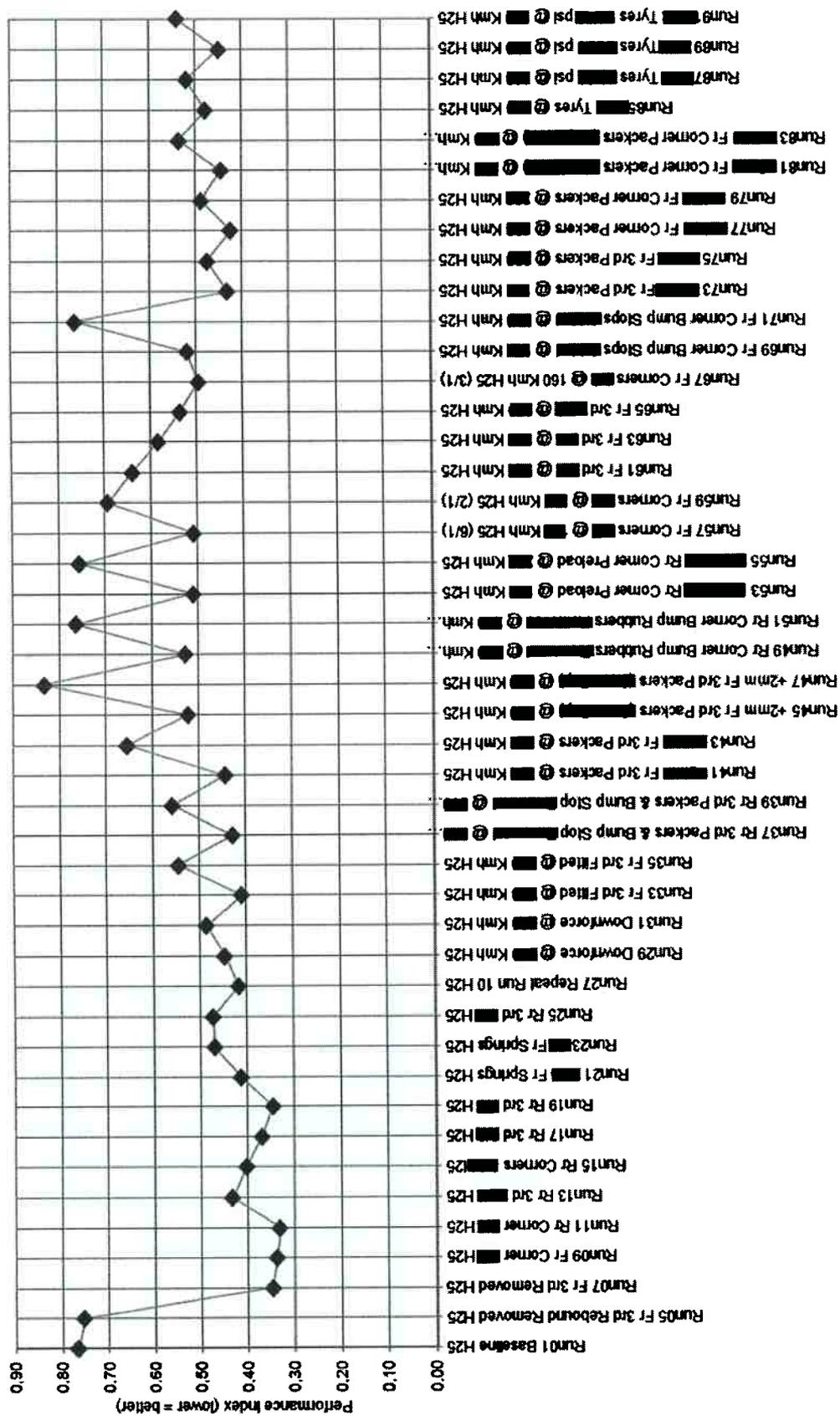
De forma a poder comparar os resultados eficientemente após cada rodada de testes, indicadores de desempenho foram desenvolvidos. Para a análise no domínio da frequência, os principais indicadores utilizados atualmente são (Multimatic, 1998):

1. Fator de desacoplamento entre arfagem e balanço;
2. Valor de pico de variação de carga vertical dos pneus (para maximizar a aderência mecânica, busca-se minimizar esse valor);
3. Relação entre a deflexão dos pneus e os sistemas de suspensão, tanto para o eixo dianteiro quanto para o eixo traseiro (entende-se que é um indicador de geração de calor para os pneus);
4. Energia absorvida pelos pneus (outro parâmetro utilizado como indicador de geração de temperatura nos pneus);
5. Sensibilidade das alturas dos eixos dianteiro e traseiros (utilizado como indicador de sensibilidade aerodinâmica);
6. Impacto de zebra, indica a estabilidade mecânica do veículo ao passar sobre uma zebra (esse é o único ensaio onde a entrada não é a varredura senoidal em balanço, mas sim uma entrada em degrau no domínio do tempo em somente um lado do veículo, com uma defasagem no tempo entre a entrada do eixo dianteiro e do eixo traseiro).

Colocando os seis índices acima juntos com diferentes pesos entre eles, um índice geral de desempenho é calculado e analisado ao final de cada rodada de ensaios. A formulação matemática desse índice utilizado pela Multimatic não é disponível na documentação.

A Figura 8 apresenta uma série de testes conduzidos na Multimatic e a evolução do índice de desempenho. No eixo das ordenadas, é apresentado o valor do índice de desempenho e no eixo das abscissas, são detalhados os nomes dos ensaios (normalmente relacionados à configuração testada). Alguns desses nomes foram removidos para manter o sigilo dos resultados. Teoricamente, quanto menor o índice, melhor será o desempenho em pista. Esse índice é um indicador final baseado nos demais seis indicadores explicados anteriormente.

Figura 8 - Evolução do índice de desempenho final proposto pela Multimatic.



A relação entre arfagem e balanço aerodinâmico é chamada de sensibilidade à arfagem. Como regra geral, quanto maior a área do difusor, mais baixa a altura da asa dianteira e quanto mais baixo o assoalho do veículo em relação ao chão, mais sensível à arfagem o veículo é. Com a sensibilidade medida através de ensaios em túnel de vento, seria possível ponderar os índices 1 e 5 no cálculo do índice de desempenho final, porém isso não é feito na prática.

A mesma abordagem poderia ser utilizada para os índices 3 e 4. Se os dados dos pneus relacionados à relação entre temperatura e deslocamento vertical fossem conhecidos, os índices poderiam ser corretamente ponderados no índice final. Porém, de acordo com a revisão bibliográfica sobre esse assunto feita pelo autor, ainda não existe uma formulação teórica ou experimento que defina essa relação.

A Equação (3) apresenta outra formulação para o cálculo de um índice de desempenho de ensaios do tipo *4/7 post rig* para veículos de competição (NOWLAN, 2010). Ele basicamente calcula o desempenho de dinâmica vertical em função dos ganhos dos diversos fatores ponderados. Entre os fatores considerados, encontram-se: variação do deslocamento vertical ( $\Delta z$ ), variação do deslocamento em arfagem ( $\Delta\varphi$ ), variação da altura do eixo dianteiro ( $\Delta z_f$ ), variação da altura do eixo traseiro ( $\Delta z_r$ ), variação do carregamento vertical aerodinâmico no eixo dianteiro ( $\Delta L_f$ ) e variação do carregamento aerodinâmico vertical no eixo traseiro ( $\Delta L_r$ ). Essa abordagem utiliza modelos matemáticos e não é realizada experimentalmente, como o índice previamente apresentado.

$$INDICE = c_1 \frac{\Delta z}{z_0} + c_2 \frac{\Delta\varphi}{\varphi_0} + c_3 \frac{\Delta z_f}{z_{f0}} + c_4 \frac{\Delta z_r}{z_{r0}} + c_5 \frac{\Delta L_f}{L_{f0}} + c_6 \frac{\Delta L_r}{L_{r0}} \quad (3)$$

Cada fator  $c_i$  no equacionamento acima representa um fator de peso e os seus valores são escolhidos com base em experiência.

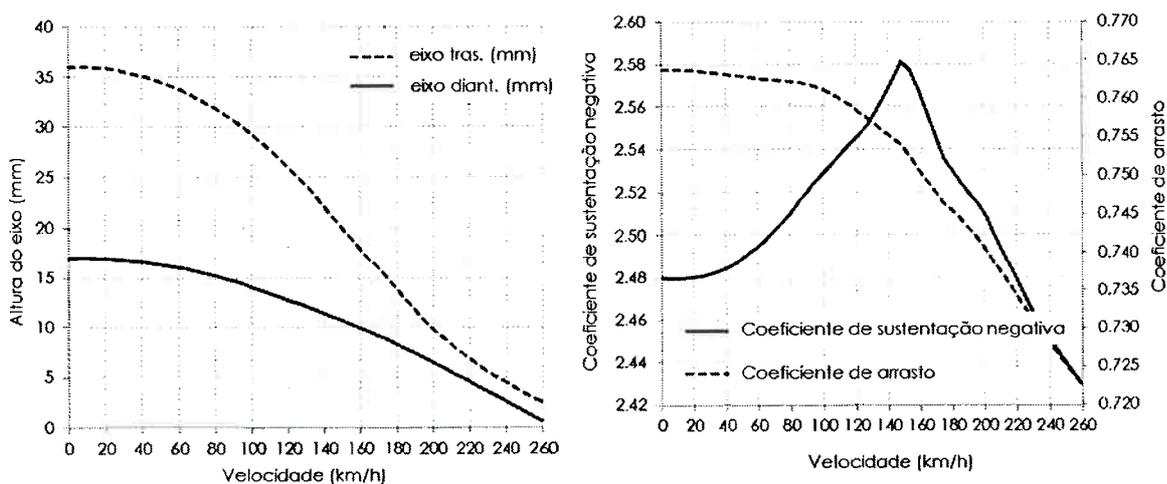
As duas propostas de Índice de Desempenho de dinâmica vertical para veículos de competição apresentadas são baseadas em modelos lineares. Se fosse possível manter as não linearidades presentes nos sistemas de suspensão, também seria possível ensaiar ou simular a configuração realmente utilizada na prática.

A interação entre os sistemas de suspensão e os carregamentos aerodinâmicos pode ser estudada em duas diferentes frentes: em regime quase-estático e em regime transiente. O regime quase-estático é crucial para configurar a rigidez das molas e garantir que o veículo opere nas alturas desejadas para a faixa de

velocidade de um determinado circuito (DALLARA, 2009, 2012a). O regime transiente é utilizado basicamente para configurar os amortecedores (MULTIMATIC, 1998).

A técnica mais utilizada é calcular a altura dos eixos dianteiros e traseiros do veículo em função da velocidade em regime quase estático, utilizando os mapas aerodinâmicos e as não linearidades do sistema de suspensão (MYGALE, 2009). A velocidade varia de 0 km/h até a velocidade máxima que o veículo pode atingir com a configuração escolhida. A Figura 9 apresenta os resultados desse procedimento para um veículo de Formula 3. Ela apresenta, à esquerda, a variação das alturas dos eixos dianteiros e traseiros e, à direita, a variação dos coeficientes de arrasto e sustentação negativa em função da velocidade longitudinal.

Figura 9 - Variação da altura do solo e dos coeficientes aerodinâmicos em função da velocidade longitudinal.



É possível também aplicar uma desaceleração longitudinal no veículo para verificar em regime quase estático se o assoalho do veículo irá tocar o solo em manobra de frenagem (MYGALE, 2009).

A análise em regime transiente para os veículos estudados na tese é feita no domínio da frequência. Nela, as forças aerodinâmicas são replicadas, ajustando-se a altura do veículo à altura de trabalho em uma velocidade pré-estabelecida. Essa correção na altura do veículo permite que o sistema de suspensão trabalhe com a razão de instalação correta para a altura. A razão de instalação do sistema de suspensão é muitas vezes não linear (progressiva) com o deslocamento vertical da roda (TATUUS, 2013). A rigidez final do sistema de suspensão depende da rigidez da

mola multiplicada pela razão de instalação ao quadrado, mais a rigidez do batente (que no ensaio experimental é removido, conforme explicado anteriormente). Do ponto de vista da simulação, essa correção é uma tarefa simples, porém, no campo experimental, é preciso utilizar molas a ar que gerem a força necessária para a correção da altura do veículo, que possuam rigidez muito baixa e sem histerese, de forma a não alterar a resposta dinâmica do sistema de suspensão.

De maneira geral, as técnicas utilizadas atualmente no domínio da frequência não conseguem replicar a configuração dos veículos por conta da remoção das não linearidades. Replicam parcialmente as forças aerodinâmicas porque a sensibilidade dessas às mudanças de atitude dos veículos não são modeladas.

Dois trabalhos desenvolvidos na Universidade de *Clemson* nos anos 90 (FLOYD; LAW, 1994; KASPRZAK; FLOYD, 1994) acoplam a resposta do sistema de suspensão aos carregamentos aerodinâmicos de veículos de competição. O objetivo do trabalho é basicamente o de encontrar uma configuração ótima dos amortecedores para que o sistema se encontre estável para a faixa de velocidade do veículo. Eles demonstram que algumas configurações geram instabilidade ao veículo, fenômeno encontrado na prática como uma vibração excessiva do eixo dianteiro que amplifica a amplitude com o aumento da velocidade. Esse fenômeno é chamado de *porpoising*.

Um outro trabalho também realizado nos anos 90 mostra a relação entre a dinâmica vertical e os carregamentos aerodinâmicos no que tange ao conforto e à dirigibilidade de veículos (DONISELLI et al., 1996). Eles demonstram claramente que ambos são afetados pelos carregamentos aerodinâmicos e que a resposta em frequência do veículo depende da velocidade, de forma similar ao que foi publicado pela Universidade de *Clemson*.

Em todos os trabalhos já desenvolvidos existem lacunas, seja porque o veículo é analisado com a suspensão linearizada, ou a análise é feita para uma velocidade específica ou então porque os resultados não calculam um índice final de desempenho. Os carregamentos aerodinâmicos são, até o momento, mais corretamente introduzidos nos trabalhos com modelos matemáticos do que nos ensaios em laboratório, porém, nos modelos, os índices propostos são incompletos comparados com os dos laboratórios.

Os índices de desempenho desenvolvidos até o momento (seja em simulação ou ensaios experimentais) são genéricos para o veículo em qualquer situação. Eles

não distinguem uma pista da outra, mesmo que haja uma diferença significativa de faixa de velocidade, configuração base do veículo e/ou rugosidade da pista.

O objetivo desta tese é consolidar esses trabalhos de forma que o veículo seja analisado, incluindo-se todas as não linearidades do sistema de suspensão e dos carregamentos aerodinâmicos. Esse novo índice proposto também poderá ser customizado em função da pista onde o veículo irá competir, mudando a faixa de velocidade, a configuração inicial do veículo e o perfil da pista.

## 4 METODOLOGIA

*“Throttle, Green, Green, Amber. Change. Brake, turn the wheel, point it at a corner, accelerate. Simple. It’s like an arcade game. The challenge is doing it faster than everybody else without losing control. That is an entirely different level.”*

(Adrian Newey)

A metodologia utilizada neste trabalho para o cálculo dos índices de desempenho requer um modelo analítico do veículo e dados do circuito onde o veículo irá competir. O modelo analítico do veículo será apresentado no próximo capítulo. Os dados do circuito são necessários para customizar o índice de desempenho, característica inovadora do índice proposto.

Em cada circuito, devido a sua trajetória, é imposta uma faixa de trabalho de velocidade, ou seja, define-se uma velocidade mínima e máxima. Essa faixa de velocidade define alguns aspectos da configuração do veículo, por exemplo, o nível de sustentação negativa que será utilizado (baseado na curva polar apresentada na Figura 3). Em circuitos de alta velocidade média, para maximizar o desempenho do veículo (minimizar o tempo de volta), o arrasto aerodinâmico deve ser minimizado e, como consequência, a sustentação negativa é menor (Figura 3). Já em circuitos de baixa velocidade média, busca-se a configuração de máxima sustentação negativa (como consequência, o arrasto aerodinâmico aumenta), pois a perda de velocidade máxima tem menor impacto do que o ganho de velocidade nas curvas (Figura 3).

O nível de sustentação negativa utilizado define alguns aspectos do sistema de suspensão, que deve manter a altura do veículo entre uma determinada faixa de trabalho para maximizar o desempenho aerodinâmico e também não deixar que o veículo toque o solo. Quanto mais profissional a categoria de monoposto, maiores as opções de superfícies aerodinâmicas (asas e difusores).

Um veículo da categoria FIA Formula 2, por exemplo, possui duas configurações de asas traseiras: uma versão de alta sustentação negativa (biplano) e outra de baixa (monoplano) (DALLARA, 2010). Dentre os dois extremos do calendário tem-se o GP de Monza e o GP de Mônaco. O primeiro é caracterizado como um circuito de alta velocidade, com longas retas, e sabe-se que a velocidade máxima é um fator de extrema importância. O segundo é um circuito de rua de baixa velocidade,

baixa aderência do asfalto (de maneira geral, todos os circuitos de rua possuem baixa aderência), não existem retas longas e o fator chave de desempenho é a velocidade mínima em curvas.

Para o circuito de Monza, por exemplo, a configuração escolhida é de baixa carga aerodinâmica e, por conta disso, a configuração do sistema de suspensão pode possuir baixa rigidez e não utilizar os batentes de suspensão. Para o circuito de rua de Mônaco, por exemplo, a configuração escolhida é de alta sustentação negativa, porém, por conta do elevado número de irregularidades da pista, o veículo deve ser rígido o suficiente para sustentar o carregamento aerodinâmico e suficientemente flexível para manter contato entre o pneu e a via.

A Tabela 5 apresenta a faixa de velocidade média de seis diferentes circuitos, evidenciando a diferença entre eles. Devido ao sigilo dos dados, os nomes reais dos circuitos não serão utilizados.

Tabela 5 - Faixa de velocidade em diferentes circuitos.

Circuito	Configuração aerodinâmica	Nível de irregularidades	# curvas	Velocidade (km/h)			
				mín	média	máx	média das curvas
circuito 1	Alta sustentação negativa	alto	6	56	154	216	108
circuito 2	Alta sustentação negativa	baixo	11	80	158	224	122
circuito 3	Alta sustentação negativa	baixo	9	66	166	238	93
circuito 4	Alta sustentação negativa	baixo	11	80	165	225	123
circuito 5	Média sustentação negativa	médio	12	62	170	245	115
circuito 6	Baixa sustentação negativa	médio	13	63	184	241	136

As Figuras 10, 11 e 12 apresentam, de cima para baixo, a velocidade longitudinal, aceleração lateral e aceleração longitudinal do veículo nos circuitos 2, 5 e 6. As grandezas dessas figuras foram ocultadas devido ao sigilo dos dados, porém é possível observar que a velocidade em que as acelerações são exigidas são diferentes, o que implica diferentes demandas de aderência pelos veículos em diferentes situações. Além das várias configurações do veículo escolhidas para cada um desses circuitos, a faixa de velocidade à qual o veículo é submetido é diferente, o que justifica uma necessidade maior de customizar os resultados dos ensaios de dinâmica vertical.

Figura 10 - Características do circuito 2.

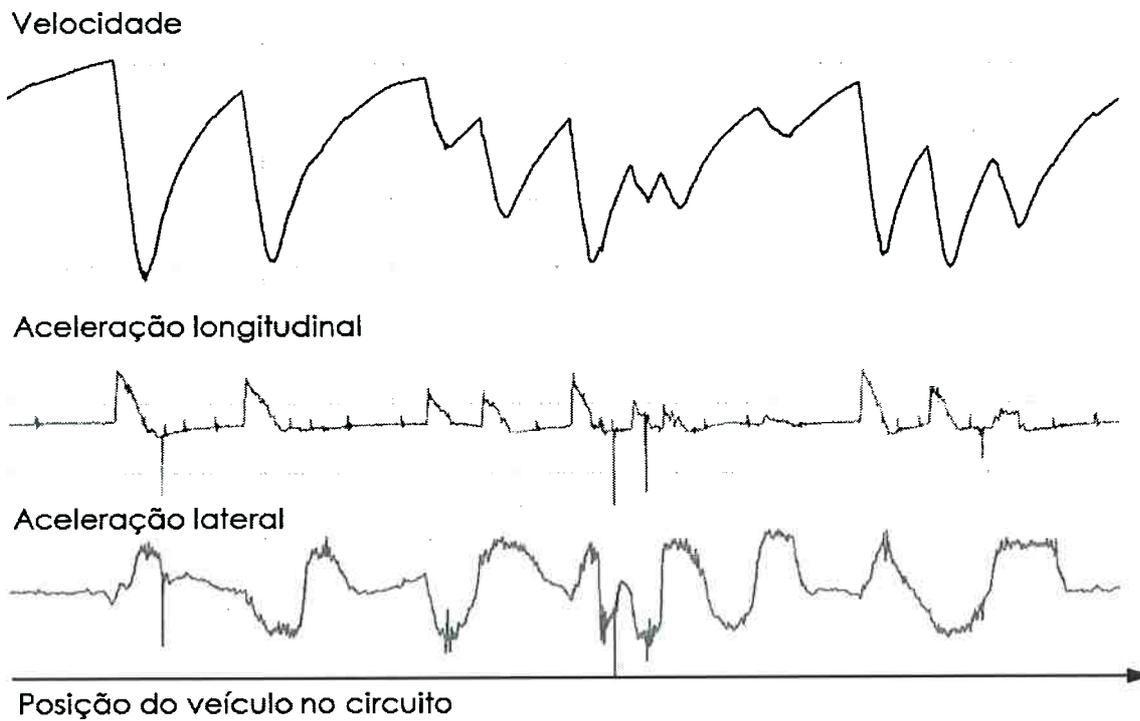


Figura 11 - Características do circuito 5.

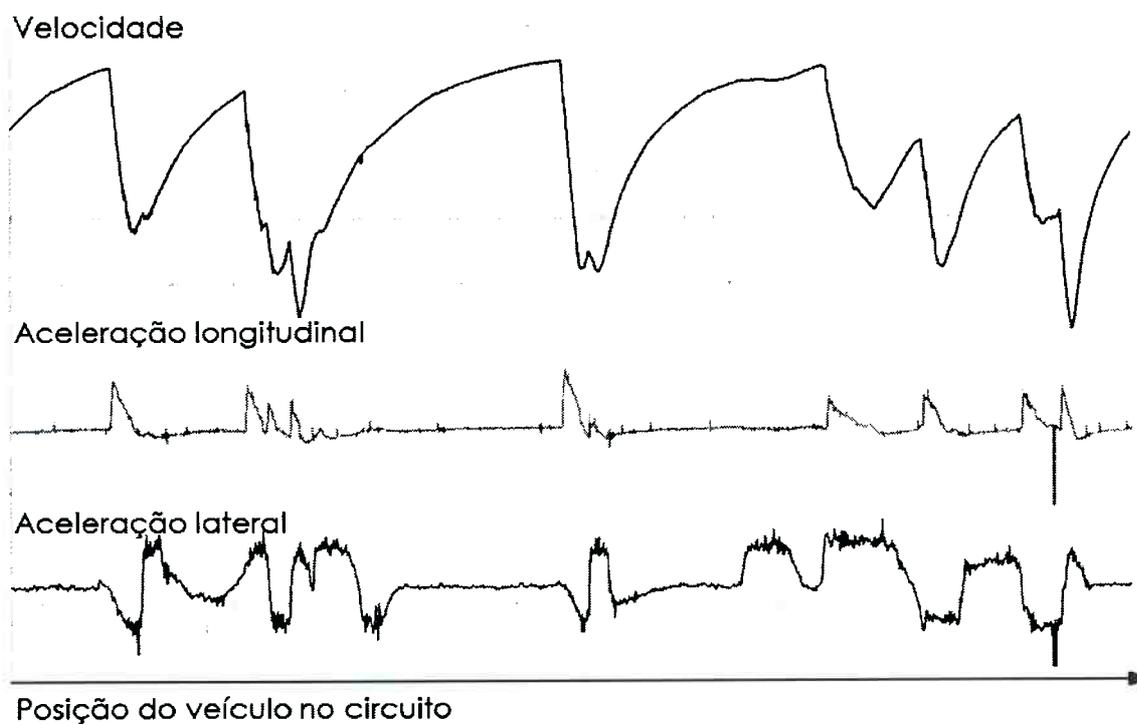
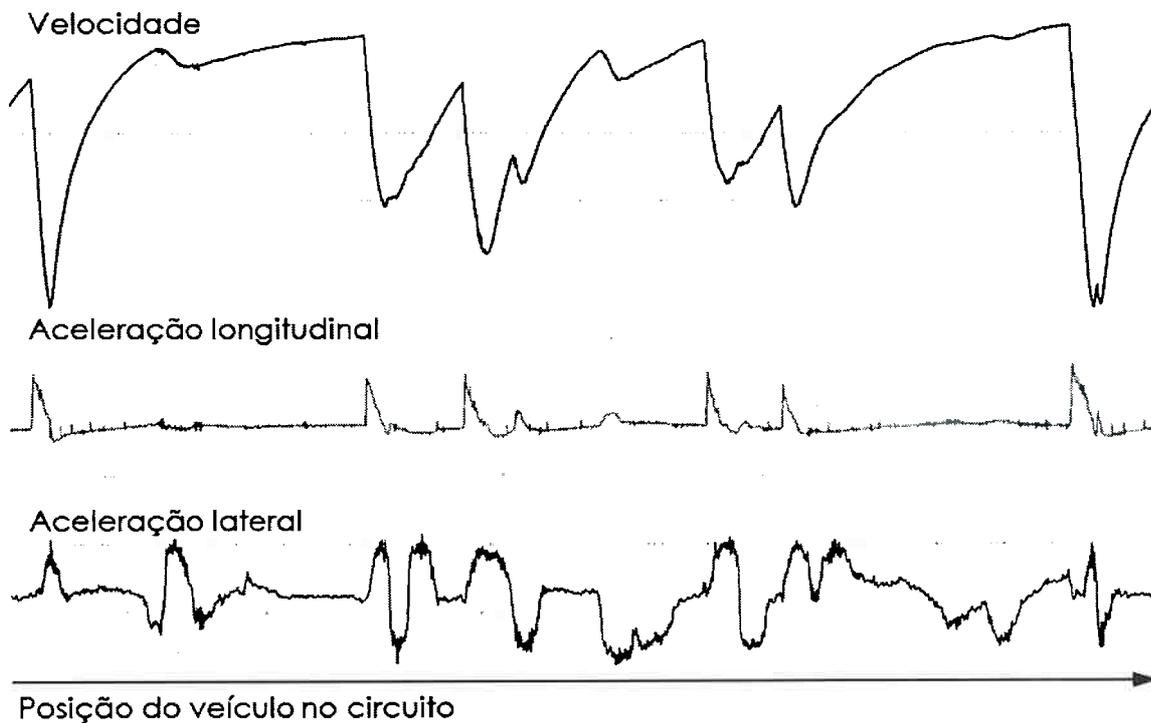
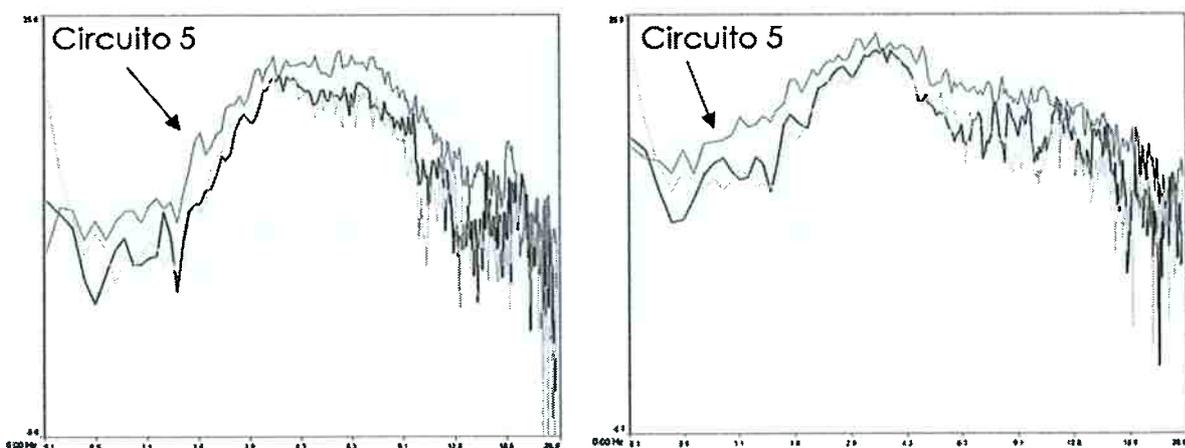


Figura 12 - Características do circuito 6.



Utilizando os dados de pista, é possível aplicar a transformada de Fourier no deslocamento relativo entre massa suspensa e não suspensa (utilizando sensores de deslocamento da suspensão). A Figura 13 apresenta os ganhos dos movimentos de arfagem (esquerda) e de balanço (balanço) da carroceria para os circuitos: 2 (preto), 5 (cinza escuro) e 6 (cinza claro).

Figura 13 - Transformada de Fourier dos movimentos de arfagem e balanço da carroceria nos circuitos 2, 5 e 6.



Na Figura 13, observa-se pouca variação de frequência natural entre os circuitos analisados, resultado das diferentes configurações utilizadas em cada um dos circuitos. É visível que as excitações do circuito 5 (curva cinza escuro) são de maior intensidade do que os demais circuitos, devido aos maiores valores de ganho. O perfil da pista em cada um dos circuitos é diferente e, conseqüentemente, a intensidade da excitação e as faixas de frequências mais excitadas também serão.

Na análise no domínio da frequência utilizada pela indústria e explicada na revisão bibliográfica, a entrada é uma excitação em balanço. Para o cálculo do presente índice, a entrada será um perfil de pista. Por conta disso, deve-se primeiramente excitar as rodas dianteiras e, depois de um retardo, excitar as rodas traseiras. Esse retardo é função da velocidade do veículo e do comprimento do seu entre-eixos. Dessa forma, a velocidade longitudinal influencia as entradas da pista além dos valores das forças aerodinâmicas.

Utilizando esses dados, um modelo analítico não linear de 4 graus de liberdade é utilizado para calcular a atitude (alturas dos eixos dianteiros e traseiros) do veículo em função da velocidade para a configuração aerodinâmica previamente escolhida<sup>16</sup>. Esse modelo permite configurar o sistema de suspensão em regime permanente para que as alturas dinâmicas se encontrem dentro uma faixa pré-determinada de desempenho ótimo.

Esse mesmo modelo é linearizado para cada valor de velocidade (dentro da faixa previamente escolhida em função do circuito) e são calculados os valores de frequência natural, coeficiente de amortecimento, autovalores e autovetores em função da velocidade. Essa abordagem permite analisar a estabilidade do sistema para cada valor de velocidade longitudinal.

Para cada valor de velocidade, é calculada a inertância, utilizando: a densidade espectral de potência do perfil de uma pista (PSD – que pode ser um perfil artificial ou do próprio circuito), a resposta em frequência da variação da força de contato dos pneus dianteiros e traseiros e o momento de arfagem aerodinâmico.

---

<sup>16</sup> As alturas dos eixos dianteiros e traseiros em função da velocidade são chamadas de *dynamics ride height*. Dessa forma, o veículo em condição estática é configurado com alturas pré-determinadas (*ride height*) e, quando em movimento, essas alturas são modificadas pela ação do carregamento aerodinâmico e das forças de inércia (aceleração longitudinal e lateral). Essas alturas dinâmicas são de extrema importância para saber em que zona do mapa aerodinâmico o veículo está trabalhando, buscando sempre a zona de ótimo. De maneira geral, o engenheiro de pista configura as alturas estáticas, as molas e os batentes de suspensão objetivando determinadas alturas dinâmicas.

A variação das forças de contato é o parâmetro de desempenho para a aderência mecânica, e o momento de arfagem, para a sensibilidade e desempenho aerodinâmico.

A raiz quadrada da integral da inertância (variância probabilística do parâmetro, ou também r.m.s.), para cada valor de velocidade longitudinal, permite o cálculo de um índice de desempenho (ID) em função da velocidade (variância em função da velocidade), criando, dessa maneira, três índices de desempenho para: variação de carga vertical nos pneus dianteiros, variação de carga vertical nos pneus traseiros e momento de arfagem aerodinâmico.

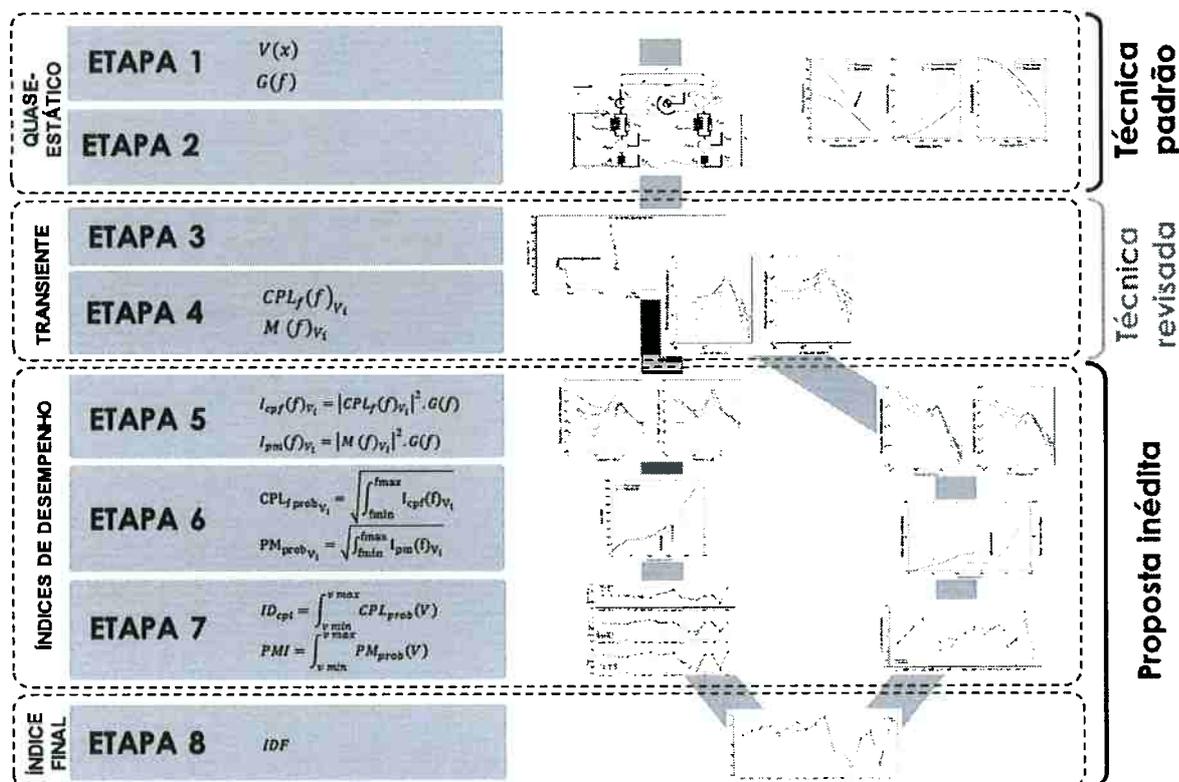
A integral desses índices de desempenho em função da velocidade calcula o índice de desempenho final para a aderência mecânica, e para sensibilidade e desempenho aerodinâmico.

O modelo de carro de 4 graus de liberdade utilizado para os cálculos dos índices de desempenho foi desenvolvido de forma a incluir:

1. Comportamento não linear das forças aerodinâmicas em função da atitude do veículo (altura do solo e arfagem – ver Apêndice A);
2. Inclusão da influência da velocidade de arfagem e de balanço no cálculo das forças aerodinâmicas (modelo aerodinâmico quase-estático);
3. Sistema de suspensão com características não lineares, da mesma forma que é utilizado em pista.

A metodologia foi dividida em 8 etapas. Dessas, as Etapas 1 e 2 descrevem um procedimento padrão adotado pela indústria do esporte motorizado; as Etapas 3 e 4 são procedimentos que já foram realizados de forma similar por outros autores (porém sempre de forma mais limitada do que a utilizada neste trabalho) e as Etapas 5 a 8 são procedimentos inéditos. Os objetivos desta tese, os índices de desempenho de dinâmica vertical, são calculados nas Etapas 6, 7 e 8.

Figura 14 – Etapas da metodologia.



A seguir, são descritas as etapas para o cálculo dos índices de desempenho propostos utilizando a metodologia apresentada na Figura 14.

#### ETAPA 1: Dados do circuito

Velocidade em função do comprimento da pista (explicitando valores de mínimo e máximo, mínima em cada uma das curvas e a média das velocidades mínimas de curva) e a discretização da faixa de velocidade.

PSD do circuito (estimado previamente, ou, se não disponível, utilizar um PSD padrão ISO – escolhendo a classe de irregularidades de acordo com análise subjetiva do circuito).

**ETAPA 2:** Cálculo das alturas dinâmicas do veículo em função da velocidade com modelo em regime permanente e análise da configuração de molas e batentes escolhidos.

**ETAPA 3:** Utilizando os valores de velocidade previamente discretizados na ETAPA 1, o sistema é linearizado (rigidez da suspensão e coeficientes

aerodinâmicos) para cada valor de velocidade. As forças aerodinâmicas são modeladas utilizando a abordagem quase-estática (incluindo parâmetros de rigidez e amortecimento aerodinâmicos). São calculados os autovalores e auto vetores do sistema e é feita a análise de estabilidade do sistema dinâmico.

**ETAPA 4:** São calculadas as funções de transferência do sistema linearizado para cada valor de velocidade previamente discretizada. Essas funções de transferência representam a variação de força de contato entre pneu e solo no eixo dianteiro e traseiro e do momento de aerodinâmico de arfagem.

**ETAPA 5:** Utilizando as funções de transferência e a PSD da pista (real ou artificial), são calculadas as respostas em frequência para cada valor de velocidade, conforme apresentado nas Equações (4) a (6). Nessa etapa, a PSD deve ser transformada do domínio de frequência espacial, para o domínio da frequência temporal.

$$I_{cpf}(f)_{v_i} = |CPL_f(f)_{v_i}|^2 \cdot G(f) \quad (4)$$

$$I_{cpr}(f)_{v_i} = |CPL_r(f)_{v_i}|^2 \cdot G(f) \quad (5)$$

$$I_{pm}(f)_{v_i} = |M_a(f)_{v_i}|^2 \cdot G(f) \quad (6)$$

**ETAPA 6:** São calculadas, utilizando as Equações (7) e (8), as integrais de cada uma das curvas de resposta em frequência da etapa anterior, que simbolizam a variância probabilística de cada um desses fatores. Esses valores são chamados de índices de desempenho.

$$CPL_{prob_{v_i}} = \sqrt{\int_{f_{min}}^{f_{max}} I_{cpf}(f)_{v_i} + \int_{f_{min}}^{f_{max}} I_{cpr}(f)_{v_i}} \quad (7)$$

$$PM_{prob_{v_i}} = \sqrt{\int_{f_{min}}^{f_{max}} I_{pm}(f)_{v_i}} \quad (8)$$

**ETAPA 7:** São calculadas, utilizando as Equações (9) e (10), as integrais dos índices de desempenho previamente calculados em função da velocidade. As velocidades mínima e máxima são definidas pelas características do circuito, conforme analisado na ETAPA 1.

$$ID_{cpl} = \sqrt{\int_{v_{min}}^{v_{max}} CPL_{prob}(V)} \quad (9)$$

$$PMI = \sqrt{\int_{v_{min}}^{v_{max}} PM_{prob}(V)} \quad (10)$$

**ETAPA 8:** Utilizando valores de peso em função da velocidade média das velocidades mínimas em curva do veículo no circuito, os índices de desempenho previamente calculados são utilizados para o cálculo de um índice de desempenho final (IDF), apresentado na Equação (11). O índice relativo à aderência mecânica é proporcional à carga estática do veículo (peso do veículo mais piloto e combustível) no carregamento vertical total (carga estática mais força de sustentação negativa total). Esse carregamento médio é calculado usando a velocidade média das velocidades mínimas em curva. O índice relativo à sensibilidade e desempenho aerodinâmico é proporcional ao carregamento aerodinâmico sobre o carregamento vertical total. É utilizado um valor de ganho ( $G_n$ ) caso se deseje intensificar a aerodinâmica ou a aderência mecânica.

$$IDF = \left[ \left( \frac{F_t - F_a G_n}{F_t} \right)_{v_{med\ das\ curvas}} \left( \int_{v_{min}}^{v_{max}} \frac{CPL_{prob}(V)}{CPL_{prob\ ref}} \right) \right] + \left[ \left( \frac{F_a G_n}{F_t} \right)_{v_{med\ das\ curvas}} \left( \int_{v_{min}}^{v_{max}} \frac{PM_{prob}(V)}{PM_{prob\ ref}} \right) \right] \quad (11)$$

## 5 MODELO ANALÍTICO

*“If you have everything under control, you’re not moving fast enough.”*

(Mario Andretti)

O modelo analítico apresentado foi desenvolvido utilizando inicialmente uma planilha e, posteriormente, o ambiente *Matlab*. Isso se deu porque, inicialmente, era necessária uma ferramenta para uso em campo, com resultados a curto prazo. Posteriormente, o modelo foi transcrito em *Matlab* para o desenvolvimento dos cálculos em resposta em frequência. Dessa forma, foi possível validar o modelo comparando os resultados experimentais medidos em campo com os resultados do modelo desenvolvido na tese.

O modelo de meio carro é um modelo clássico utilizado para o estudo de dinâmica vertical (GILLESPIE, 1992; MITSCHKE; WALLENTOWITZ, 2004). Ele possui quatro graus de liberdade: deslocamento vertical e angular da massa suspensa (movimentos de balanço e arfagem) e os deslocamentos verticais da massa não suspensa dianteira e traseira (modos de massa não suspensa dianteiro e traseiro). Esse modelo foi escolhido para o desenvolvimento da tese por poder representar de forma realista os fenômenos de dinâmica vertical envolvidos: dois modos acoplados de massa suspensa, elementos elásticos e forças aerodinâmicas não lineares. Ele é uma evolução do modelo clássico, por incorporar as forças aerodinâmicas e um modelo não linear de suspensão<sup>17</sup>.

As forças aerodinâmicas e as molas foram tratadas como forças não lineares por conta do efeito solo. A sustentação negativa aumenta com a velocidade e quando um aerofólio ou um difusor aumenta a sua proximidade com o solo. O segundo efeito acontece basicamente devido à interferência do solo com os vórtices de ponta de asa (KATZ, 1995). Dessa forma, com o aumento progressivo da velocidade, a força de sustentação negativa aumenta de forma quadrática, comprimindo progressivamente o sistema de suspensão e diminuindo a altura do veículo com o solo.

---

<sup>17</sup> O modelo utilizado tem a finalidade de avaliar o índice de desempenho proposto, modelos mais complexos são utilizados na indústria, porém não são convenientes para esta tese devido ao custo computacional e à necessidade de programas comerciais de código fonte fechado.

No modelo apresentado, as forças aerodinâmicas foram divididas em força de sustentação negativa ( $F_a$ ) e momento de arfagem ( $M_a$ ), sendo a origem do sistema de coordenadas das forças aerodinâmicas o centro do eixo dianteiro. Tanto a força quanto o momento foram tratados como funções não lineares, apresentadas nas Equações (12) e (13).

$$M_a = f(\varphi, \dot{\varphi}, z, \dot{z}) \quad (12)$$

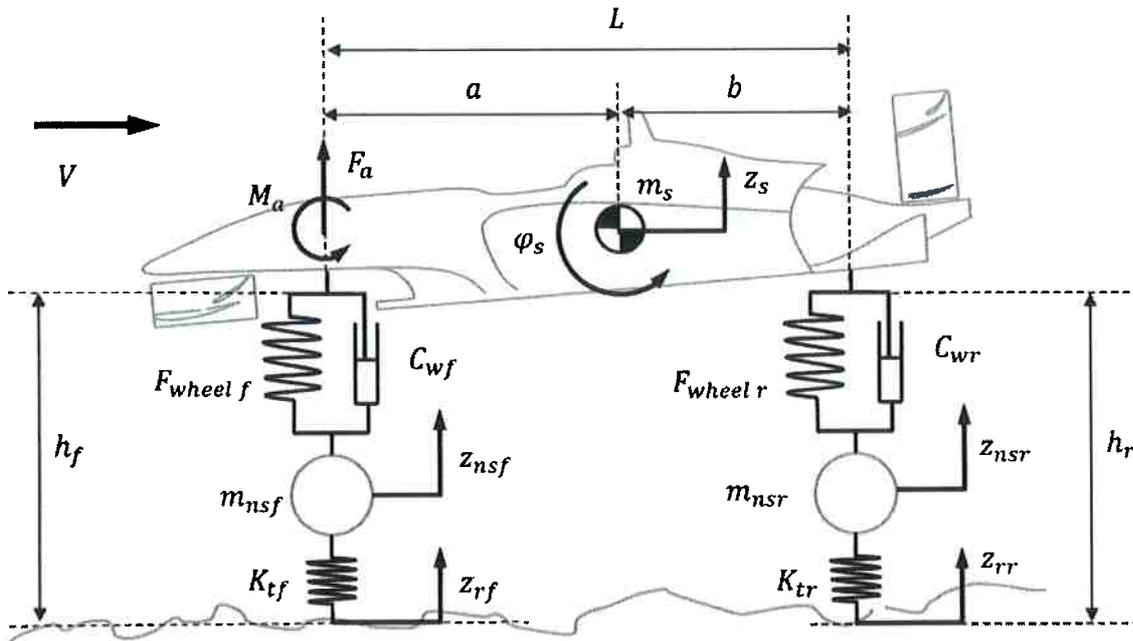
$$F_a = f(\varphi, \dot{\varphi}, z, \dot{z}) \quad (13)$$

Com o intuito de manter o veículo em baixa altura mesmo em movimento, as molas do sistema de suspensão devem ser rígidas; para suportar o aumento quadrático da força de sustentação negativa, batentes de suspensão são acoplados às molas de forma a aumentar significativamente a rigidez do sistema, chegando em alguns casos a impedir qualquer deslocamento do sistema de suspensão. As forças das molas mais batentes, por serem não lineares, foram substituídas por uma função (positiva no mesmo sentido da força aerodinâmica) conforme apresentado na Equação (14):

$$F_{wheel\ i} = f(\varphi, z, z_{ns\ i}) \quad (14)$$

Na Figura 15, são apresentados os graus de liberdade e as variáveis de estado. As Equações (15) a (18) representam as equações de movimento da massa suspensa, nos graus de liberdade de arfagem e balanço, e dos graus de liberdade das massas não suspensas, respectivamente.

Figura 15 - Modelo de meio carro.



As equações apresentadas a seguir representam o movimento do sistema para os graus de liberdade de: arfagem, deslocamento vertical da massa suspensa e deslocamento vertical da massa não suspensa dianteira e traseira.

$$I_y \ddot{\phi}_{ns} = M_a - aF_a - F_{wheel\ f}a + F_{wheel\ r}b + c_{wf}(\dot{z}_s - \dot{\phi}_s a - \dot{z}_{nsf})a + c_{wr}(\dot{z}_{nsr} - \dot{z}_s - \dot{\phi}_s b)b \quad (15)$$

$$m_s \ddot{z}_s = F_a + F_{wheel\ f} + F_{wheel\ r} + c_{wf}(-\dot{z}_s + \dot{\phi}_s a + \dot{z}_{nsf}) + c_{wr}(\dot{z}_{nsr} - \dot{z}_s - \dot{\phi}_s b) \quad (16)$$

$$m_{nsf} \ddot{z}_{nsf} = F_{wheel\ f} + c_{wf}(\dot{z}_s - \dot{\phi}_s a - \dot{z}_{nsf}) + k_{tf}(z_{rf} - z_{nsf}) \quad (17)$$

$$m_{nsr} \ddot{z}_{nsr} = F_{wheel\ r} + c_{wr}(-\dot{z}_{nsr} + \dot{z}_s + \dot{\phi}_s b) + k_{tr}(z_{rr} - z_{nsr}) \quad (18)$$

As Equações (19) e (20) representam o atraso da entrada no sistema entre as rodas dianteiras e traseiras. Esse atraso no domínio do tempo é função da velocidade longitudinal e do comprimento do entre-eixos.

$$z_{rr}(t) = z_{rf}(t - \tau) \quad (19)$$

$$\tau = \frac{L}{V} \quad (20)$$

A Força de contato entre o pneu e o solo pode ser calculada utilizando a rigidez do pneu e o deslocamento relativo entre a massa não suspensa e a entrada da pista, conforme apresentado nas Equações (21) e (22).

$$F_{cf} = k_{tf}(z_{rf} - z_{nsf}) \quad (21)$$

$$F_{cr} = k_{tr}(z_{rr} - z_{nsr}) \quad (22)$$

## 5.1 FORÇAS AERODINÂMICAS

O modelo de forças aerodinâmicas utilizado é fruto de uma vasta pesquisa com dados experimentais de veículos de competição, presente no Apêndice A. O cálculo das forças é apresentado nas Equações (23) e (24).

$$F_a = \frac{1}{2} \rho S C_z V^2 = p S C_z \quad (23)$$

$$M_a = \frac{1}{2} \rho S C_m L V^2 = p L S C_m \quad (24)$$

Os coeficientes aerodinâmicos são calculados em função da altura dos eixos dianteiros e traseiros, utilizando os mapas aerodinâmicos previamente calculados para a configuração aerodinâmica do veículo. As Equações (25) a (27) a seguir apresentam o modelo utilizado de acordo com a análise de dados feita no Apêndice A.

$$C_z = C_{z0} + \frac{\partial C_z}{\partial h_f} h_f + \frac{\partial C_z}{\partial h_r} h_r + \frac{\partial^2 C_z}{\partial h_f^2} h_f^2 + \frac{\partial^2 C_z}{\partial h_r^2} h_r^2 + \frac{\partial^2 C_z}{\partial h_f \partial h_r} h_f h_r \quad (25)$$

$$C_m = C_{m0} + \frac{\partial C_m}{\partial h_f} h_f + \frac{\partial C_m}{\partial h_r} h_r + \frac{\partial^2 C_m}{\partial h_f^2} h_f^2 + \frac{\partial^2 C_m}{\partial h_r^2} h_r^2 + \frac{\partial^2 C_m}{\partial h_f \partial h_r} h_f h_r \quad (26)$$

$$AB = AB_0 + \frac{\partial AB}{\partial h_f} h_f + \frac{\partial AB}{\partial h_r} h_r + \frac{\partial^2 AB}{\partial h_f^2} h_f^2 + \frac{\partial^2 AB}{\partial h_r^2} h_r^2 + \frac{\partial^2 AB}{\partial h_f \partial h_r} h_f h_r = \left(1 + \frac{C_m}{C_z}\right) \cdot 100 \quad (27)$$

Conforme apresentado acima, o momento de arfagem utilizado é função do balanço aerodinâmico e do coeficiente de sustentação negativa. De maneira geral, o coeficiente de momento de arfagem não é utilizado pela indústria do esporte motorizado. Os fabricantes fornecem o balanço aerodinâmico, que representa a porcentagem total do carregamento aerodinâmico no eixo dianteiro, ou um coeficiente de sustentação negativa para o eixo dianteiro e para o eixo traseiro. O balanço aerodinâmico é muito útil para análises quase-estáticas, sendo comparado com a distribuição estática de peso do veículo no eixo dianteiro para se ter uma estimativa da estabilidade da dirigibilidade esperada em altas velocidades (se maior que a distribuição estática, espera-se comportamento sobreesterçante; se menor, sobesterçante). Porém, para a análise realizada neste trabalho, ele não é o principal parâmetro. Tanto o coeficiente de sustentação negativa quanto o balanço aerodinâmico mudam com a atitude do veículo e a força e momento aumentam em função da velocidade. Entretanto, pode haver situações em que o balanço aerodinâmico tem tendência instável, mas a sustentação negativa diminui, o que implica uma condição que não necessariamente é instável porque o momento de

arfagem pode ser constante. O momento de arfagem é calculado utilizando ambos os parâmetros, sendo assim, é mais preciso na análise de estabilidade, da mesma forma que em modelos de aeronaves (ETKIN, 2005).

As equações do modelo aerodinâmico devem trocar as variáveis de altura dos eixos dianteiro e traseiro pelas variáveis de estado do modelo: deslocamento vertical e ângulo de arfagem da massa suspensa, assim como trocar o sistema de coordenadas para o das equações de movimento, conforme apresentado nas Equações (28) a (29).

$$z = h_f \quad (28)$$

$$\varphi = \frac{h_r - h_f}{L} \quad (29)$$

Aplicando o novo sistema de coordenadas nas equações (30) e (31), temos:

$$C_z = C_{z0} + \frac{\partial C_z}{\partial z} z + \frac{\partial C_z}{\partial \varphi} \varphi + \frac{\partial^2 C_z}{\partial z^2} z^2 + \frac{\partial^2 C_z}{\partial \varphi^2} \varphi^2 + \frac{\partial^2 C_z}{\partial z \partial \varphi} z \varphi \quad (30)$$

$$C_m = C_{m0} + \frac{\partial C_m}{\partial z} z + \frac{\partial C_m}{\partial \varphi} \varphi + \frac{\partial^2 C_m}{\partial z^2} z^2 + \frac{\partial^2 C_m}{\partial \varphi^2} \varphi^2 + \frac{\partial^2 C_m}{\partial z \partial \varphi} z \varphi \quad (31)$$

Após a conversão no sistema de coordenadas do modelo, as equações devem ser linearizadas para cada valor de velocidade longitudinal em que se deseja calcular a resposta em frequência. Para um valor de velocidade longitudinal fixa, a atitude da massa suspensa é fixa (posição vertical e ângulo de arfagem) e, conseqüentemente, se pode linearizar as Equações (30) e (31) em função dessas variáveis de estado, que possuem conexão direta com o valor de velocidade longitudinal. As equações (32) e (33) apresentam o coeficiente linearizado para arfagem e deslocamento vertical e as equações (35) a (37) apresentam as derivadas linearizadas para arfagem e deslocamento vertical, calculadas de forma analítica a partir das equações (36) e (37).

$$C_{z(v)} = C_{z \text{ base}} + \frac{\partial C_z}{\partial \varphi (v)} \varphi + \frac{\partial C_z}{\partial z (v)} z \quad (32)$$

$$C_{m(v)} = C_{m \text{ base}} + \frac{\partial C_m}{\partial \varphi (v)} \varphi + \frac{\partial C_m}{\partial z (v)} z \quad (33)$$

$$\frac{\partial C_z}{\partial \varphi (v)} = \frac{\partial C_z}{\partial \varphi} + 2 \frac{\partial^2 C_z}{\partial \varphi^2} \varphi + \frac{\partial^2 C_z}{\partial z \partial \varphi} z \quad (34)$$

$$\frac{\partial C_z}{\partial z (v)} = \frac{\partial C_z}{\partial z} + 2 \frac{\partial^2 C_z}{\partial z^2} z + \frac{\partial^2 C_z}{\partial z \partial \varphi} \varphi \quad (35)$$

$$\frac{\partial C_m}{\partial \varphi (v)} = \frac{\partial C_m}{\partial \varphi} + 2 \frac{\partial^2 C_m}{\partial \varphi^2} \varphi + \frac{\partial^2 C_m}{\partial z \partial \varphi} z \quad (36)$$

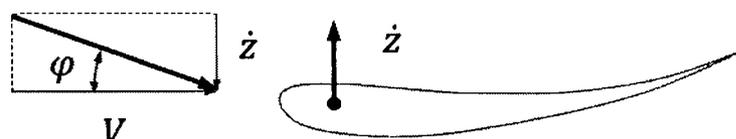
$$\frac{\partial C_m}{\partial z (v)} = \frac{\partial C_m}{\partial z} + 2 \frac{\partial^2 C_m}{\partial z^2} z + \frac{\partial^2 C_m}{\partial z \partial \varphi} \varphi \quad (37)$$

Para incluir a resposta transiente das forças aerodinâmicas, a abordagem utilizada segue trabalhos publicados sobre a aerodinâmica de aerofólios em regime transiente usados em veículos de competição (MOLINA et al., 2011). Esses trabalhos atuais mostram o mesmo comportamento teorizado nos anos 30 (THEODORSEN, 1935) e sugerem a existência de três fenômenos importantes na aerodinâmica transiente de aerofólios submetidos ao efeito solo: altura do solo, ângulo de ataque induzido e efeito da massa adicional.

Altura do solo: no caso do modelo utilizado, ela é representada pela variação de forças aerodinâmicas com a altura do assoalho da massa suspensa. Esse efeito é representado de forma não linear em regime quase-estático pelas equações (30) e (31) e de forma linearizada pelas equações (32) e (33). Esse efeito pode ser considerado como rigidez aerodinâmica.

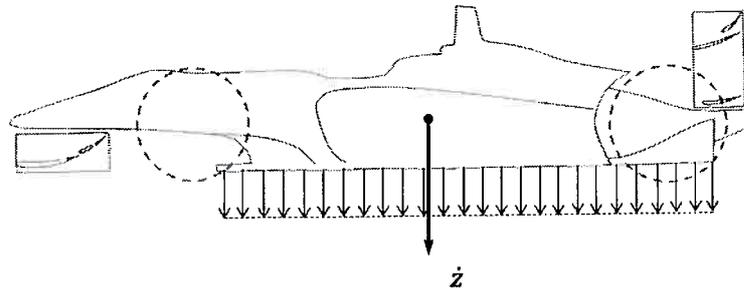
Ângulo de ataque induzido: efeito da velocidade de oscilação da massa suspensa no ângulo de ataque da carroceria. A velocidade incidente no veículo é resultado da velocidade longitudinal somada vetorialmente com a velocidade de oscilação vertical, conforme apresentado na Figura 16. Esse efeito gera um ângulo de ataque induzido que é função da velocidade de oscilação.

Figura 16 - Modelo didático do ângulo de ataque induzido.



Efeito da massa adicional: a massa de ar deslocada com a oscilação da massa suspensa cria um efeito de inércia (proporcional à aceleração), ilustrado na Figura 17. Esse efeito não será utilizado por afetar oscilações de alta frequência e, no caso do modelo proposto, a faixa de frequência a ser estudada é de 0Hz a 60 Hz.

Figura 17 - Modelo didático do efeito de massa adicional.



Para confirmar que o efeito não precisa ser incluído no modelo, uma estimativa da força aerodinâmica proporcional à aceleração foi calculada utilizando a Equação (38) (MOLINA et al., 2011).

$$F_{a\ mass}(t) = \rho \vartheta \frac{d^2 z}{dt^2} \quad (38)$$

O valor máximo da equação (38) é representado na Equação (39).

$$F_{a\ mass\ max} = \rho \vartheta z_{max} (2\pi f)^2 \quad (39)$$

Estimando o valor da área do assoalho (DALLARA, 2012b) (3.5 m<sup>2</sup>) e a amplitude máxima de deslocamento (10 mm), o valor da força máxima pode ser calculado em função da frequência de oscilação, conforme apresentado na Equação (40).

$$F_{a\ mass\ max} = 1.2 \times 3.5 \times 0.01 (2\pi f)^2 \quad (40)$$

Nesse caso, quando a oscilação atinge 60Hz, a força induzida pelo efeito de massa adicional é de 60 N. Como o efeito da massa adicional é proporcional ao quadrado da frequência de excitação, ele se torna significativo em valores elevados de frequência. Dessa forma, o efeito da massa adicional pode ser desconsiderado no modelo estudado.

Assim, somente os efeitos da altura do solo e do ângulo de ataque induzido serão empregados no modelo. Utilizando a abordagem de ângulo de ataque quase-estático, o ângulo de arfagem e a oscilação vertical da massa suspensa utilizados no cálculo das forças aerodinâmicas em regime transiente são apresentados nas Equações (41) e (42).

$$\varphi = \varphi_s - \dot{\varphi}_s \frac{L}{V} + \frac{\dot{z}_s}{V} \quad (41)$$

$$z = z_s - \varphi_s \cdot a \quad (42)$$

Substituindo as Equações (41) e (42) pelas equações (32) e (33), são calculados os coeficientes aerodinâmicos com o ângulo de ataque quase-estático, resultando nas Equações (43) e (44).

$$C_{z(v)} = C_{z\ base} + \frac{\partial C_z}{\partial \varphi(v)} \left( \varphi_s - \dot{\varphi}_s \frac{L}{V} + \frac{\dot{z}_s}{V} \right) + \frac{\partial C_z}{\partial z(v)} (z_s - \varphi_s \cdot a) \quad (43)$$

$$C_{m(v)} = C_{m\ base} + \frac{\partial C_m}{\partial \varphi(v)} \left( \varphi_s - \dot{\varphi}_s \frac{L}{V} + \frac{\dot{z}_s}{V} \right) + \frac{\partial C_m}{\partial z(v)} (z_s - \varphi_s \cdot a) \quad (44)$$

As Equações (45) e (46) apresentam as variáveis de estado isoladas, obtendo assim os termos que podem ser interpretados como rigidez e amortecimento aerodinâmico.

$$C_{z(v)} = C_{z\ 0} + \left( -\frac{\partial C_z}{\partial z(v)} \cdot a + \frac{\partial C_z}{\partial \varphi(v)} \right) \varphi_s + \left( -\frac{\partial C_z}{\partial \varphi(v)} \frac{L}{V} \right) \dot{\varphi}_s + \left( \frac{\partial C_z}{\partial z(v)} \right) z_s + \left( \frac{\partial C_z}{\partial \varphi(v)} \frac{1}{V} \right) \dot{z}_s \quad (45)$$

$$C_{m(v)} = C_{m\ 0} + \left( -\frac{\partial C_m}{\partial z(v)} \cdot a + \frac{\partial C_m}{\partial \varphi(v)} \right) \varphi_s + \left( -\frac{\partial C_m}{\partial \varphi(v)} \frac{L}{V} \right) \dot{\varphi}_s + \left( \frac{\partial C_m}{\partial z(v)} \right) z_s + \left( \frac{\partial C_m}{\partial \varphi(v)} \frac{1}{V} \right) \dot{z}_s \quad (46)$$

Utilizando as Equações (45) e (46), é possível isolar as forças aerodinâmicas que representam a força elástica aerodinâmica – Equações (47) e (48). Devido à não linearidade dos fatores, é possível que alguns parâmetros assumam valores negativos, o que implica um sistema retroalimentado.

$$F_{a\ elástica(v)} = \frac{1}{2} \rho V^2 \left( \left( -\frac{\partial C_z}{\partial z(v)} \cdot a + \frac{\partial C_z}{\partial \varphi(v)} \right) \varphi_s + \left( \frac{\partial C_z}{\partial z(v)} \right) z_s \right) \quad (47)$$

$$M_{a\ elástica(v)} = \frac{1}{2} \rho V^2 L \left( \left( -\frac{\partial C_m}{\partial z(v)} \cdot a + \frac{\partial C_m}{\partial \varphi(v)} \right) \varphi_s + \left( \frac{\partial C_m}{\partial z(v)} \right) z_s \right) \quad (48)$$

A força de amortecimento aerodinâmico pode ser isolada nas Equações (49) e (50).

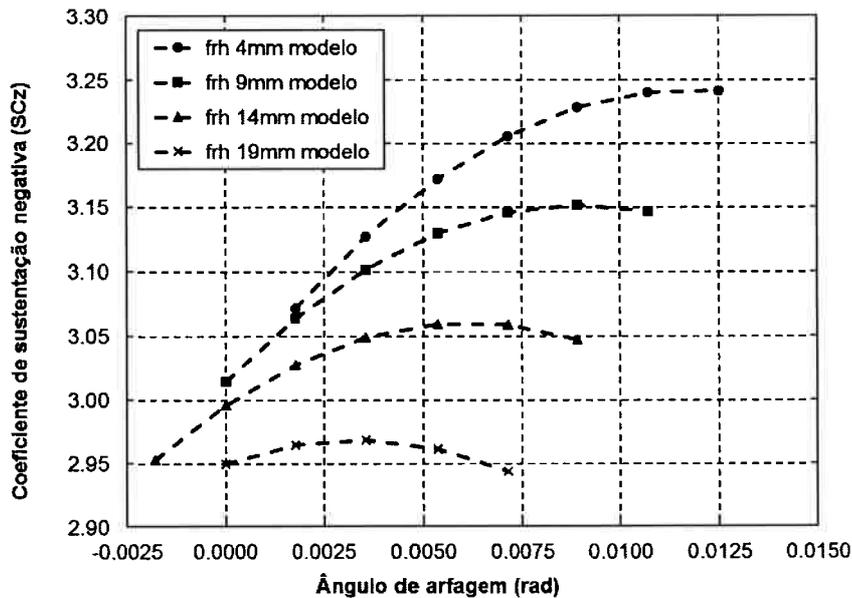
$$F_{a\ amortecimento(v)} = \frac{1}{2} \rho V \left( \left( \frac{\partial C_z}{\partial \varphi(v)} \cdot L \right) \dot{\varphi}_s + \left( \frac{\partial C_z}{\partial \varphi(v)} \right) \dot{z}_s \right) \quad (49)$$

$$M_{a\ amortecimento(v)} = \frac{1}{2} \rho V L \left( \left( -\frac{\partial C_m}{\partial \varphi(v)} \cdot L \right) \dot{\varphi}_s + \left( \frac{\partial C_m}{\partial \varphi(v)} \right) \dot{z}_s \right) \quad (50)$$

Para demonstrar a importância das não linearidades dos coeficientes aerodinâmicos, a seguir são apresentadas as variações dos coeficientes com o ângulo de arfagem e o deslocamento vertical da carroceria, ressaltando a importância da inclusão das não linearidades no modelo.

A Figura 18 a seguir apresenta as curvas de um mapa aerodinâmico em função do ângulo de arfagem da carroceria para os coeficientes de sustentação negativa de momento de arfagem. Nela, é possível analisar como varia a derivada em função do ângulo de arfagem.

Figura 18 - Sustentação negativa em função do ângulo de arfagem.

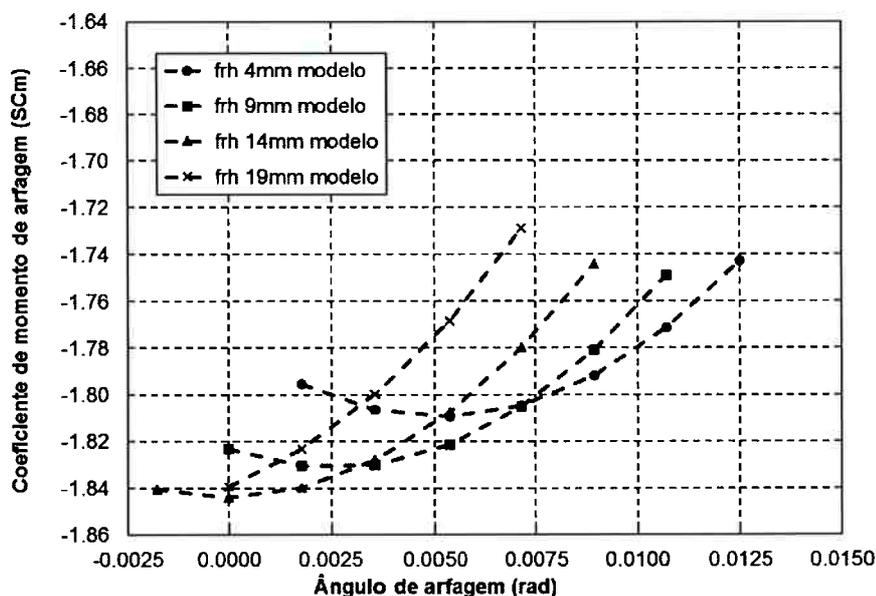


Existe um ponto de máxima sustentação negativa em função do ângulo de arfagem, que aparece mudando-se o valor da derivada com o aumento do ângulo de arfagem da carroceria. Essa mudança de sinal afeta as Equações (47) e (49).

A mesma análise foi feita na Figura 19; nela existe um ponto de mínimo para o coeficiente de momento de arfagem. Antes dele, a derivada é negativa e após é positiva. Essa variação também afeta as Equações (48) e (50).

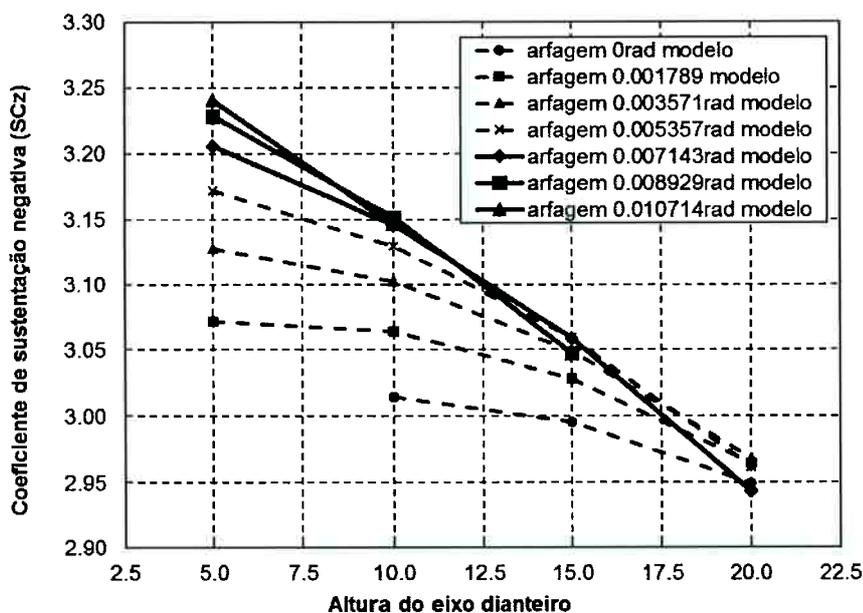
Como ambas variações acontecem simultaneamente, as Equações (47) a (50) são afetadas simultaneamente. Dependendo do valor dessas derivadas, elas mudam o comportamento dinâmico do sistema.

Figura 19 - Momento de arfagem em função do ângulo de arfagem.



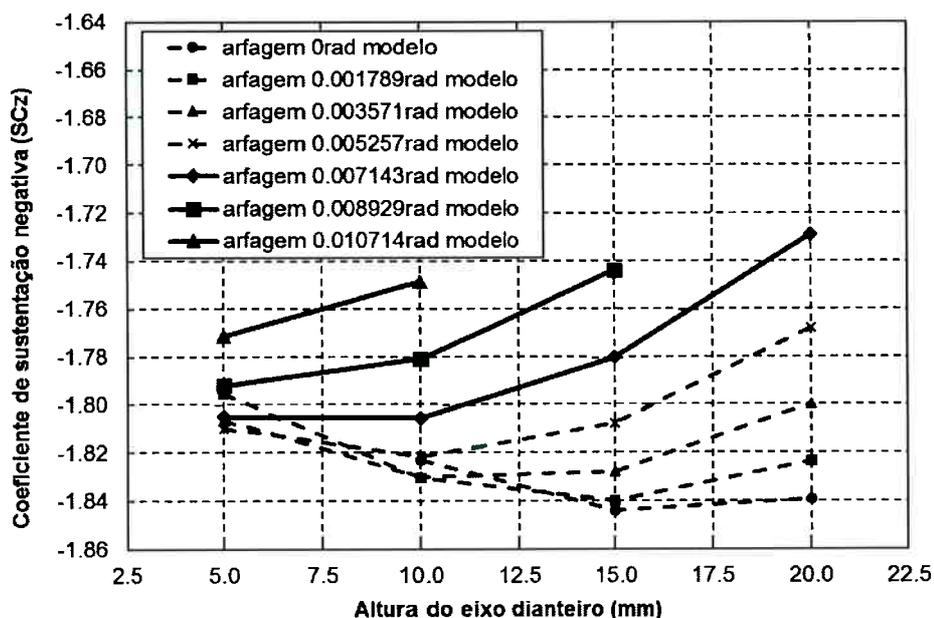
A mesma abordagem foi feita nas Figuras 20 e 21 para a análise da derivada em função da altura do eixo dianteiro, mantendo o ângulo de ataque constante para cada uma das curvas.

Figura 20 - Sustentação negativa em função da altura do eixo dianteiro.



De maneira distinta das duas derivadas apresentadas anteriormente, a derivada da sustentação negativa em função da altura do eixo dianteiro não muda o sinal, somente muda a intensidade.

Figura 21 - Momento de arfagem em função da altura do eixo dianteiro.



A derivada do momento de arfagem em função da altura do eixo dianteiro possui valor mínimo, que muda conforme o ângulo de arfagem da carroceria. Antes desse valor, a derivada é negativa e após, positiva.

## 5.2 FORÇAS DO SISTEMA DE SUSPENSÃO

O sistema de suspensão foi modelado utilizando a rigidez das molas, incorporando a razão de instalação do mecanismo. A razão de instalação do mecanismo foi considerada linear, baseada nos dados do Apêndice D. A Equação (51) apresenta o cálculo da razão de instalação e as Equações (52) e (53) apresentam a relação entre a compressão do sistema de suspensão e o deslocamento vertical da massa não suspensa.

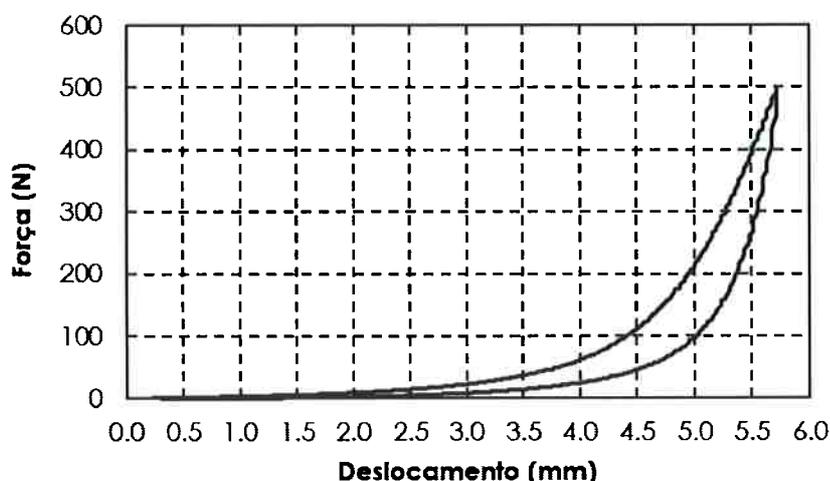
$$F_{wheel} = \frac{F_{spring}}{MR} \quad (51)$$

$$x_{wheel f} = x_{spring f} MR = (-z_s + \varphi_s a + z_{nsf}) MR \quad (52)$$

$$x_{wheel r} = x_{spring f} MR = (z_{nsr} - z_s - \varphi_s b) MR \quad (53)$$

De maneira a incluir os efeitos do batente de suspensão, a sua curva de força em função do deslocamento deve ser acoplada à curva da mola (essa, geralmente linear). A caracterização dos batentes de suspensão utilizados neste trabalho foi realizada de forma experimental, conforme apresentado no Apêndice C. A Figura 22 apresenta a curva de força por deslocamento do batente utilizado no sistema de suspensão modelado.

Figura 22 - Força em função do deslocamento de um batente de suspensão.

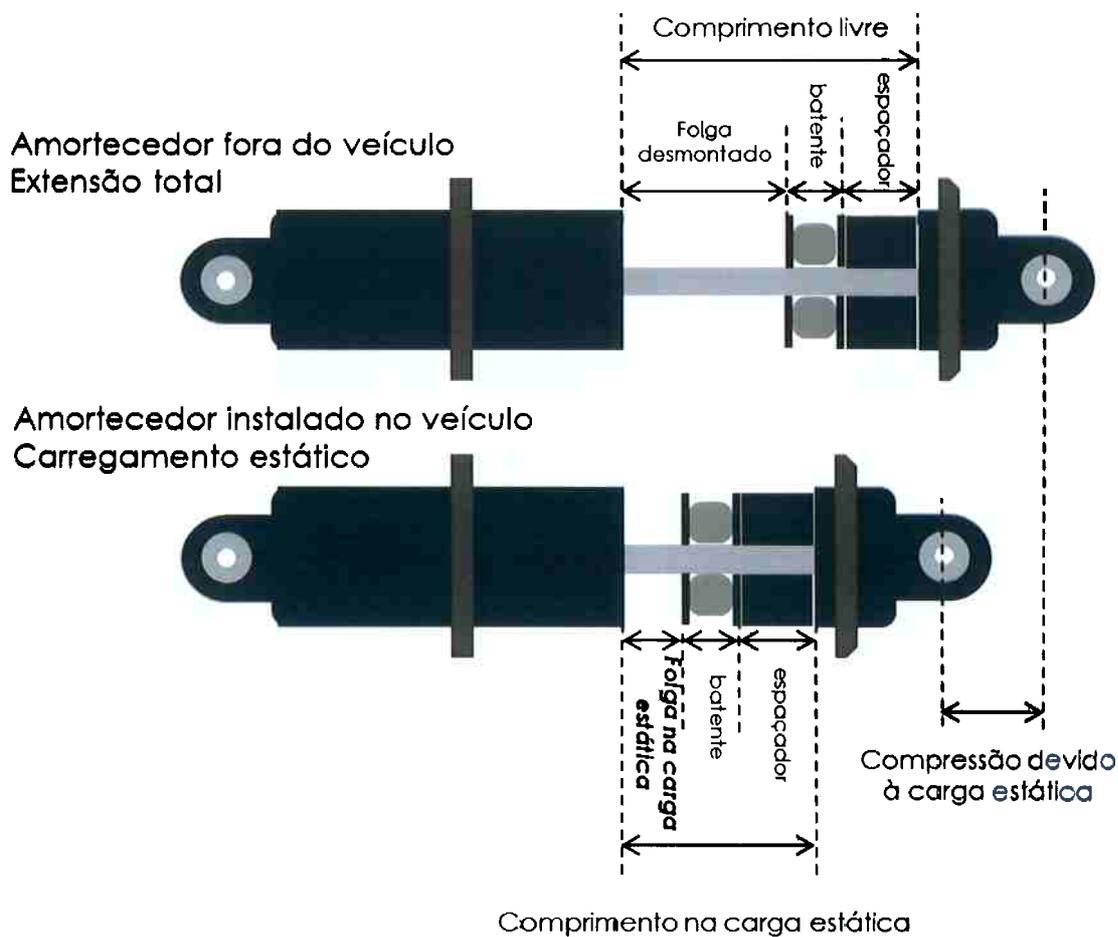


O batente de suspensão começa a trabalhar após uma compressão pré-definida do sistema de suspensão. Normalmente, os veículos de competição, incluindo o veículo utilizado neste trabalho, apresentam sistemas de suspensão do tipo *push rod*<sup>18</sup>, com a mola instalada no corpo do amortecedor (deslocamento da mola é igual ao deslocamento do amortecedor), conectadas com a massa não suspensa através de um sistema de balanceiro e uma barra de compressão (o mecanismo detalhado é apresentado no Apêndice D). Esse curso de compressão é chamado folga<sup>19</sup>; ela é escolhida na configuração do veículo, podendo ser inclusive negativa (interferência). A Figura 23 a seguir ilustra um amortecedor em situação de extensão total e de compressão estática (compressão devida ao peso próprio do veículo, mais piloto mais combustível).

<sup>18</sup> A tradução literal do termo *push-rod*, barra de compressão, não é suficiente para descrever o tipo da suspensão e por ser um termo utilizado em diversas línguas estrangeiras sem tradução (Espanhol, Italiano, por exemplo), nesse caso, não foi traduzido pelo autor.

<sup>19</sup> Tradução do autor para o termo utilizado pela indústria do esporte motorizado como *gap*.

Figura 23 - Folga do batente de suspensão.



Com os dados experimentais do batente, foi criada uma tabela que relaciona os valores de deslocamento e força, utilizada no modelo como uma *lookuptable*. A rigidez do batente foi calculada com os dados experimentais e também utilizada no formato *lookuptable* no modelo de suspensão linearizado.

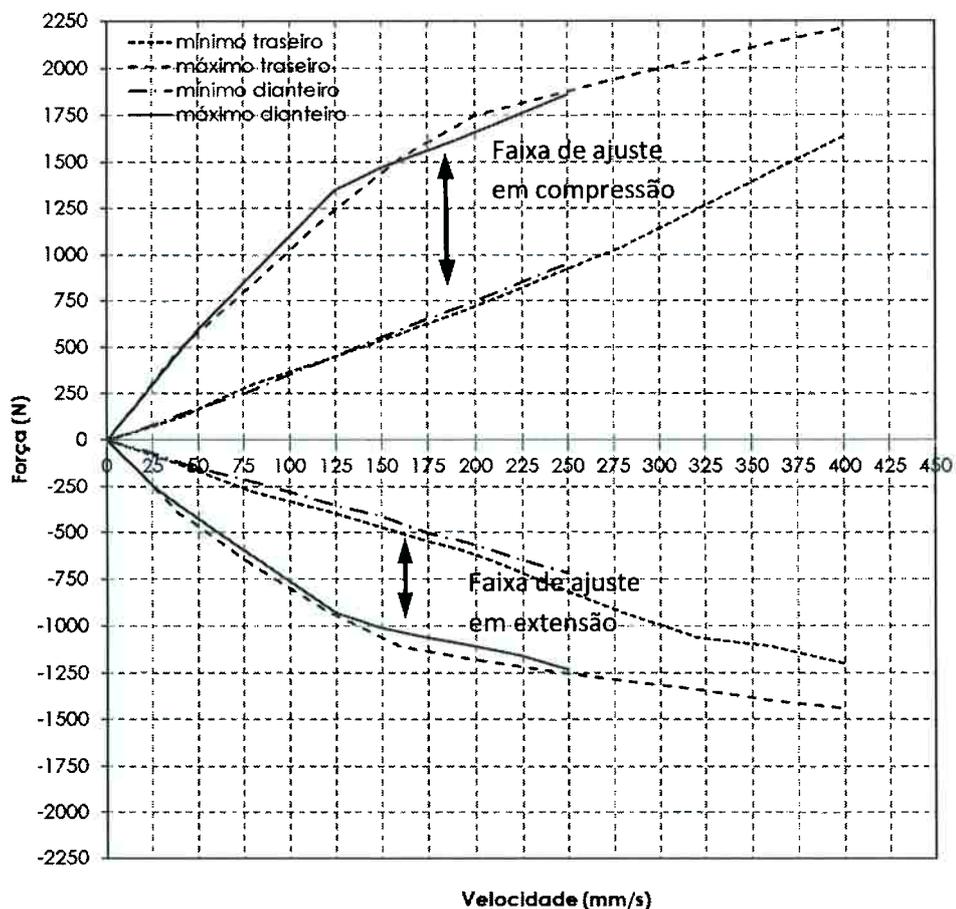
Para a correta representação da altura do veículo, os efeitos da velocidade no raio do pneu devem ser incorporados ao modelo. De acordo com o fabricante do pneu, seu raio aumenta de forma não linear com o aumento da velocidade. Esse fenômeno físico acontece devido ao efeito centrífugo. O fabricante disponibiliza essas curvas (raio de rolagem em função da velocidade), que são medidas com o intuito de corrigir os cálculos de altura dinâmica do veículo. As equações (54) e (55), apresentadas a seguir, representam o efeito da variação do raio dos pneus com o aumento da velocidade.

$$\Delta r_f = 0,00004V^2 + 0,0059V \quad (54)$$

$$\Delta r_r = 0,00005V^2 + 0,0055V \quad (55)$$

O amortecedor foi modelado como uma função linear entre força e velocidade. A Figura 24 a seguir apresenta os valores máximo e mínimo das curvas de compressão (valores positivos) e extensão (valores negativos) dos amortecedores dianteiros (linhas sólidas e tracejado com ponto) e traseiros (linhas tracejadas longas e curtas). Apesar da curva poder ser não linear (de acordo com a configuração escolhida), a utilização de uma curva não linear iria mudar o procedimento de cálculo, pois o cálculo da resposta não poderia ser feito de forma direta com a matriz de espaço de estados (sistema linear). Nesse caso, seria necessário criar uma entrada temporal, possivelmente uma senóide, que varra a faixa de frequência de interesse (como a utilizada no teste experimental do *4 post rig*) e, posteriormente, a resposta temporal poderia ser convertida no domínio da frequência. Do ponto de vista de desempenho, a não linearidade dos amortecedores é secundária em comparação às não linearidades de rigidez e aerodinâmica. Dessa forma, optou-se por utilizar um modelo linear de amortecedor.

Figura 24 - Faixa de configuração das curvas dos amortecedores.



Os efeitos de histerese do batente não foram incluídos no modelo. Eles são mais um dos efeitos não lineares que afetam a dinâmica do sistema, porém sua magnitude é menor do que a dissipação de energia dos amortecedores e, neste trabalho, eles podem ser desconsiderados<sup>20</sup>.

Em um dos trabalhos experimentais realizados pelo autor no *4 post rig* para a caracterização de um veículo e a otimização da configuração do sistema de suspensão, foi encontrado elevado grau de histerese no sistema de suspensão dianteira. Esse fator impossibilitou o trabalho de otimização, porém gerou um estudo sobre a influência da histerese na dinâmica vertical de veículos de competição (BENINI et al., 2017). De maneira geral, a histerese pode ser causada não somente por elementos como o batente, mas também pelas articulações do sistema de suspensão e direção, que em veículos de corrida são juntas cinemáticas (terminais esféricos) ao invés de buchas de elastômero como nos carros de passeio. Esses terminais apresentam elevado valor de atrito quando são novos. De acordo com o uso, ocorre um assentamento e a histerese diminui radicalmente. Algumas equipes inclusive usam equipamentos como o torno mecânico ou furadeiras manuais para fazer um pré-assentamento desses batentes antes de utilizá-los nos veículos. O veículo ensaiado ainda não havia sido utilizado em pista, pois havia saído recentemente do fabricante. O Apêndice B apresenta detalhes do ensaio do *4 post rig* desse veículo em específico.

### 5.3 EQUAÇÕES NO ESPAÇO DE ESTADO

A linearização do sistema de equações diferenciais não lineares apresentado nas Equações (15) a (18) e a conversão de um sistema de segunda ordem em um sistema de primeira ordem permitiu a montagem do sistema no espaço de estados, apresentado nas Equações (56) e (57). A entrada em retardo nos pneus traseiros é mostrada no último termo das mesmas equações.

$$\dot{x} = Ax + B_1u(t) + B_2u(t - \tau) \quad (56)$$

---

<sup>20</sup> Existem modelos de batentes de suspensão de alta histerese (SMACBUMP), porém o autor sempre trabalhou com modelos de baixa histerese, de forma que o amortecimento do sistema seja determinado pelos amortecedores. A utilização de batentes de alta histerese exige que ela seja corretamente modelada, porém não é o caso da configuração do veículo escolhida.

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_s \\ \dot{\alpha}_s \\ \dot{z}_{nsf} \\ \dot{z}_{nsr} \\ \dot{v}_s \\ \dot{\omega}_s \\ \dot{v}_{nsf} \\ \dot{v}_{nsr} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \cdot \begin{bmatrix} z_s \\ \alpha_s \\ z_{nsf} \\ z_{nsr} \\ v_s \\ \omega_s \\ v_{nsf} \\ v_{nsr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot u(t - \tau) \quad (57)$$

A matriz  $\mathbf{A}$  desse sistema é apresentada na Equação (58) e foi utilizada para o cálculo dos autovalores e autovetores.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{51} & a_{52} & \frac{K_f}{m_s} & \frac{K_r}{m_s} & a_{55} & a_{56} & \frac{C_f}{m_s} & \frac{C_r}{m_s} \\ a_{61} & a_{62} & -\frac{K_f a}{I_y} & \frac{K_r b}{I_y} & a_{65} & a_{66} & -\frac{C_f a}{I_y} & \frac{C_r a}{I_y} \\ \frac{K_f}{m_{nsf}} & -\frac{K_f a}{m_{nsf}} & \frac{-K_f - K_{tf}}{m_{nsf}} & 0 & \frac{C_f}{m_{nsf}} & -\frac{C_f a}{m_{nsf}} & \frac{-C_f - C_{tf}}{m_{nsf}} & 0 \\ \frac{K_r}{m_{nsr}} & -\frac{K_r b}{m_{nsr}} & 0 & \frac{-K_r - K_{tr}}{m_{nsr}} & \frac{C_r}{m_{nsr}} & \frac{C_r b}{m_{nsr}} & 0 & \frac{-C_r - C_{tr}}{m_{nsr}} \end{bmatrix} \quad (58)$$

As Equações (59) a (62) apresentam os termos da matriz  $\mathbf{A}$  que são influenciados pelo comportamento aerodinâmico em relação à oscilação vertical da massa suspensa.

$$a_{51} = \frac{-p \frac{\partial C_z}{\partial z(v)} - K_f - K_r}{m_s} \quad (59)$$

$$a_{52} = \frac{-p \left( \frac{\partial C_z}{\partial \varphi(v)} \frac{\partial C_z}{\partial z(v)} a \right) + K_f a - K_r b}{m_s} \quad (60)$$

$$a_{55} = \frac{-p \frac{\partial C_z}{\partial \varphi(v)} \frac{1}{V_i} C_f - C_r}{m_s} \quad (61)$$

$$a_{56} = \frac{-p \frac{\partial C_z}{\partial \varphi(v)} \frac{L}{V_i} + C_f a - C_r b}{m_s} \quad (62)$$

As Equações (59) e (60) representam a rigidez do sistema nos modos de balanço e arfagem, respectivamente.

As Equações (61) e (62) apresentam os termos que são relativos ao amortecimento do deslocamento vertical e função da velocidade de oscilação vertical e da velocidade angular da massa suspensa respectivamente. Nesses termos, fica

explícito que uma mudança de sinal das derivadas aerodinâmicas pode influenciar na mudança do comportamento, podendo criar um amortecimento negativo.

As Equações (63) a (66) apresentam os termos da matriz A que são influenciados pelo comportamento aerodinâmico em relação à oscilação angular da massa suspensa.

$$a_{61} = \frac{p_i \left( \frac{\partial C_m}{\partial z} \frac{L}{v} + \frac{\partial C_z}{\partial z} \frac{a}{v} \right) + K_f a - K_r b}{I_y} \quad (63)$$

$$a_{62} = \frac{p_i L \left( \frac{\partial C_m}{\partial \varphi} \frac{a}{v} - \frac{\partial C_m}{\partial z} \frac{a}{v} \right) + a p_i \left( \frac{\partial C_z}{\partial \varphi} \frac{a}{v} - \frac{\partial C_z}{\partial z} \frac{a}{v} \right) - K_f a^2 - K_r b^2}{I_y} \quad (64)$$

$$a_{65} = \frac{p_i \left( \frac{\partial C_m}{\partial \varphi} \frac{L}{v_i} + \frac{\partial C_z}{\partial \varphi} \frac{a}{v} \right) + C_f a - C_r b}{I_y} \quad (65)$$

$$a_{66} = \frac{-p_i \left( \frac{\partial C_m}{\partial \varphi} \frac{L^2}{v_i} + a \frac{\partial C_z}{\partial \varphi} \frac{L}{v_i} \right) - C_f a - C_r b}{I_y} \quad (66)$$

De forma análoga, as Equações (63) e (64) são relativas à rigidez, e (65) e (66), ao amortecimento.

## 6 VALIDAÇÃO DO MODELO

*"If one not fail at times, then one has not challenged himself."*

(Ferdinand Porsche)

A validação do modelo desenvolvido nesta tese foi realizada pela comparação dos resultados das simulações numéricas com os dados medidos experimentalmente. Numa primeira instância, foram comparados os efeitos aerodinâmicos em alta velocidade. A segunda técnica consistiu na validação modal da frequência de oscilação dos principais modos de movimento.

As simulações realizadas neste trabalho foram baseadas em um modelo de veículo de Formula 3. Os dados do veículo se encontram no Apêndice D. O modelo apresentado no item 5 foi elaborado com dados de componentes medidos em bancadas e, posteriormente, verificados no desempenho de conjunto com dados experimentais.

O Apêndice A mostra os procedimentos utilizados para caracterização dos efeitos aerodinâmicos em túnel de vento. Nesse apêndice, também foi apresentado como as medições são realizados pelo fabricante. Esses procedimentos foram utilizados na construção do modelo.

O Apêndice B mostra o dispositivo utilizado para a validação do modelo de veículo completo no que tange à dinâmica vertical. O dispositivo *4 post rig* excita o veículo completo nos modos de balanço, arfagem e rolagem. Com os resultados experimentais, é possível validar o modelo no domínio do tempo, para entradas discretas, e no domínio da frequência, para entradas randômicas. Infelizmente, o veículo utilizado para os ensaios (na época, um veículo de Formula 4 italiana ensaiado nos equipamentos da Universidade de Brescia) não apresentou resultados satisfatórios. O veículo era recém-fabricado e apresentou elevados nível de atrito no sistema de suspensão, a maior parte no sistema de suspensão dianteira. Dessa forma, não foi possível utilizar esse modelo de veículo para os trabalhos desta tese e nem os seus resultados experimentais. Porém, do ponto de vista acadêmico, os resultados experimentais foram publicados em um artigo sobre a influência do atrito na dinâmica vertical de veículos de competição (BENINI et al., 2017).

O Apêndice C mostra o dinamômetro linear hidráulico utilizado para a caracterização de componentes da suspensão. Nesse dispositivo, foram

caracterizadas as molas, batentes e amortecedores utilizados no veículo. Todos esses dados também foram utilizados no modelo do veículo.

O Apêndice D, além de apresentar os dados do veículo utilizado, também apresenta o sistema de aquisição de dados que estava instalado no veículo quando ele era submetido a eventos de corrida e testes.

Devido aos problemas encontrados nos resultados dos testes no *4 post rig*, o modelo matemático teve que ser validado com os dados de testes em pista. Esse procedimento foi conduzido utilizando uma técnica padrão da indústria do esporte motorizado. A validação foi realizada utilizando os sensores de deslocamento linear dos amortecedores (que representam o deslocamento dos amortecedores e das molas), acelerômetro bi axial (longitudinal e lateral), sensor de pressão nos freios, sensor de posição angular da borboleta do motor e os sensores de velocidade angular das rodas dianteiras.

Para assegurar maior validade nos resultados, o modelo foi testado com três configurações diferentes em três circuitos diferentes. Para a validação, foram utilizados os circuitos 2, 5 e 6, conforme apresentado na Tabela 5.

## **6.1 VALIDAÇÃO DOS EFEITOS AERODINÂMICOS**

Essa validação foi feita por comparação direta dos resultados da simulação do veículo completo com as medidas experimentais em pista. A simulação em regime quase-estático calcula a variação da altura dos eixos dianteiros e traseiros com o aumento da velocidade, excluindo situações de elevada aceleração longitudinal ou lateral. Essa compressão demonstra a relação entre a rigidez da suspensão e o carregamento aerodinâmico. Dessa forma, o resultado avaliado é a variação da compressão do sistema de suspensão (incluindo a razão de instalação, rigidez de mola e rigidez não linear do batente), causada pela força de sustentação negativa (inclui o modelo não linear aerodinâmico baseado nos ensaios de túnel de vento). Para essa validação, foi feita uma varredura de velocidades longitudinais com o modelo (de 0 km/h a 230 km/h), comparando com o gráfico de compressão da suspensão por velocidade longitudinal de um veículo em uma volta, em três diferentes circuitos.

Utilizando potenciômetros lineares instalados na suspensão dianteira e traseira do veículo, foi possível medir o deslocamento dos sistemas de suspensão. Utilizando

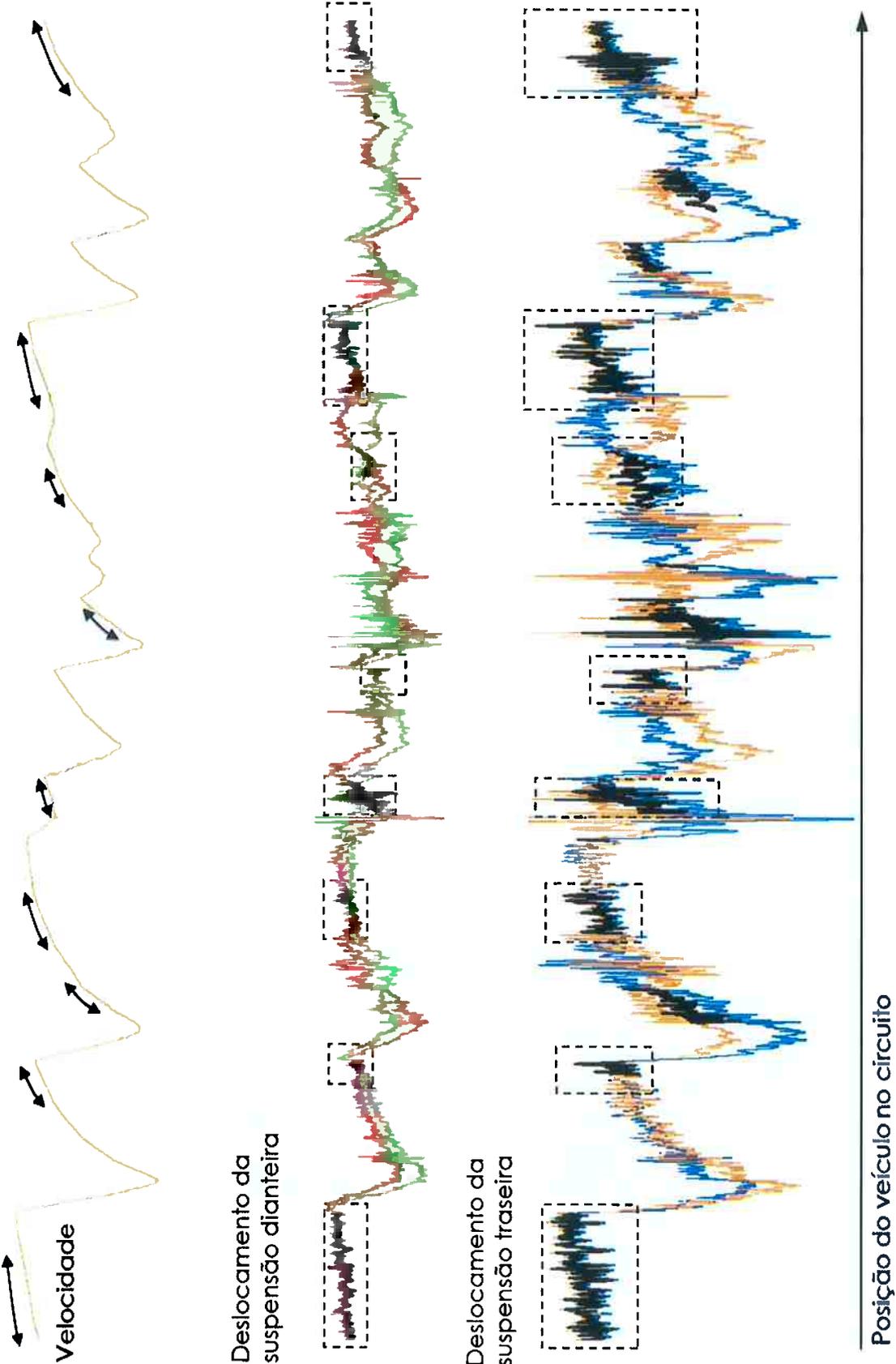
a média dos sinais do lado esquerdo e direito de cada eixo, foi feito um janelamento do sinal, garantindo que o veículo não seja perturbado de forma abrupta durante o aumento de velocidade, isolando os dados em uma situação próxima do regime quase-estático. Dessa forma, são excluídos: trechos com acelerações laterais maiores que 0.1 g, situações nas quais a aceleração longitudinal é maior que 0.1 g e menor que -0,1 g, situações nas quais existe mais de 2 Bar de pressão no sistema de freio e situações em que o ângulo da borboleta do motor é menor do que 86°<sup>21</sup>. A velocidade longitudinal do veículo foi medida utilizando sensores de rotação angular nas rodas dianteiras (taco gerador). Os dados relativos ao sistema de aquisição de dados, sensores e canais matemáticos estão presentes no Apêndice D.

A Figura 25 mostrada a seguir apresenta, na primeira linha, o sinal de velocidade (cor marrom); na segunda, os sinais dos potenciômetros do eixo dianteiro (dianteiro esquerdo – vermelho, dianteiro direito – verde) com o sinal com o janelamento (cor preta sobreposta aos demais sinais), e na terceira linha, os sinais dos potenciômetros traseiros (traseiro esquerdo – azul e traseiro direito – laranja) e o sinal com o janelamento (em cor preta sobreposto aos demais sinais). O deslocamento analisado, em cor preta, aparece quando o veículo se encontra em linha reta, a plena carga e em situação de baixa excitação. Os valores dos eixos não foram apresentados deliberadamente em função do sigilo dos dados.

---

<sup>21</sup> A maior abertura possível da borboleta do motor é de 90°, porém entre 86° e 90° não existe ganho significativo de potência. Dessa forma, o janelamento para abertura de borboleta acima de 86° garante que o veículo se encontre em situação de plena carga e o comportamento do sistema de suspensão não seja perturbado pela variação de potência (ie. acionamento transitório do acelerador pelo piloto).

Figura 25 - Comparação entre o sinal bruto e o sinal após o janelamento.



As Figuras 26 e 27 apresentam os potenciômetros lineares instalados nos sistemas de suspensão dianteiro e traseiro. Essa instalação foi feita de forma a manter a razão de instalação do sensor igual à do sistema mola amortecedor, caso contrário, é necessário um fator de ganho na configuração do sensor.

Figura 26 - Potenciômetro instalado na suspensão dianteira (AIM, 2008).

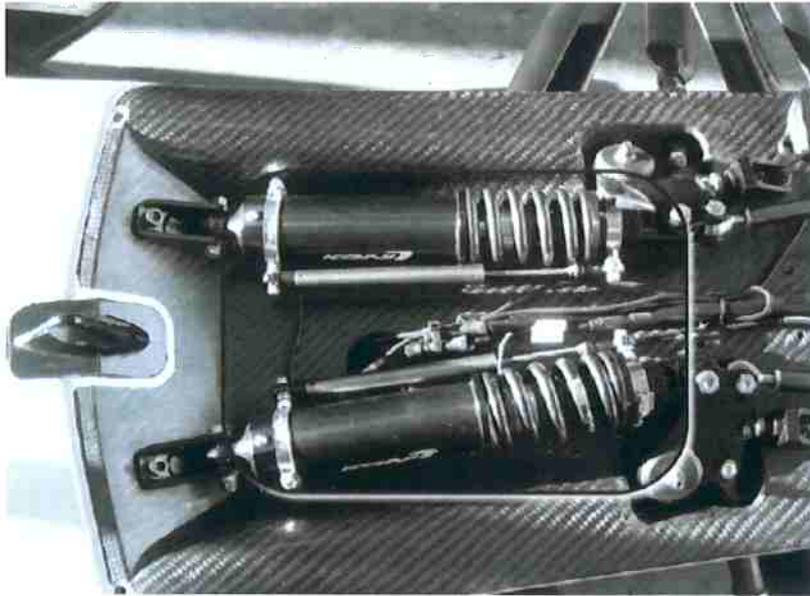
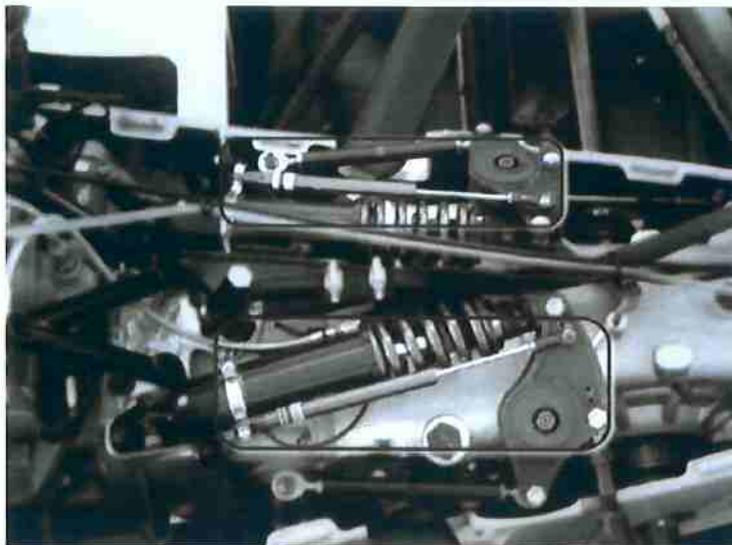


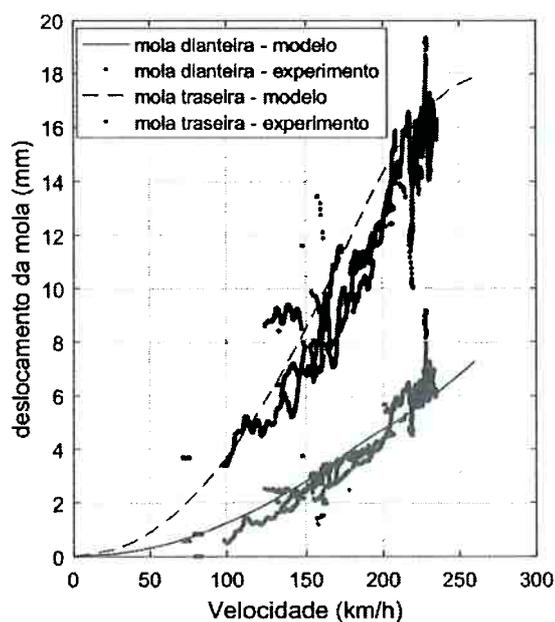
Figura 27 - Potenciômetro instalado na suspensão traseira (AIM, 2008).



Com esses dados, é possível criar um gráfico que mostra a compressão do sistema mola amortecedor em função da velocidade e se pode comparar os resultados do modelo com os resultados experimentais.

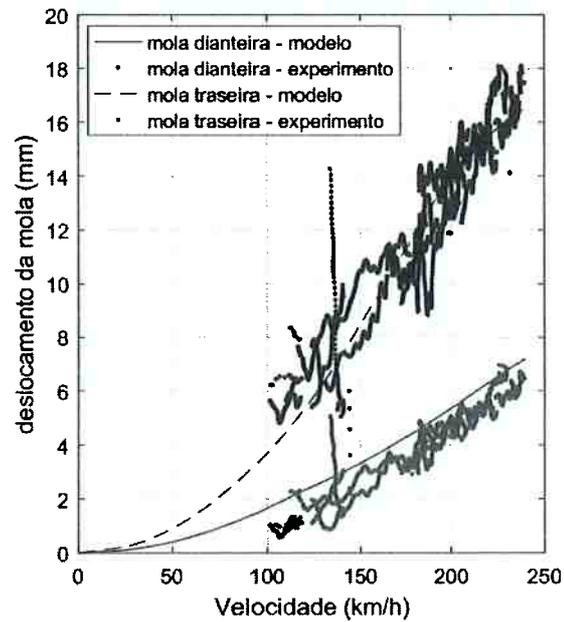
A Figura 28 apresenta a comparação entre os dados de uma volta completa no circuito 6, caracterizado pelo uso de baixa sustentação negativa.

Figura 28 - Validação do deslocamento no circuito 6.



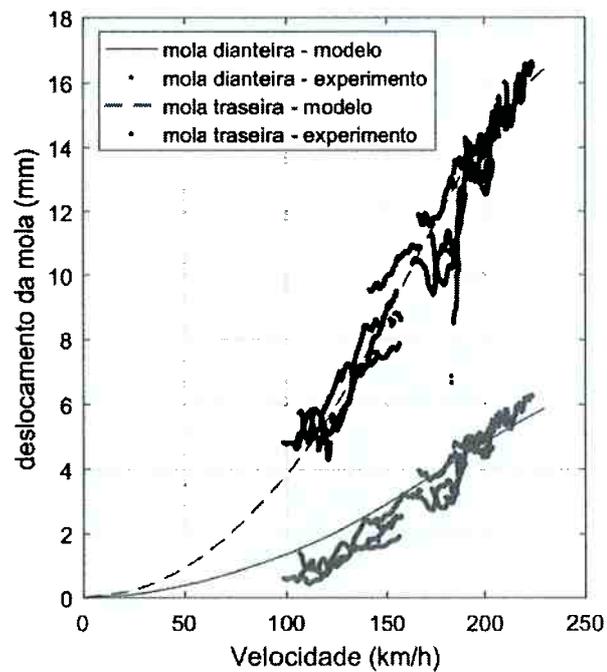
A Figura 29 a seguir apresenta a comparação para o circuito 5, caracterizado pelo uso de configuração de média sustentação negativa.

Figura 29 - Validação do deslocamento no circuito 5.



A Figura 30 a seguir apresenta a comparação para o circuito 2, caracterizado pelo uso de alta sustentação negativa.

Figura 30 - Validação do deslocamento no circuito 2.



Os dados apresentados mostram que existe correlação adequada entre os resultados experimentais medidos em tráfego do veículo na pista e os resultados das simulações numéricas. A nuvem de pontos criada no experimento é resultado das irregularidades da pista. Dessa forma, pode-se observar que o circuito 6 apresenta maiores irregularidades do que os circuitos 5 e 2, o que é condizente com o observado. O circuito 2 foi o que apresentou o menor nível de irregularidades porque havia sido recapeado recentemente.

De maneira geral, esses resultados validam o modelo proposto, demonstrando que ele é capaz de replicar os deslocamentos do sistema de suspensão quando submetido a carregamentos aerodinâmicos. O modelo foi validado em três configurações aerodinâmicas diferentes, para três configurações diferentes do sistema de suspensão (rigidez de mola, folga do batente, razão de instalação e altura dos eixos).

## 6.2 VALIDAÇÃO MODAL

Utilizando o sistema de equações linearizado no espaço de estados, foram criadas funções de respostas, Equação (67), para a velocidade de deslocamento dos movimentos de balanço e arfagem e do deslocamento dos amortecedores. A equação (64) apresenta as matrizes de resposta **C** e **D** de forma detalhada.

$$y = \mathbf{C}x + \mathbf{D}_1u(t) + \mathbf{D}_2u(t - \tau) \quad (67)$$

$$\begin{bmatrix} z_{x_{fr}} \\ \varphi_{x_{fr}} \\ x_f \\ x_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{MR_f} & \frac{a}{MR_f} & \frac{1}{MR_f} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{MR_r} & -\frac{b}{MR_f} & 0 & \frac{1}{MR_f} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u(t - \tau) \quad (68)$$

A medição experimental dos movimentos de balanço e arfagem foi feita de forma indireta, utilizando os sensores de deslocamento dos amortecedores.

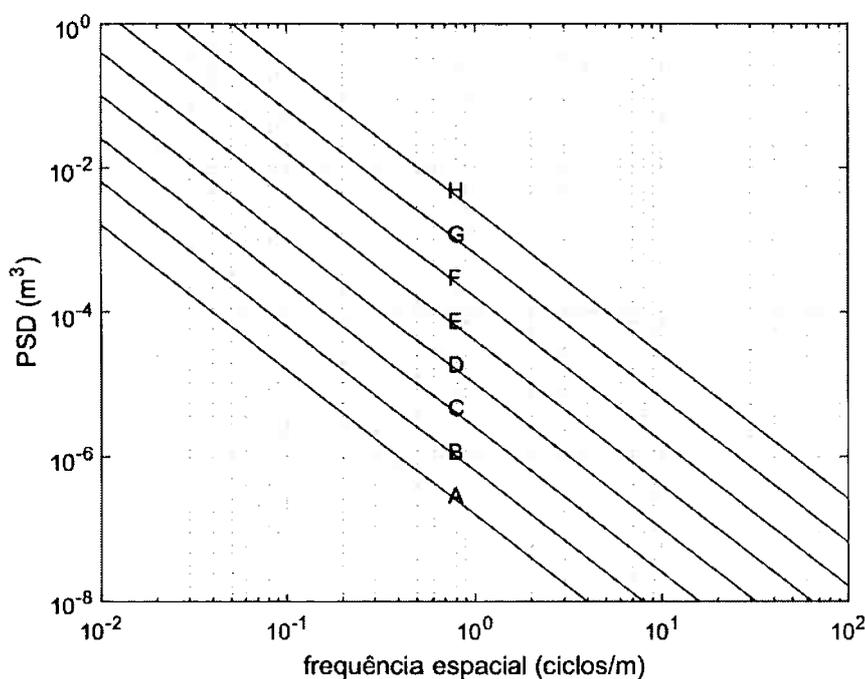
A resposta em frequência da velocidade (velocitância) foi escolhida por salientar os ganhos dos modos em frequências médias (EWIN, 2000), ressaltando a definição dos modos.

Como a entrada no sistema correspondente à irregularidade da via não é conhecida, foi utilizada uma entrada artificial. É sabido que a entrada da pista,

independente da pista, apresenta decaimento com o aumento da frequência (GENTA; MORELLO, 2009). Independentemente da entrada, os modos do sistema não alteram a sua frequência natural, o que permite uma comparação modal.

A Figura 31 apresenta a densidade espectral de potência (PSD) de perfis de pistas de acordo com a nomenclatura da ISO (GENTA; MORELLO, 2009). Independentemente do nível de irregularidade, o decaimento em função da frequência é da ordem de 20 dB por década.

Figura 31 - Densidade espectral de pista de acordo com a norma ISO.



Essa PSD deve ser convertida de frequência espacial para frequência temporal incluindo o efeito da velocidade longitudinal na entrada. A Equação (69) mostra a relação entre a PSD e a frequência espacial de acordo com a proposta da ISO.

$$S_n(\bar{\omega}) = c(\bar{\omega})^{-n} \quad (69)$$

As Equações (70) e (71) mostram a relação entre a frequência temporal e a espacial.

$$f = V\bar{\omega} \quad (70)$$

$$S(f) = cV^{n-1}f^{-n} \quad (71)$$

Devido à criação da entrada artificial, é de se esperar que a resposta do experimento e do modelo não sejam equivalentes em toda a faixa de frequência analisada (1Hz a 25Hz), porém ainda é possível analisar se as frequências naturais dos modos de vibrar são equivalentes.

A Tabela 6 apresenta os valores de frequência natural para os modos de vibrar da massa suspensa em função da velocidade longitudinal do veículo. Os valores aumentam com a velocidade devido ao aumento da carga aerodinâmica, comprimindo o sistema de suspensão e fazendo com que esse comprima o batente de suspensão, aumentando a rigidez do sistema.

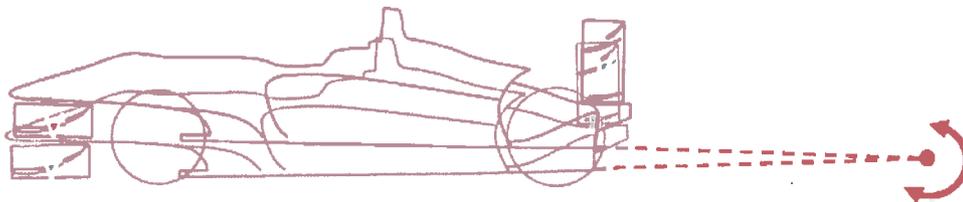
Tabela 6 – Frequências naturais do sistema.

		<b>Velocidade [km/h]</b>				
		78.0	106.0	134.0	162.0	190.0
<b>massa não-suspensa dianteira</b>	<b>[Hz]</b>	16.9	16.6	16.6	19.8	20.8
<b>massa não-suspensa traseira</b>	<b>[Hz]</b>	15.5	15.5	15.7	16.4	20.6
<b>balanço dianteiro</b>	<b>[Hz]</b>	6.8	6.8	6.7	6.6	6.5
<b>balanço traseiro</b>	<b>[Hz]</b>	3.5	3.4	3.5	3.7	4.3

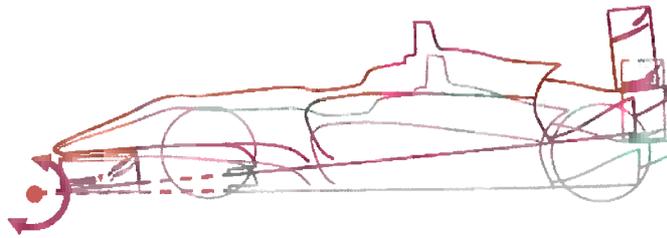
Devido ao fato de os modos serem acoplados, não existe modo de balanço e arfagem puro. Os modos passam a ser chamados de modo de balanço do eixo dianteiro (*rear-end bounce*) e modo de balanço do eixo traseiro (*front end bounce*). A Figura 32 ilustra os modos de vibrar acoplados.

Figura 32 – Modos de balanço do eixo dianteiro e do eixo traseiro.

### BALANÇO DO EIXO DIANTEIRO (REAR-END BOUNCE)



### BALANÇO DO EIXO TRASEIRO (FRONT-END BOUNCE)



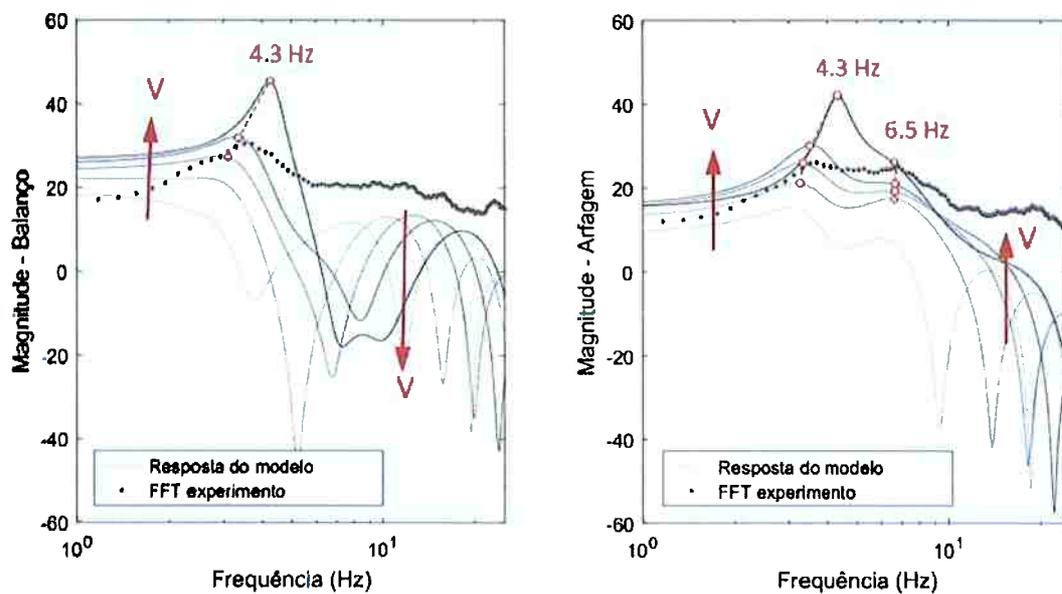
A Figura 33 apresenta a comparação entre a velocidade de balanço e arfagem, calculadas utilizando o deslocamento relativo das suspensões dianteiras e traseiras. Como o sistema é não linear, a frequência natural dos modos muda de acordo com a velocidade longitudinal. No caso do primeiro modo, isso ocorre de forma mais agressiva devido à utilização de um batente de maior rigidez.

A curva experimental apresenta a resposta do veículo com todas as suas não linearidades e numa situação em que a velocidade longitudinal está variando. Essa situação dificulta a comparação direta com o resultado do modelo, já que o mesmo consegue calcular uma curva de resposta em frequência para um valor de velocidade longitudinal fixa (as várias curvas de resposta do modelo correspondem a diferentes velocidades).

As Figuras 33 e 34 mostram 5 curvas de resposta em frequência do modelo para diferentes valores de velocidade longitudinal (78 km/h a 190 km/h), sendo que o gradiente de cor (da mais clara para a mais escura) acompanha o aumento de velocidade. É difícil identificar as frequências naturais em baixas velocidades devido ao efeito da filtragem do entre-eixos, porém elas são nítidas em altas velocidades.

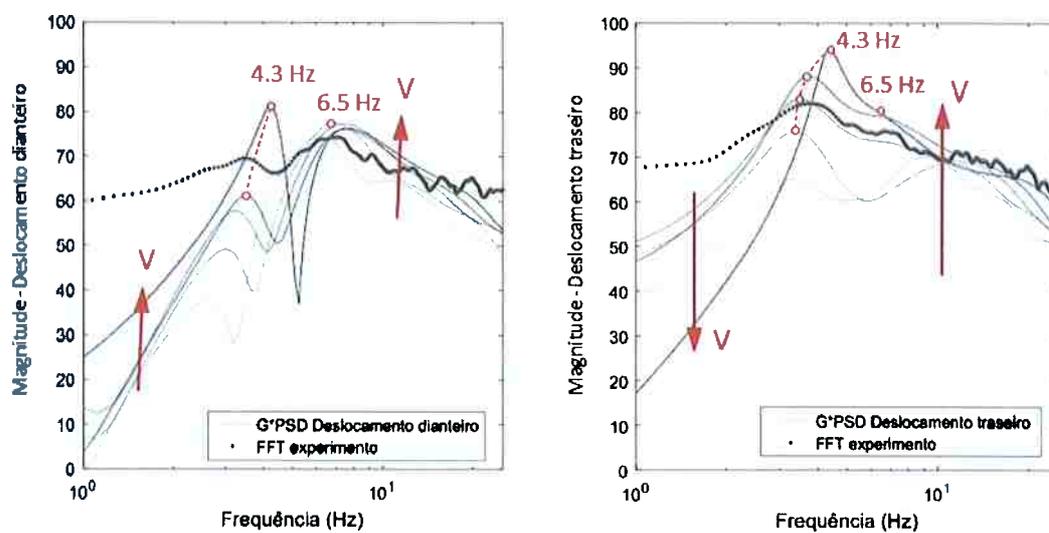
Do ponto de vista da frequência natural dos modos, pode-se dizer que o modelo apresenta as frequências de balanço e arfagem com valores similares ao veículo testado. As curvas em vermelho representam o valor de pico das curvas em resposta a frequências simuladas, mostrando que os valores das frequências naturais mudam com o aumento da velocidade longitudinal, conforme apresentado na Tabela 7.

Figura 33 - Comparação da resposta em frequência dos modos de balanço e arfagem.



A Figura 34 apresenta a comparação entre a resposta em frequência do deslocamento das suspensões dianteiras e traseiras, e da transformada de Fourier da velocidade dos sensores de deslocamento para o circuito. Nela também é possível verificar que o modelo apresenta as frequências de balanço e arfagem com valores similares ao veículo testado.

Figura 34 - Comparação da resposta em frequência do deslocamento da suspensão.



## 7 RESULTADOS

*"It's hard to drive at the limit, but it's harder to know where the limits are."*

(Stirling Moss)

A seguir, são apresentados os resultados do comportamento do veículo em seus diversos aspectos, obtidos nas simulações utilizando o modelo analítico validado. Esses resultados foram divididos de acordo com o tipo da simulação (quase-estática e transiente) e, posteriormente, são apresentados os índices de desempenho.

### 7.1 REGIME QUASE-ESTÁTICO

A análise do comportamento do veículo em regime quase-estático considera que o aumento da velocidade longitudinal do veículo ocorre de forma suficientemente lenta para considerar que a deflexão do sistema de suspensão é independente do comportamento transiente. A validação do deslocamento das molas, apresentada no capítulo anterior, confirma essa hipótese.

Para essa análise, as equações de movimentos apresentadas no capítulo 5 foram transformadas em equações de equilíbrio estático. Essa hipótese considera que as acelerações e velocidades verticais são iguais a zero, simplificando as equações.

As Equações (72) e (73) apresentam as hipóteses adotadas para gerar as equações de movimento presentes nas Equações (74) a (77).

$$\ddot{\varphi}_{ns} = \ddot{z}_s = \ddot{z}_{nsf} = \ddot{z}_{nsr} = \dot{z}_s = \dot{\varphi}_s = \dot{z}_{nsf} = \dot{z}_{nsr} = 0 \quad (72)$$

$$z_{rf} = z_{rr} = 0 \quad (73)$$

$$0 = M_a - aF_a - F_{wheel f} a + F_{wheel r} b \quad (74)$$

$$0 = F_a + F_{wheel f} + F_{wheel r} \quad (75)$$

$$0 = F_{wheel f} + k_{tf}(-z_{nsf}) \quad (76)$$

$$0 = F_{wheel r} + k_{tr}(-z_{nsr}) \quad (77)$$

As equações apresentadas são submetidas a uma varredura de velocidade longitudinal, de velocidade nula até a máxima que pode ser atingida na configuração estudada. A velocidade máxima no veículo estudado é, na maioria dos casos, definida

pela relação da marcha mais longa. Nos circuitos estudados, nem a potência do motor e nem o arrasto aerodinâmico são fatores limitantes da velocidade máxima. Com a faixa de velocidade pré-determinada, ela é discretizada em 20 partes para ser utilizada na rotina de cálculo.

Para a solução do sistema de equações não lineares apresentado, foi utilizado o algoritmo *fsolve* de cálculo numérico da biblioteca do *Matlab*. Essa rotina trabalha com o cálculo jacobiano do sistema, procurando um zero local. A rotina requer um valor inicial para a primeira iteração. Para facilitar o cálculo, o valor inicial adotado é a solução do sistema para a velocidade previamente calculada.

Na prática, a solução de equilíbrio estático é usada para calibrar a rigidez do sistema de suspensão e definir a entrada do batente (folga). Entre os objetivos dessa análise, pode-se destacar:

1. Garantir que o veículo não toque no solo<sup>22</sup> em toda a faixa de velocidade e seja o mais baixo possível (minimizando a altura do centro de gravidade e, conseqüentemente, aumentando a sua capacidade de aderência em curvas);
2. As alturas dos eixos dianteiros e traseiro devem se encontrar em um valor pré-especificado a uma determinada velocidade, para garantir que o veículo esteja operando perto do ponto ótimo do mapa aerodinâmico para um determinado circuito;
3. A variação dos coeficientes de arrasto e sustentação negativa deve se encontrar dentro de valores pré-especificados. O ponto de estol do difusor deve ser controlado, garantindo que, quando ele acontece, não ocorre perda de desempenho em uma manobra de contorno de curva;
4. A variação do balanço aerodinâmico deve se encontrar dentro de uma faixa pré-determinada, garantindo que a dirigibilidade do veículo não seja comprometida;
5. A variação do balanço mecânico deve se encontrar dentro de uma faixa pré-determinada. Com a alteração da altura dos eixos, os centros de rolagem

---

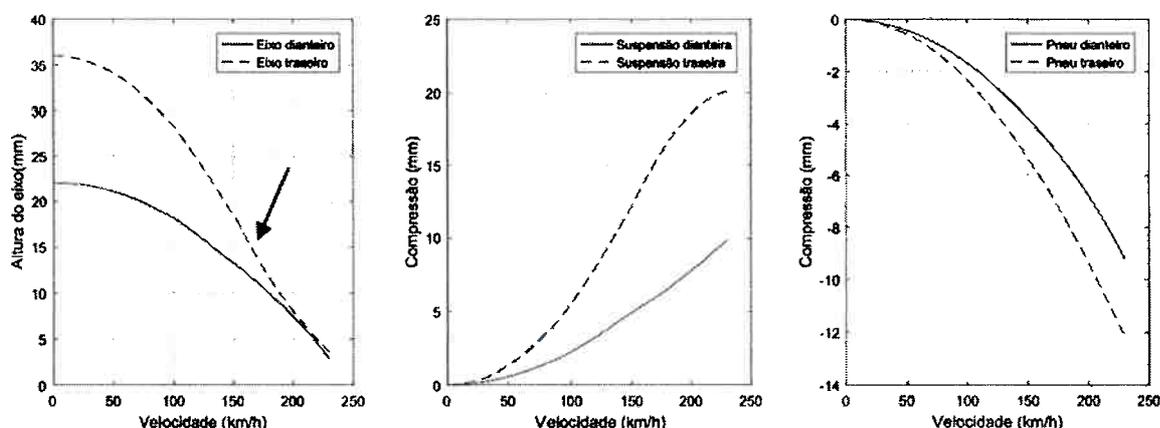
<sup>22</sup> Na análise se o veículo toca ou não o solo, deve-se atentar que uma altura do eixo dianteiro igual ou menor que zero não necessariamente implica que o veículo toque o solo. O assoalho dos veículos estudados normalmente inicia cerca de 350 mm atrás do eixo dianteiro, sendo a altura do eixo dianteiro um ponto virtual. Em manobra de frenagem (manobra crítica para o veículo tocar o solo), a altura do eixo dianteiro diminui e a do eixo traseiro aumenta. Nessa situação, pode ocorrer que a altura do eixo dianteiro seja negativa e, mesmo assim, o veículo não toque o solo, pois o assoalho se encontra acima do solo.

e a razão de instalação das molas e barras estabilizadoras podem mudar, alterando a transferência de carga em curva e, conseqüentemente, a dirigibilidade.

Nos itens acima, relacionados à dirigibilidade do veículo, o número 5 não é alvo de estudo nesta tese, assim como a variação do coeficiente de arrasto com a variação da atitude do carro. Porém, é importante destacar que soluções ótimas dos itens 1, 2 e 3, muitas vezes, podem comprometer a dirigibilidade do veículo por conta do uso inadequado dos batentes em curvas, alterando drasticamente a carga vertical nos pneus e, conseqüentemente, a estabilidade da dirigibilidade.

Os veículos de competição devem ter os sistemas de suspensão calibrados para maximizar o seu desempenho em pista. Com o aumento da velocidade, o carregamento aerodinâmico aumenta, o sistema de suspensão é sujeito a carregamentos maiores e a altura do solo diminui. Como primeiro indicador de desempenho, a altura do solo na faixa de velocidade de trabalho não deve ser igual ou menor do que zero (tocar o solo). Por conta disso, a rigidez do sistema de suspensão deve ser elevada. Molas não lineares não são comumente utilizadas em competição, pois existe inflexibilidade na configuração do ponto de transição de rigidez, perdendo agilidade nas trocas rápidas de configuração. A solução com batentes de suspensão possibilita uma maior gama de ajustes (além da troca dos batentes, existe a opção de modificações rápidas nos valores das folgas). A Figura 35 apresenta as alturas dos eixos em função da velocidade (alturas dinâmicas), o deslocamento do sistema de suspensão e a deflexão dos pneus também em função da velocidade.

Figura 35 - Alturas dinâmicas (esquerda), deslocamento do sistema de suspensão (centro) e deflexão dos pneus (direita) em função da velocidade.

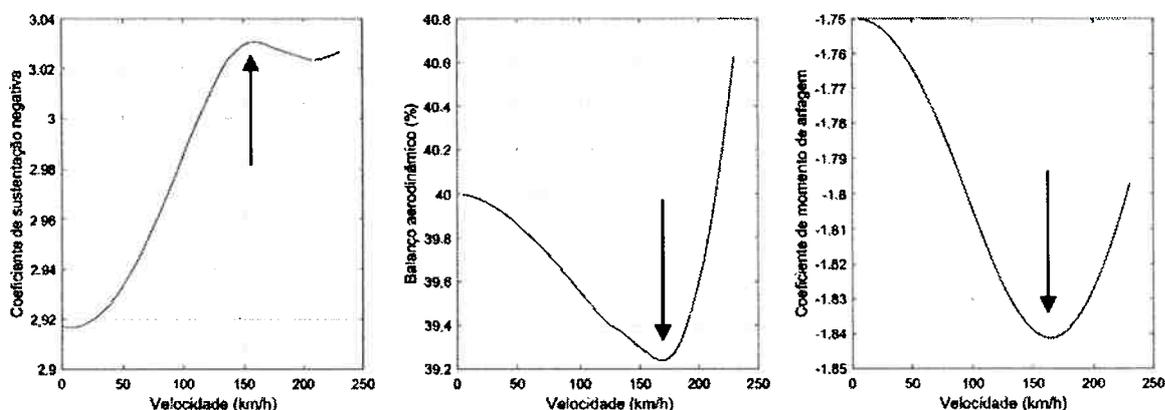


Na Figura 35 à esquerda, é possível ver claramente que existe um ponto de inflexão na curva de altura dos eixos traseiros, enquanto o eixo dianteiro apresenta uma curva mais suave. Isso acontece devido ao fato de que o batente na suspensão traseira não é comprimido em baixas velocidades por conta da folga configurada. Quando o veículo atinge cerca de 100 km/h, esse batente começa a ser comprimido, alterando a rigidez da suspensão traseira. Esse batente foi configurado com uma folga de 6 mm. Na suspensão dianteira, o batente possui uma rigidez com menor variação do que o batente traseiro, o que dificulta a verificação visual do aumento de rigidez. A folga utilizada no batente dianteiro é de 3 mm.

Outra particularidade do comportamento de veículos de competição é apresentada na figura da direita, na deflexão dos pneus. O veículo simulado utiliza rodas de 13 polegadas e pneus de perfil alto, comumente utilizados em monopostos. Esses pneus são projetados exclusivamente para gerar elevado nível de aderência. Como consequência, a rigidez vertical do pneu é baixa em comparação ao sistema de suspensão. Devido ao elevado carregamento aerodinâmico, o sistema de suspensão precisa ser rígido para suportar os carregamentos e impedir que o veículo toque o solo. Essa combinação, muitas vezes, cria um sistema dinâmico no qual a rigidez final é controlada em grande parte pelo pneu. Na Figura 33, dos 19 mm comprimidos no eixo dianteiro, 9 mm são devidos à deflexão dos pneus. E dos 33 mm do eixo traseiro, 12 mm são devidos à deflexão dos pneus. A suspensão dianteira é mais rígida do que a suspensão traseira (MYGALE, 2008b; DALLARA, 2012b; TATUUS, 2013), o que é típico nos monopostos.

Além do controle das alturas dinâmicas para garantir um veículo baixo e que não toque o solo, a suspensão determina uma faixa de variação dos coeficientes aerodinâmicos. Quanto mais perto do solo o veículo trabalha, maior o benefício do efeito solo até atingir o ponto em que o difusor atinge o estol. A Figura 36 apresenta os coeficientes aerodinâmicos em função da velocidade.

Figura 36 - Coeficiente de sustentação negativa, balanço aerodinâmico e coeficiente do momento de arfagem em função da velocidade.



A inflexão da curva do coeficiente de sustentação negativa em função da velocidade apresentada na figura acima, à esquerda, mostra que, a partir de cerca de 150 km/h, ocorre o estol do difusor e o coeficiente de sustentação negativa começa a diminuir. No caso da configuração apresentada, esse estol não é completo, porque o coeficiente volta a aumentar a partir de 200 km/h. Esse efeito é compartilhado também no balanço aerodinâmico, que aumenta significativamente o percentual de suspensão negativa no eixo dianteiro (devido ao efeito da perda de sustentação negativa no eixo traseiro) e também no coeficiente de momento de arfagem. Como pode ser visto na figura acima, o coeficiente de momento de arfagem possui uma variação percentual do seu valor inicial maior do que o balanço aerodinâmico, porque ele é uma composição do balanço e do coeficiente de sustentação negativa. Esse é um dos motivos pelo qual ele é um dos parâmetros que representa melhor a sensibilidade aerodinâmica.

## 7.2 REGIME TRANSIENTE

A dinâmica vertical de um veículo de competição é um compromisso entre a minimização da variação da força de contato e a estabilidade aerodinâmica. A estabilidade aerodinâmica pode ser representada pela variação do momento de arfagem. Devido à variação dos coeficientes aerodinâmicos e da rigidez dos sistemas de suspensão em função da velocidade, a função de transferência do sistema dinâmico completo também varia com o aumento da velocidade.

As equações de movimento apresentadas no capítulo 5 foram utilizadas com a rigidez das molas (incluindo os batentes) linearizadas para cada valor de velocidade longitudinal discretizada (de 0 km/h a 230 km/h, com passo de 5 km/h), assim como os coeficientes aerodinâmicos. Os coeficientes aerodinâmicos utilizados possuem as parcelas proporcionais à velocidade de balanço e arfagem, conforme apresentado anteriormente, utilizando a abordagem de ângulo de ataque quase-estático. As equações foram então transformadas em um sistema de equações diferenciais de primeira ordem representado no espaço de estados como mostrado de forma teórica na Equação (78), e com as variáveis de estados utilizadas no modelo na Equação (79).

$$\dot{x} = \mathbf{A} \cdot x + \mathbf{B}_1 \cdot u(t) + \mathbf{B}_2 \cdot u(t - \tau) \quad (78)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_s \\ \dot{\alpha}_s \\ \dot{z}_{nsf} \\ \dot{z}_{nsr} \\ \dot{v}_s \\ \dot{\omega}_s \\ \dot{v}_{nsf} \\ \dot{v}_{nsr} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \cdot \begin{bmatrix} z_s \\ \alpha_s \\ z_{nsf} \\ z_{nsr} \\ v_s \\ \omega_s \\ v_{nsf} \\ v_{nsr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot u(t - \tau) \quad (79)$$

A matriz  $\mathbf{A}$  do modelo apresentado acima não é diagonal e, por conta disso, o sistema apresenta modos de vibrar acoplados. Isso indica que os modos de arfagem e balanço não são independentes. Conforme descrito anteriormente, a entrada nos pneus traseiros foi modelada com um retardo no tempo ( $\tau$ ), que é função da velocidade e do comprimento do entre-eixos.

Como resposta, foram escolhidos a velocidade dos deslocamentos de balanço e arfagem da massa suspensa, as forças de contato entre o pneu e o solo e o coeficiente de balanço aerodinâmico e de momento de arfagem. A Equação (80)

apresenta as funções de resposta de forma teórica; a Equação (81), o vetor de respostas e a Equação (82), a matriz **C**.

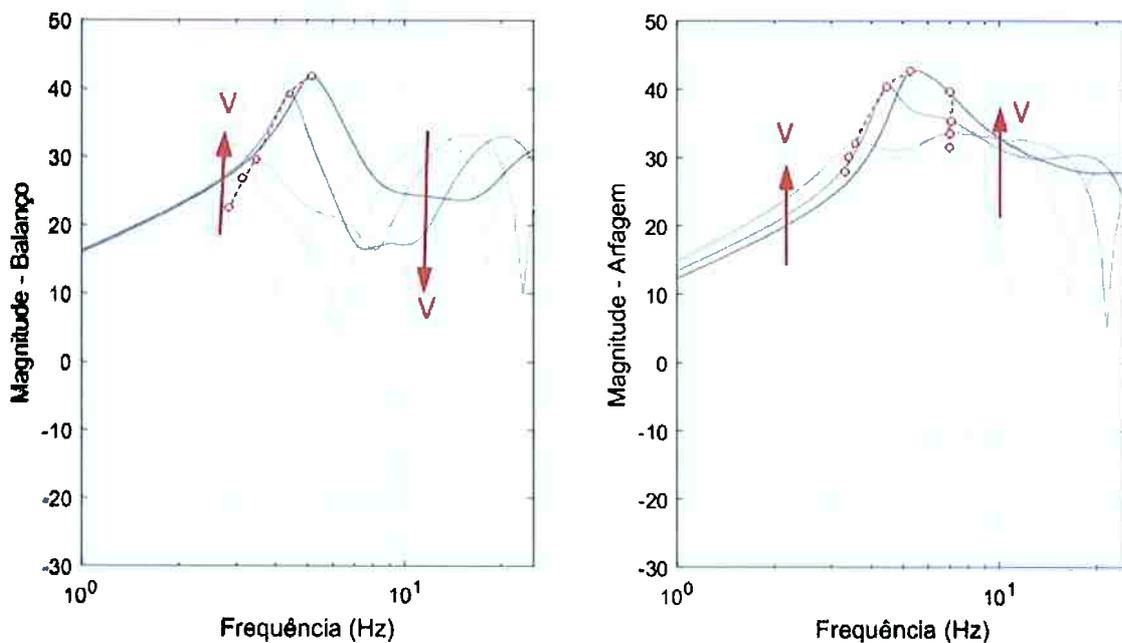
$$Y = C \cdot x + D_1 \cdot u(t) + D_2 \cdot u(t - \tau) \tag{80}$$

$$Y = \begin{bmatrix} Z \\ \varphi \\ AB \\ M \\ FC_f \\ FC_r \end{bmatrix} \tag{81}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial AB}{\partial h(v)} & \frac{\partial AB}{\partial h(v)} \cdot a + \frac{\partial AB}{\partial \varphi(v)} & 0 & 0 & \frac{\partial AB}{\partial \varphi(v)} \cdot \frac{1}{v} & \frac{\partial AB}{\partial \varphi(v)} \cdot \frac{L}{v} & 0 & 0 \\ pLS \frac{\partial C_m}{\partial h(v)} & pLS \left( \frac{\partial C_m}{\partial h(v)} \cdot a + \frac{\partial C_m}{\partial \varphi(v)} \right) & 0 & 0 & pLS \frac{\partial C_m}{\partial \varphi(v)} \cdot \frac{1}{v} & pLS \frac{\partial C_m}{\partial \varphi(v)} \cdot \frac{L}{v} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K_{tf} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -K_{tr} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{82}$$

Usando as respostas apresentadas acima, foram calculadas as funções de transferências para os valores de velocidade distintos, variando de 70 km/h até 230 km/h. A Figura 37 apresenta 5 funções de transferência entre 70 km/h até 230 km/h.

Figura 37 - Função de transferência dos modos de balanço e arfagem do corpo rígido veículo.

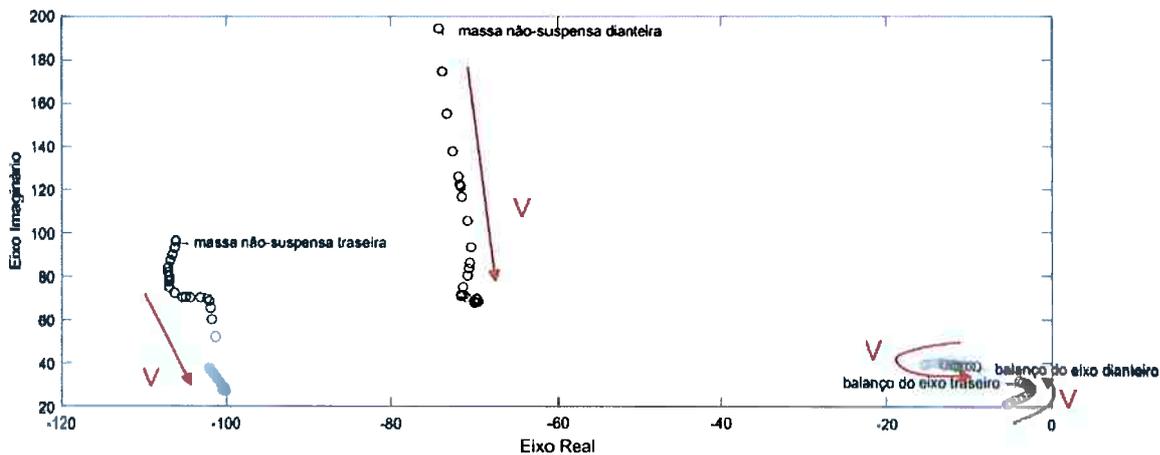


A Figura 37 mostra o efeito de filtro do entre-eixos (GILLESPIE, 1992) nas funções de transferências. Para valores de pico na função de arfagem, existem valores de vale na função de balanço e vice-versa. Esses picos e vales são função da velocidade do veículo e do comprimento do entre-eixos.

Nelas também é possível ver como a função de transferência muda a sua resposta com o aumento da velocidade, efeito dos carregamentos aerodinâmicos e da não linearidade do sistema de suspensão. A mudança da frequência de ressonância é principalmente causada pela atuação do batente traseiro. Isso ocorre devido ao fato do aumento de rigidez imposto pelo batente traseiro ser proporcionalmente maior à rigidez da mola em comparação com a relação de rigidez entre batente e mola dianteiros.

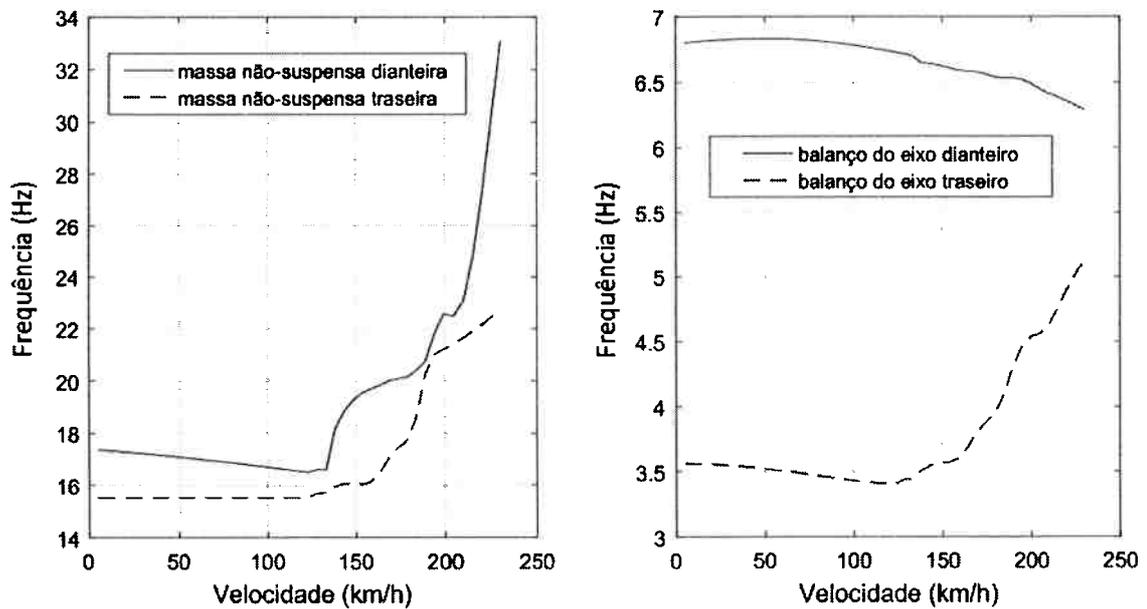
A Figura 39 apresenta o gráfico do lugar das raízes do sistema em função da velocidade (quanto mais escuro, maior a velocidade). Devido à elevada rigidez da suspensão dianteira e do estol do difusor em altas velocidades (o que aumenta o carregamento aerodinâmico no eixo dianteiro), o modo de balanço do eixo dianteiro caminha em direção ao lado positivo do eixo real.

Figura 38 – Lugar das raízes em função da velocidade.



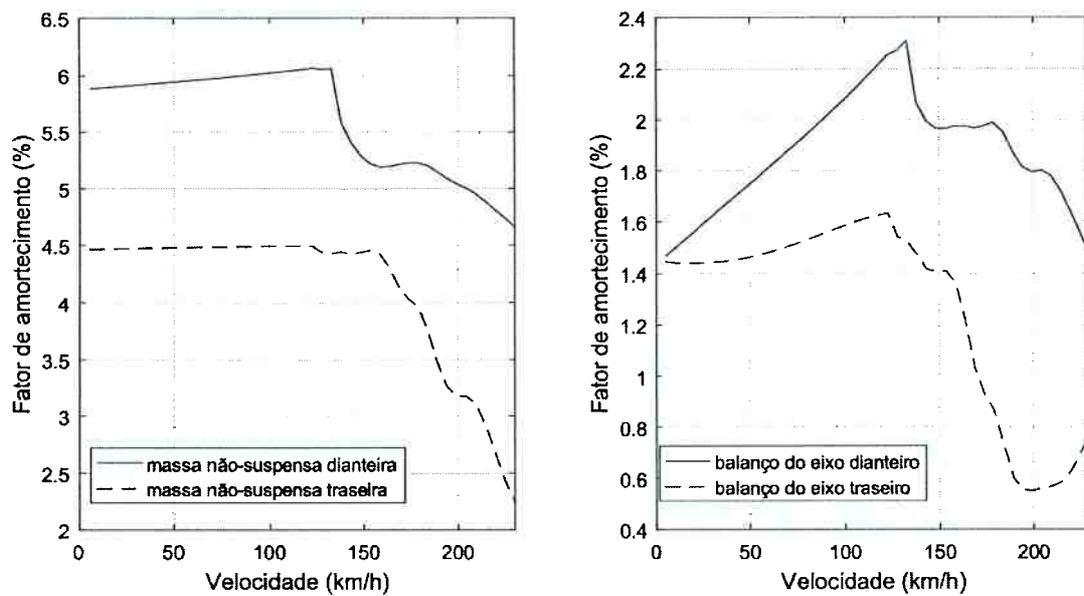
A Figura 39 mostra a variação das frequências naturais dos modos de vibrar do sistema em função da velocidade. Quando os batentes de suspensão traseira começam a ser comprimidos, fica evidente a mudança da frequência natural.

Figura 39 - Frequência natural do sistema.



A Figura 40 apresenta o fator de amortecimento dos modos do sistema. O balanço do eixo traseiro também muda o seu comportamento quando ocorre o estol do difusor a 150 km/h.

Figura 40 - Fator de amortecimento do sistema.

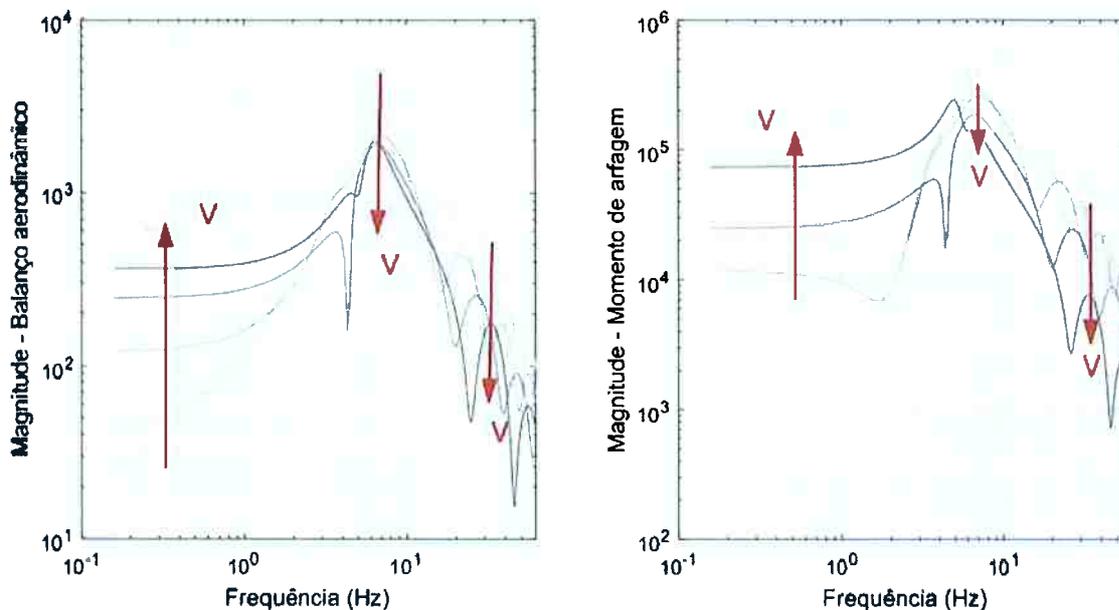


O amortecimento tanto do balanço do eixo dianteiro quanto do balanço do eixo-traseiro diminui com o aumento da velocidade. Nenhum dos dois atinge valores negativos (sistema instável), apesar do balanço do eixo traseiro atingir valores muito baixos se comparados ao valor inicial (perda de mais de 50% de amortecimento). Dependendo da configuração do veículo e da velocidade atingida, é possível que o sistema seja instável, como ocorre em categorias que atingem maiores velocidades (FLOYD; LAW, 1994).

A Figura 41 apresenta as funções de transferência dos modos de balanço aerodinâmico e momento de arfagem para diversas velocidades. As cores mais escuras representam velocidades mais elevadas.

A comparação entre as funções de transferências do momento de arfagem e do balanço aerodinâmico, apresentada na Figura 41, indica que a primeira tem valores absolutos de ganhos maiores e o aumento da velocidade tem um impacto menor na sua diminuição. Esse fato é devido ao momento ser em função do quadrado da velocidade, representando de forma mais precisa a sensibilidade aerodinâmica em alta velocidade.

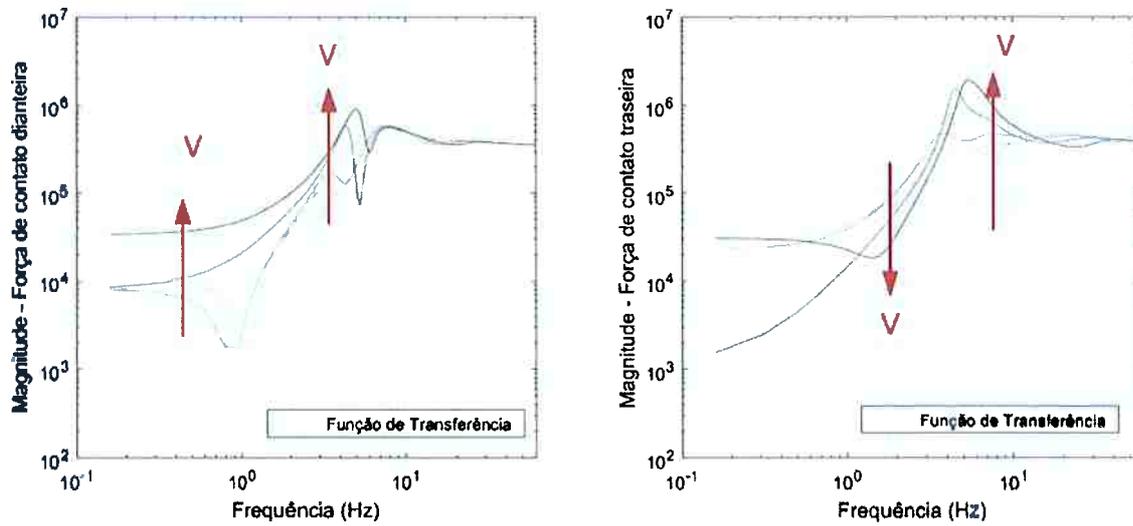
Figura 41 - Função de transferência do balanço aerodinâmico.



A resposta em frequência da força de contato entre o pneu e o solo também é afetada pelas não linearidades do sistema. A Figura 42 apresenta a resposta dos

pneus do eixo dianteiro e do eixo traseiro. Nela fica explícito que a velocidade influencia os ganhos em frequências menores do que 10 Hz.

Figura 42 - Função de transferência da força de contato entre o pneu e solo.



## 8 ÍNDICES DE DESEMPENHO

*“It is not always possible to be the best, but it is always possible to improve your own performance.”*

(Jackie Stewart)

A seguir, são apresentados os três índices de desempenho em dinâmica vertical propostos nesta tese. Inicialmente são expostos os índices relacionados à variação da força de contato com o solo e ao desempenho aerodinâmico, e o capítulo termina com o índice de desempenho final, que é uma combinação particular dos dois primeiros índices.

Como estudo de caso, foram utilizados os circuitos 1 e 2 apresentados na Tabela 5. O veículo foi analisado em diversas configurações divididas em dois grupos, conforme apresentado na Tabela 7. Para facilitar a comparação, a configuração de referência, a configuração rígida e a configuração flexível foram mantidas em ambos os grupos.

Tabela 7 – Configurações do veículo avaliadas.

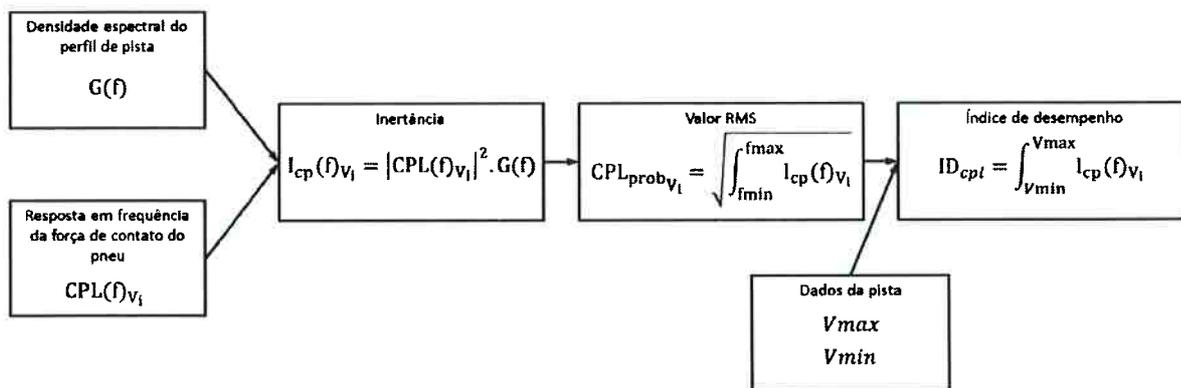
Nome da configuração	Grupo	Descrição
baseline	1, 2	Referência
rígido (hard)	1, 2	Configuração das suspensões mais rígidas, menores folgas e veículo mais baixo.
flexível (soft)	1, 2	Configuração das suspensões menos rígida, maiores folgas e veículo mais alto.
fgap2	1	Folga dianteira ajustada em 2mm
fgap1	1	Folga dianteira ajustada em 1mm
fgap0	1	Folga dianteira ajustada em 0mm
rgap8	1	Folga traseira ajustada em 8mm
rgap10	1	Folga traseira ajustada em 10mm
rgap12	1	Folga traseira ajustada em 12mm
frh23	1	Altura dianteira ajustada em 23mm
frh24	1	Altura dianteira ajustada em 24mm
frh25	1	Altura dianteira ajustada em 25mm
rrh37	1	Altura traseira ajustada em 37mm
rrh38	1	Altura traseira ajustada em 38mm
rrh39	1	Altura traseira ajustada em 39mm
Cm +2	1	Coeficiente de momento +2%
Cm -2	1	Coeficiente de momento -2%
allspr95	2	Todas as molas com 95% de rigidez
allspr90	2	Todas as molas com 90% de rigidez
allspr85	2	Todas as molas com 85% de rigidez
allpr1	2	Todos os pneus com -1psi de pressão
allpr2	2	Todos os pneus com -2psi de pressão
allpr3	2	Todos os pneus com -3psi de pressão
fdamp85	2	85% do amortecimento dianteiro da referência
fdamp70	2	70% do amortecimento dianteiro da referência
fdamp55	2	55% do amortecimento dianteiro da referência
rdamp85	2	85% do amortecimento traseiro da referência
rdamp70	2	70% do amortecimento traseiro da referência
rdamp55	2	55% do amortecimento traseiro da referência
Cz +2	2	Coeficiente de sustentação negativa +2%
Cz -2	2	Coeficiente de sustentação negativa -2%

## 8.1 VARIAÇÃO DE FORÇA DE CONTATO COM O SOLO

O índice de desempenho proposto neste trabalho calcula a função de densidade probabilística da força de contato entre o pneu e o solo, em função da velocidade do veículo. Para o seu cálculo, é utilizada a função de transferência da

força de contato, e um perfil de pista como entrada. Essa função de resposta (módulo do quadrado da função de transferência multiplicada pela PSD do perfil de pista) é chamada de inércia. Esse cálculo é realizado para cada valor de velocidade previamente discretizada (de 0 km/h a 230 km/h). A sequência de cálculo é mostrada na Figura 43.

Figura 43 - Sequência de cálculo do índice de desempenho.

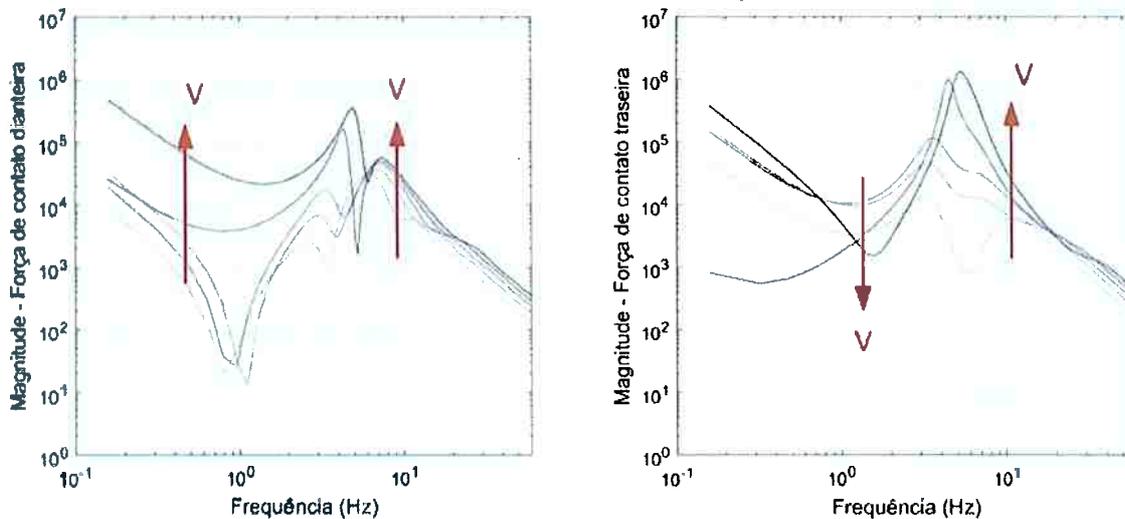


Para o presente trabalho, foi usado um perfil artificial baseado na norma ISO e definido como classe “A”. A PSD deve ser convertida de frequência circular para frequência temporal. A integral da inércia no domínio da frequência para uma velocidade pré-definida representa a variância da força de contato nessa velocidade e pode ser utilizada com um índice de desempenho. A Equação (83) apresenta a definição de inércia.

$$I(f) = H(f) \cdot f^2 \quad (83)$$

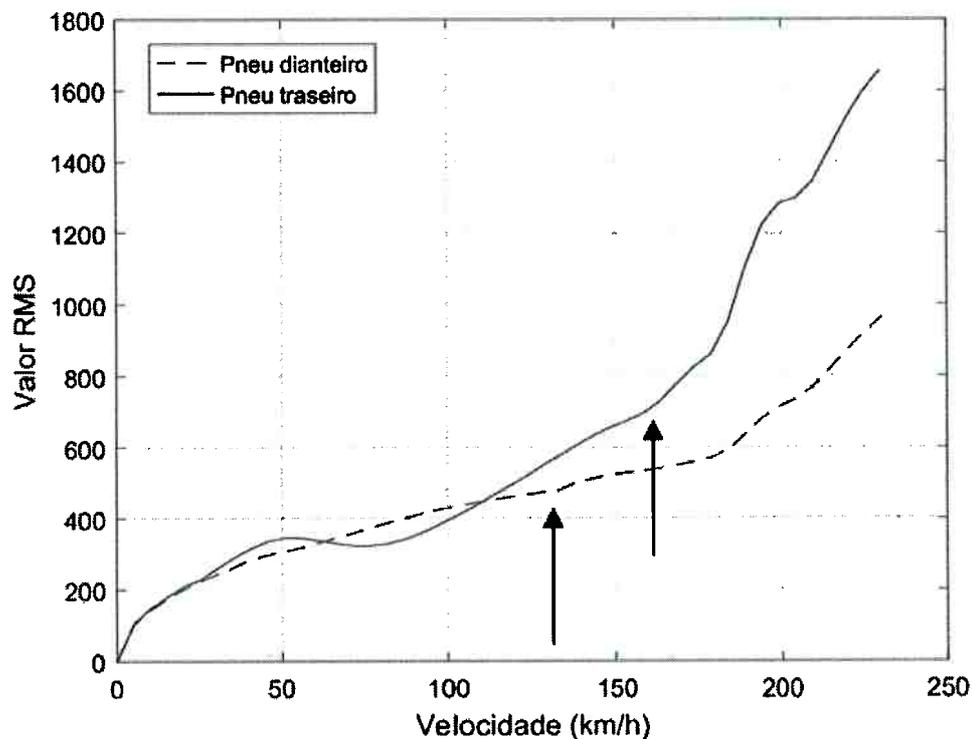
A resposta em frequência da força de contato foi apresentada na Figura 42 e a função de densidade espectral na Figura 31. A Figura 44 apresenta as funções de inércia da força de contato dos pneus dianteiros e traseiros.

Figura 44 - Inertância da força de contato entre pneu e pista dos eixos dianteiro e traseiro.



Na Figura 45, é apresentado o índice de desempenho, que representa a variância da força de contato dos pneus dianteiros e traseiros em função da velocidade. Com o aumento da velocidade, o índice aumenta, o que é esperado, pois as entradas são amplificadas. Modificações nas configurações do veículo irão alterar a forma dessa curva, sendo que os valores menores indicam menor variação e consequentemente maior desempenho. Na Figura 45, o índice apresenta valores maiores acima de 140 km/h no eixo dianteiro e 170 km/h no eixo traseiro, devido à rigidez do batente, sendo mais nítido o efeito na suspensão traseira devido à maior rigidez do batente. O índice apresentado não precisa ser utilizado em sua totalidade em toda a faixa de velocidade. Para cada circuito, uma faixa de velocidade deve ser considerada, modificando assim o seu impacto.

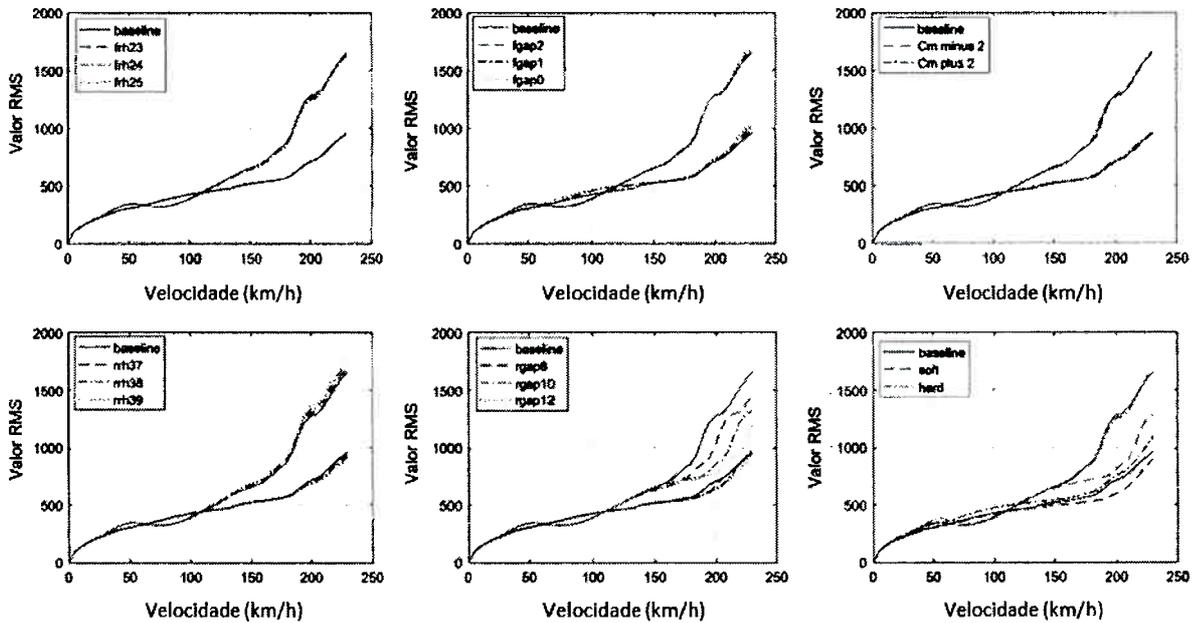
Figura 45 - Índice de desempenho da força de contato para os pneus dianteiros e traseiros em função da velocidade.



O índice de desempenho apresentado na Figura 45 foi calculado para cada uma das configurações da Tabela 7. Os resultados são apresentados separadamente para os grupos 1 e 2.

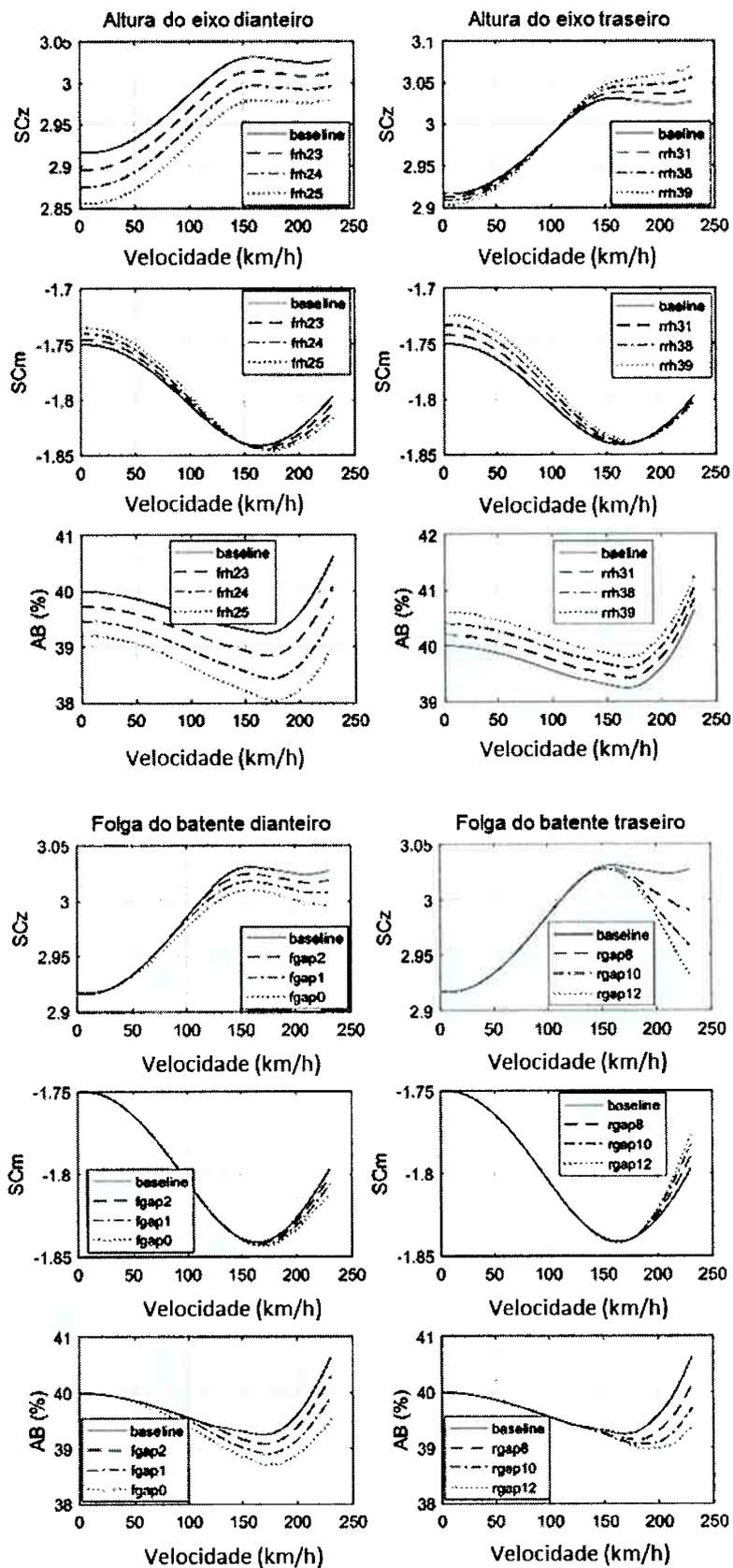
A Figura 46 apresenta a comparação da resposta do veículo referência (*baseline*), com os efeitos da mudança da altura dos eixos dianteiros e traseiros, das folgas dos batentes dianteiros e traseiros, variando o coeficiente de momento de arfagem em +/-2% e com uma configuração rígida e flexível do sistema de suspensão (Grupo 1).

Figura 46 - Sensibilidade dos índices de desempenho da força de contato (Grupo 1).



Apesar das variações das alturas dos eixos terem um efeito direto nos coeficientes aerodinâmicos (Figura 47), elas não afetam a variância da força de contato dos pneus de forma significativa. O maior fator de impacto é a folga dos batentes.

Figura 47 - Sensibilidade dos coeficientes aerodinâmicos.



Na Figura 48, são apresentadas as curvas de rigidez da suspensão dianteira para diferentes valores de folga do batente dianteiro (3 mm na configuração base, 2 mm, 1 mm e 0 mm). Na Figura 49, são apresentadas as curvas de rigidez da suspensão traseira para diferentes valores na folga do batente traseiro (6 mm para valor de referência, 8 mm, 10 mm e 12 mm). Em ambas as figuras, as linhas sólidas são referentes à configuração de referência e as linhas tracejadas são as configurações com a folga modificada, de forma progressiva, de cima para baixo.

Em ambas as figuras, quando os valores de rigidez são lineares, somente a mola de suspensão impõe rigidez ao sistema (baixas velocidades); quando a rigidez aumenta o seu valor, significa que o batente de suspensão começou a ser comprimido (altas velocidades). Comparando o sistema de suspensão dianteiro e traseiro, fica nítido que a rigidez do batente traseiro é maior do que a do dianteiro, demonstrando a razão da não linearidade mais explícita da variação do valor do índice de desempenho da força de contato na Figura 44.

Figura 48 - Sensibilidade da rigidez do sistema de suspensão dianteira à folga do batente dianteiro.

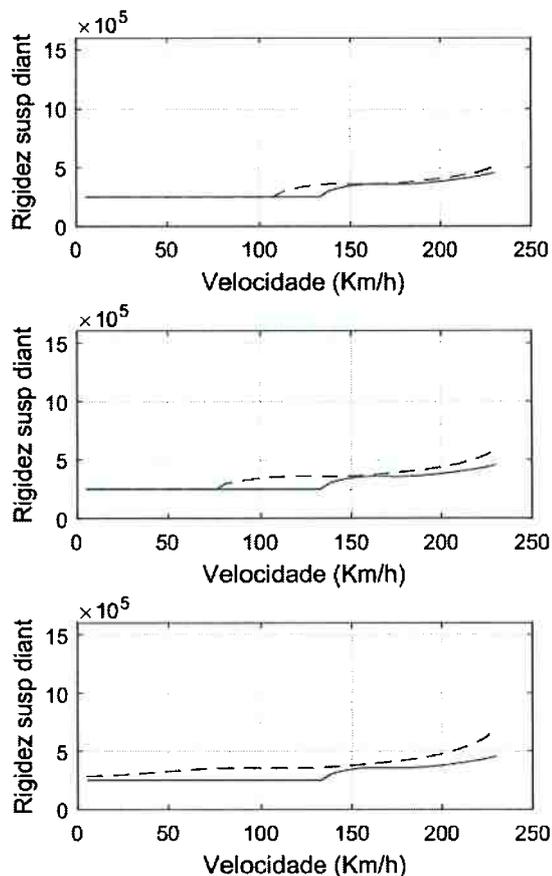
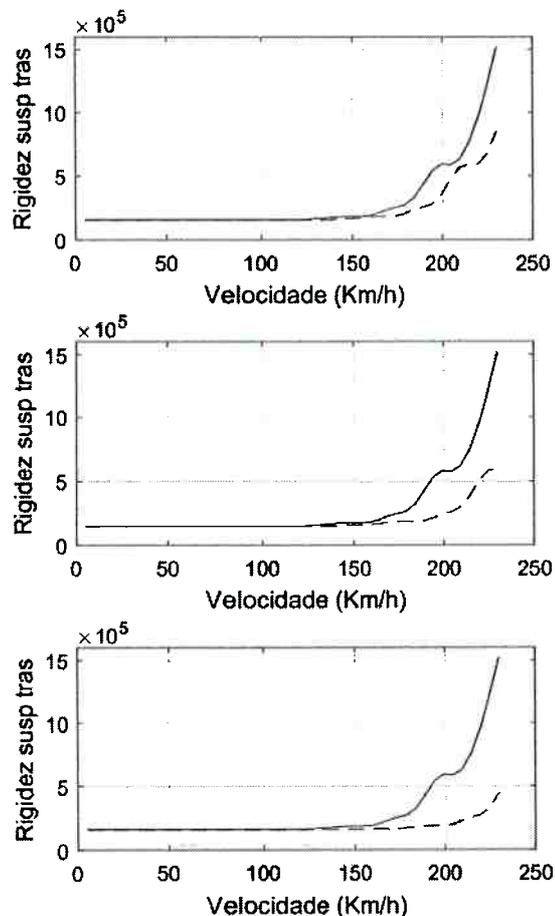
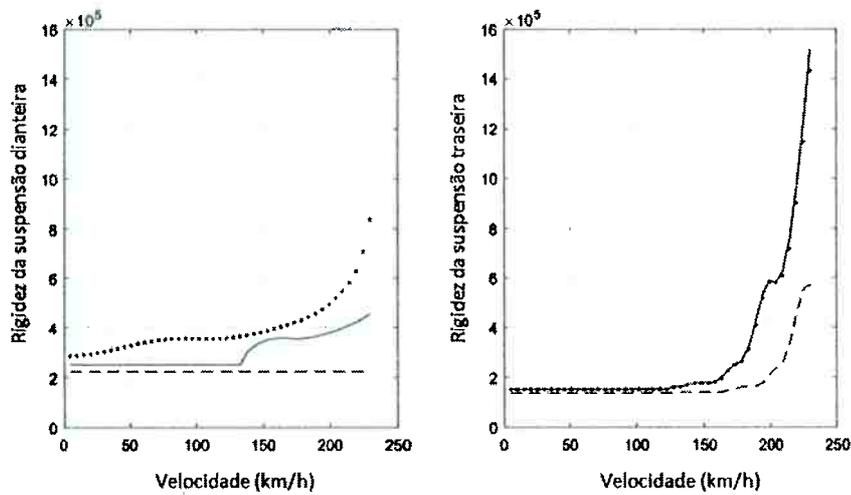


Figura 49 - Sensibilidade da rigidez da suspensão traseira à folga do batente traseiro.



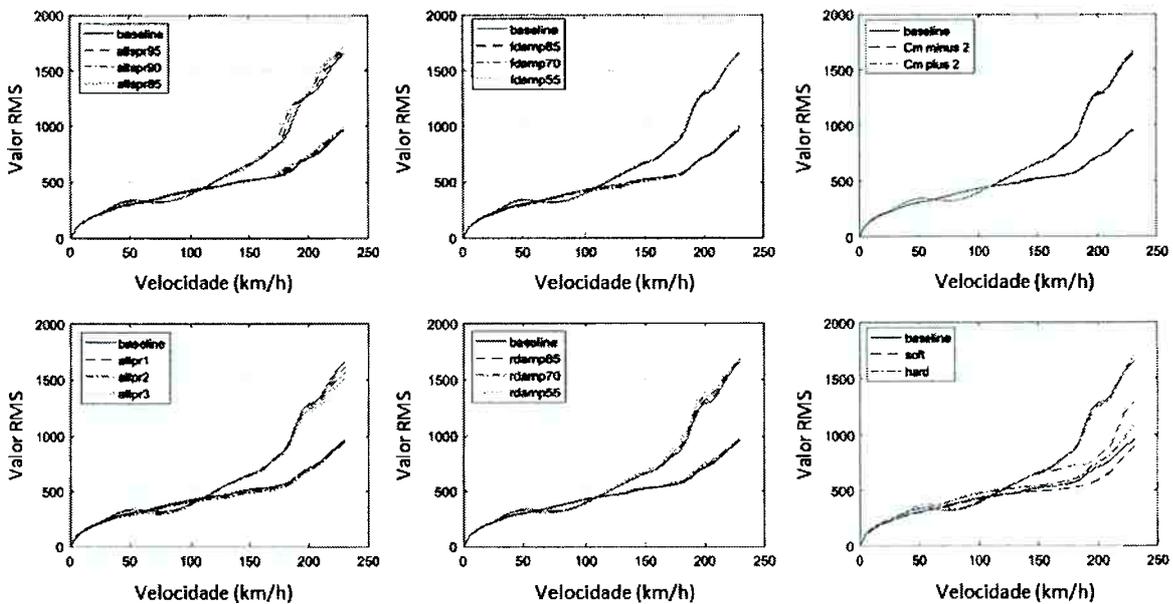
As configurações rígida e flexível do sistema de suspensão representam o veículo com diversas modificações em comparação com o veículo de referência. Pode-se fazer uma analogia à configuração flexível, quando utilizado em um circuito de rua, e rígido quando utilizado em um circuito dedicado de corrida com baixíssimo grau de irregularidades. A Figura 50 apresenta a rigidez dos sistemas de suspensão, comparando a configuração referência (*baseline* – linha sólida), com a configuração rígida (*hard* – linha pontilhada) e com a configuração flexível (*soft* – linha tracejada).

Figura 50 - Variação da rigidez dos sistemas de suspensão dianteiro e traseiro nas configurações rígida e flexível.



A Figura 51 apresenta a variação do índice de desempenho em função da rigidez das molas, da pressão dos pneus, do amortecimento e variando o coeficiente de sustentação negativa em +/- 2% (Grupo 2).

Figura 51 - Sensibilidade dos índices de desempenho (Grupo 2).



As Figuras 52 e 53 apresentam a integral em função da velocidade dos índices de desempenho do grupo 1 e do grupo 2 respectivamente. A integral foi calculada

para dois circuitos diferentes, o circuito 1 vai de 56 km/h a 216 km/h e o circuito 2 vai de 90 km/h a 224 km/h. O índice foi calculado por eixo e para o veículo completo, somando-se a variância de ambos os eixos. Nele é possível ver a influência da faixa de velocidade no índice de desempenho de cada circuito em cada uma das configurações. Dentre as configurações testadas, a folga do batente na suspensão traseira (rgap8, rgap10 e rgap12) é mais sensível do que os demais parâmetros, além de impactar mais no circuito 2 do que no circuito 1. Como esperado, configurações mais flexíveis (*soft*) do sistema de suspensão apresentam melhor desempenho para a força de contato do pneu.

A redução da pressão dos pneus (diminuição da rigidez vertical – allpr1, allpr2 e allpr3) aumenta o desempenho da força de contato, como observado em experimentos de laboratório no *4 post rig*. Porém, valores 3 psi menores do que a referência, normalmente, prejudicam a dirigibilidade. Os fatores de amortecimentos apresentaram um pequeno impacto no índice de desempenho (fdamp85, fdamp70, fdamp55, rdamp85, rdamp70 e rdamp55). A diminuição da rigidez das molas (allspr95, allspr90 e allspr85) não aumenta o desempenho, pois essas acabam por fazer os batentes trabalharem em velocidades mais baixas.

Figura 52 - Índice de desempenho final da força de contato (Grupo 1).

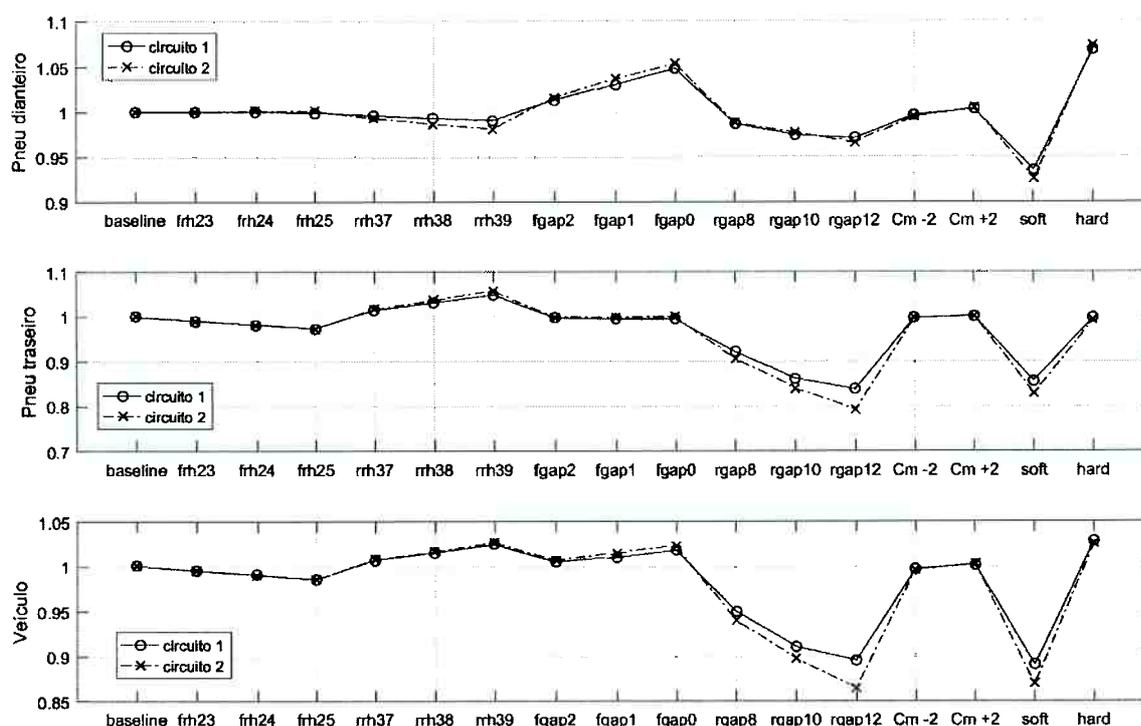
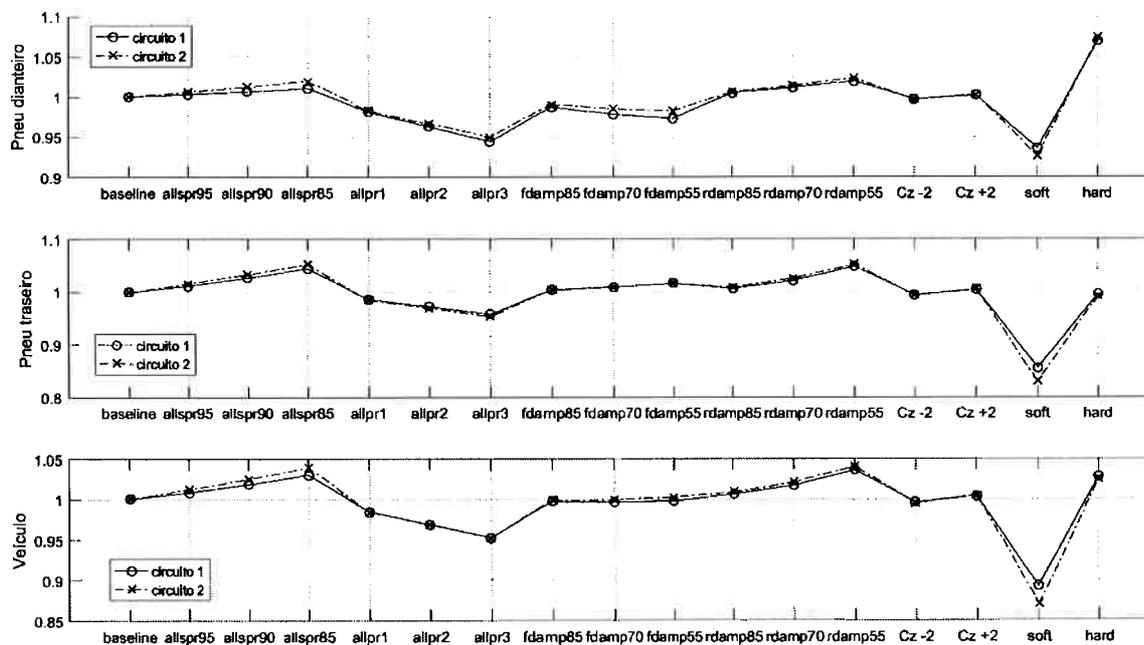


Figura 53 - Índice de desempenho final da força de contato (Grupo 2).

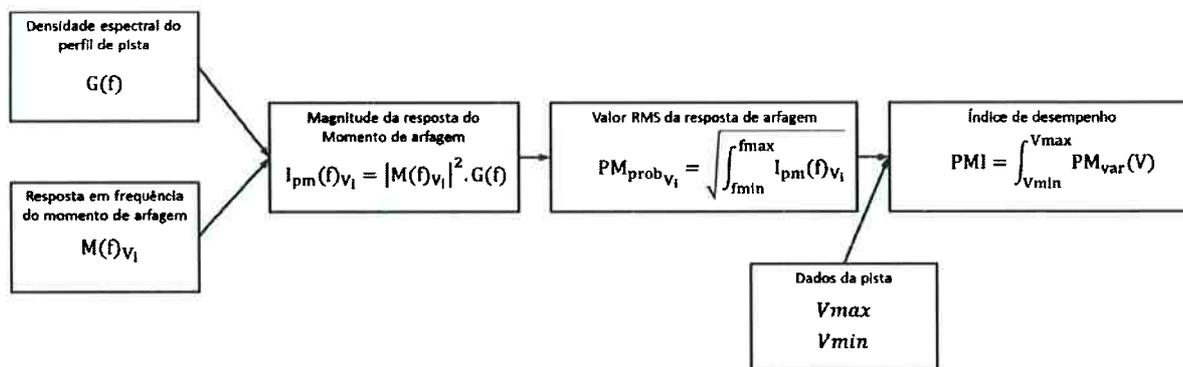


Para a força de contato dos pneus, a não linearidade mais significativa é a imposta pelos batentes de suspensão (devido ao aumento significativo do valor r.m.s. apresentado na Figura 45), provando assim a necessidade de utilizar esses componentes nos testes experimentais, diferentemente da atual abordagem utilizada pela indústria.

## 8.2 SENSIBILIDADE E DESEMPENHO AERODINÂMICO

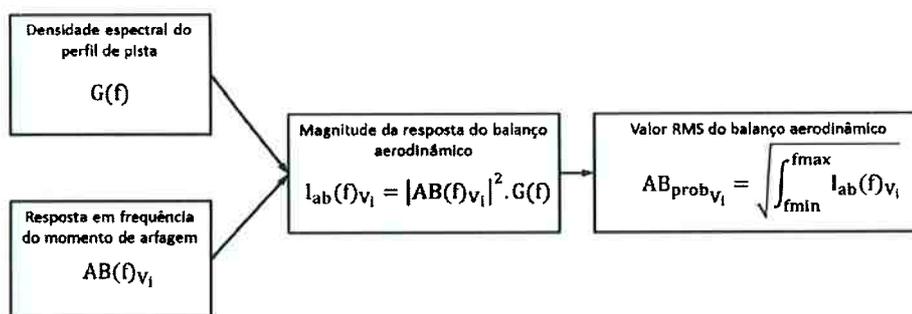
O índice de sensibilidade e desempenho aerodinâmico calcula a variabilidade do momento de arfagem de uma configuração do veículo em uma faixa de velocidade específica. A abordagem utilizada para o cálculo do índice é a mesma do índice de desempenho da força de contato entre pneu e solo utilizada no item anterior, mudando as funções de transferência. A Figura 54 apresenta a sequência de cálculo.

Figura 54 - Sequência de cálculo do índice de desempenho de momento de arfagem.



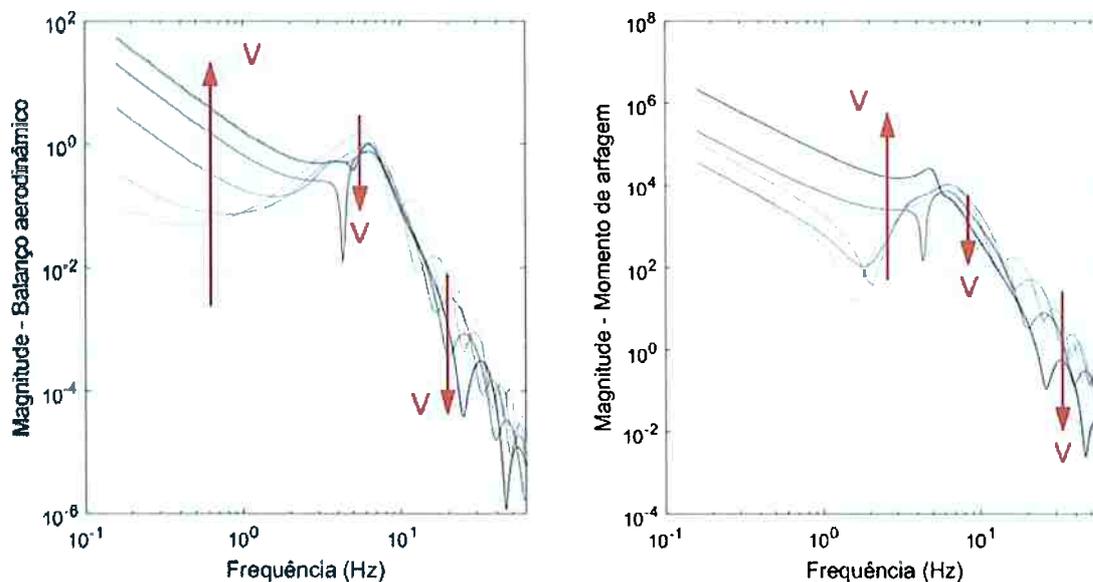
Foi calculado também um índice de desempenho relacionado ao balanço aerodinâmico devido ao fato de esse parâmetro ser utilizado com frequência pela indústria. Foi demonstrado que, na análise da resposta em frequência, esse parâmetro não é um indicador eficiente de desempenho, sendo o momento de arfagem superior. A Figura 55 apresenta a sequência de cálculo desse índice de desempenho.

Figura 55 - Sequência de cálculo do índice de desempenho de balanço aerodinâmico.



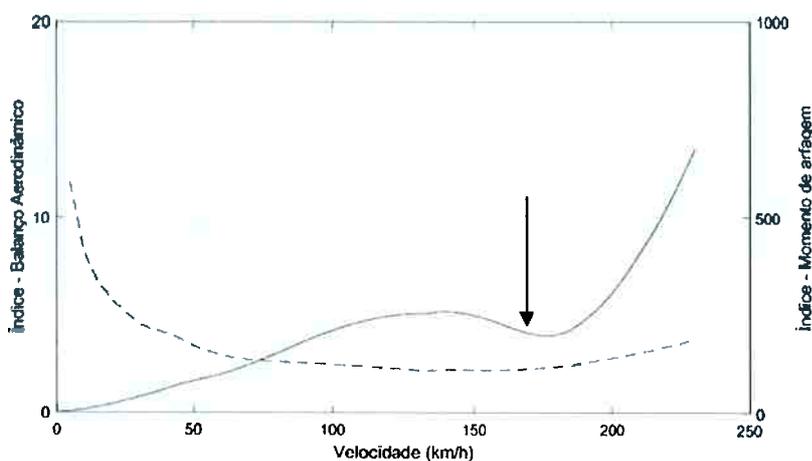
A Figura 56 apresenta o ganho do balanço aerodinâmico e do momento de arfagem, ambos calculados com o mesmo perfil de pista utilizado no cálculo do índice de desempenho da força de contato. Ambas as funções apresentam forma similar, porém a magnitude do momento de arfagem aumenta com a velocidade, enquanto o balanço aerodinâmico diminui.

Figura 56 - Ganho do balanço aerodinâmico e do momento de arfagem (curvas mais escuras representam velocidades mais altas).



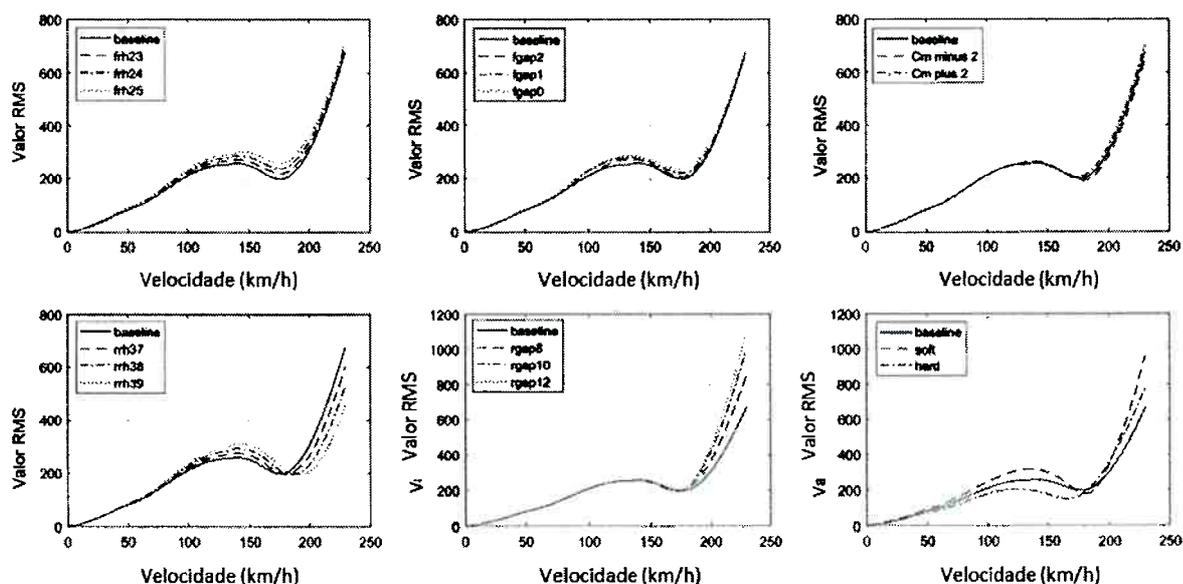
A Figura 57 apresenta a integral do ganho do balanço aerodinâmico e do momento de arfagem em função da velocidade. A inflexão na curva de momento de arfagem é causada pelo estol do difusor e não é observada na integral do balanço aerodinâmico. Esse comportamento aerodinâmico é de extrema importância para o veículo. Conforme explicado anteriormente, o fato do momento de arfagem ser uma combinação da sustentação negativa com a posição do centro de pressão (balanço aerodinâmico) implica um melhor indicador da variância do comportamento aerodinâmico do veículo.

Figura 57 - Índice de desempenho do balanço aerodinâmico (tracejado) e do momento de arfagem (linha contínua).



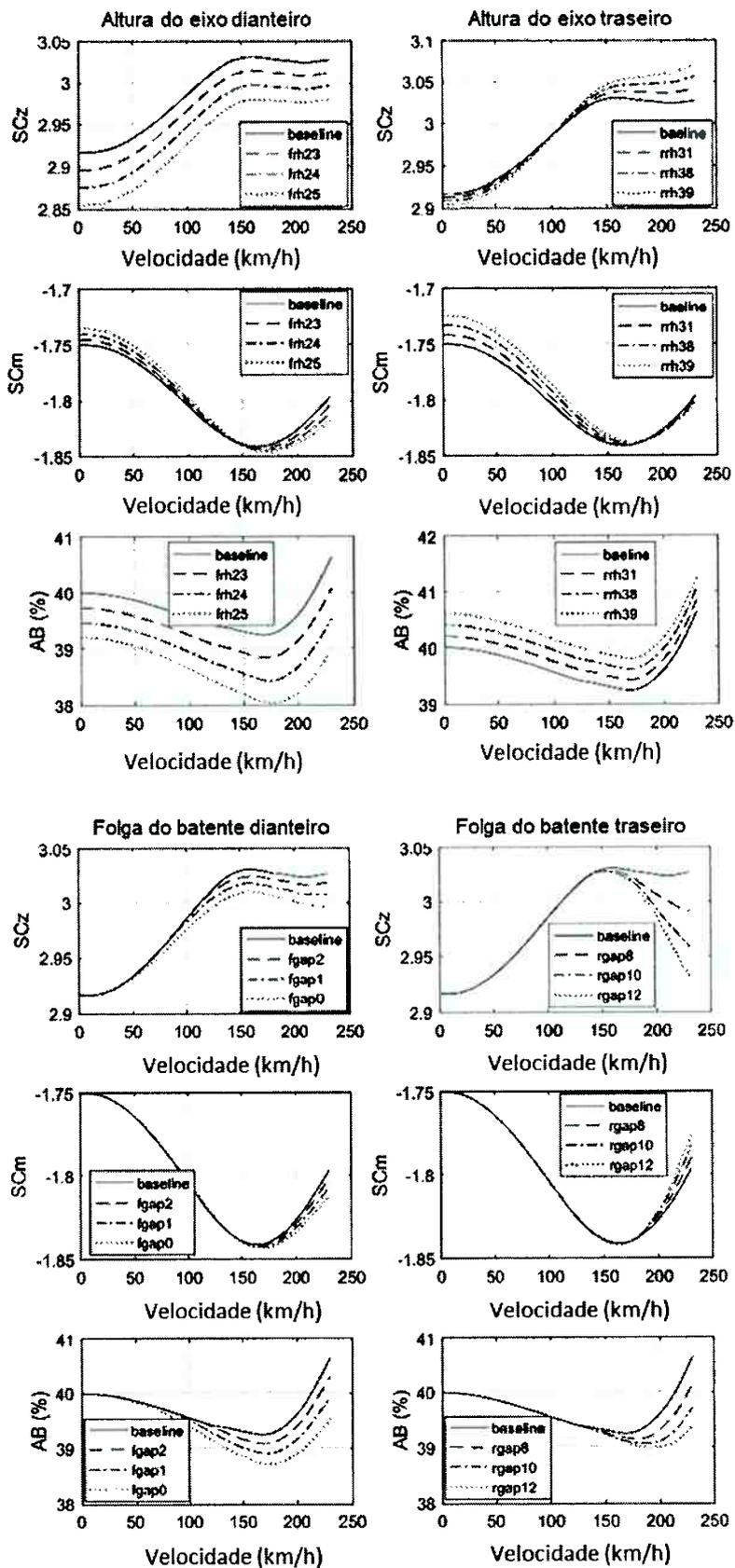
De maneira a avaliar a eficácia do índice de desempenho, foi realizada uma análise de sensibilidade comparando diferentes configurações do veículo (as mesmas analisadas com a força de contato dos pneus, grupos 1 e 2). Na Figura 58, é apresentada a sensibilidade dos índices.

Figura 58 - Análise de sensibilidade do índice de desempenho (Grupo 1).



A Figura 59 mostra os coeficientes aerodinâmicos (sustentação negativa, momento de arfagem e balanço aerodinâmico) para as diferentes configurações testadas anteriormente. O estol do difusor comentado anteriormente é facilmente notado no gráfico do coeficiente de sustentação negativa para as diversas alturas do eixo traseiro. Enquanto o balanço aerodinâmico varia 2,5%, o coeficiente de arfagem varia 5,7%. Um outro ponto importante é que, apesar de o coeficiente de arfagem sofrer pequenas modificações em altas velocidades, o momento em si é amplificado pelo quadrado da velocidade, tendo uma influência maior.

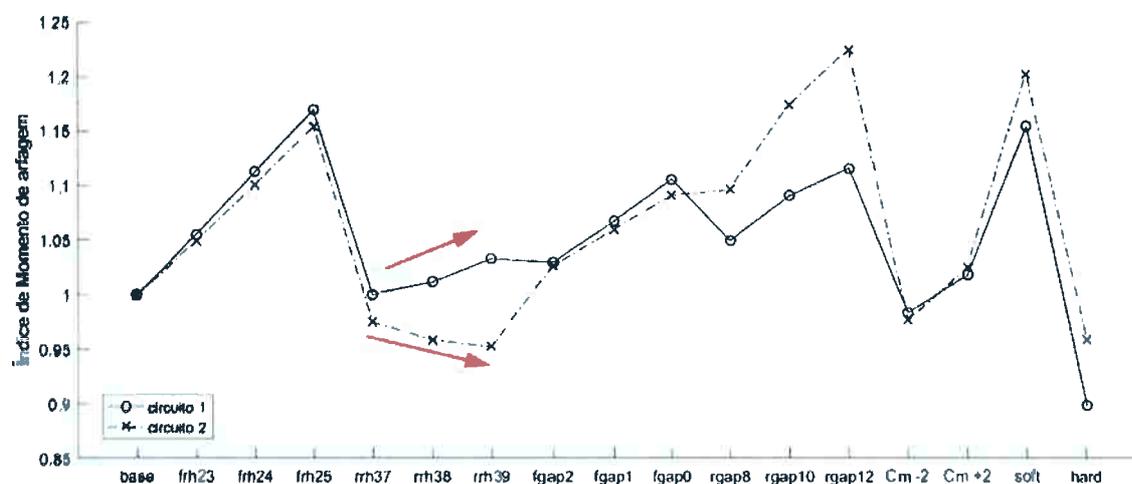
Figura 59 - Análise de sensibilidade dos coeficientes aerodinâmicos.



Integrando os índices previamente calculados para diferentes configurações do veículo em diferentes faixas de velocidade, é possível comparar o impacto de cada uma dessas configurações no desempenho de um determinado circuito.

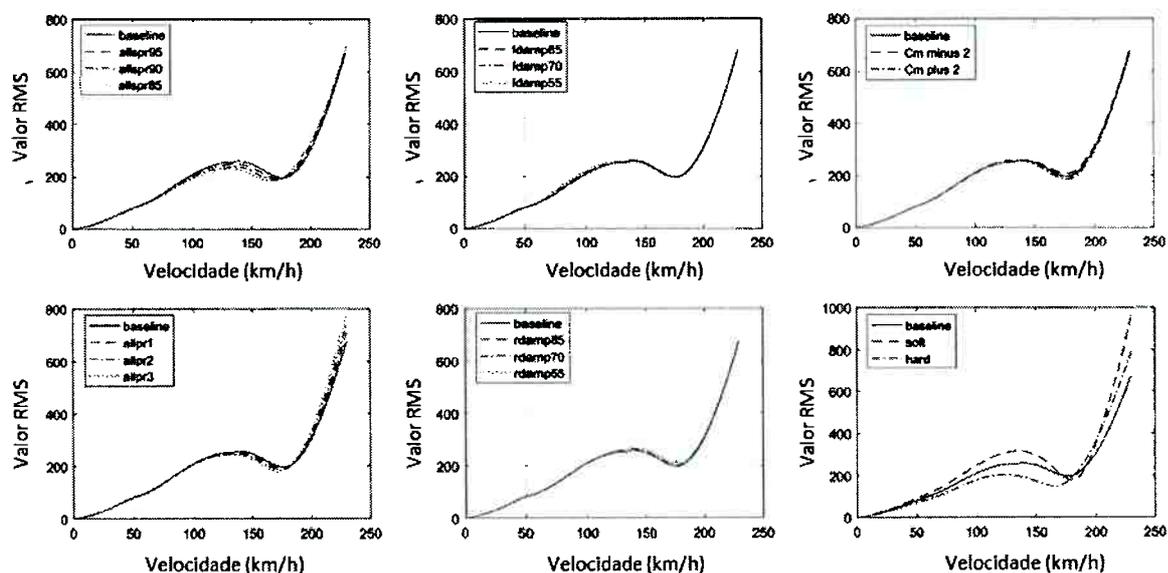
A Figura 60 apresenta a integral do índice de desempenho para os circuitos 1 e 2. A altura do eixo traseiro (rh37, rh38 e rh39) tem influência positiva para o circuito 2 e negativa para o circuito 1 devido às diferentes faixas de velocidades a que o veículo será submetido.

Figura 60 – Integral do índice de sensibilidade e desempenho aerodinâmico para diferentes configurações do veículo (Grupo 1).



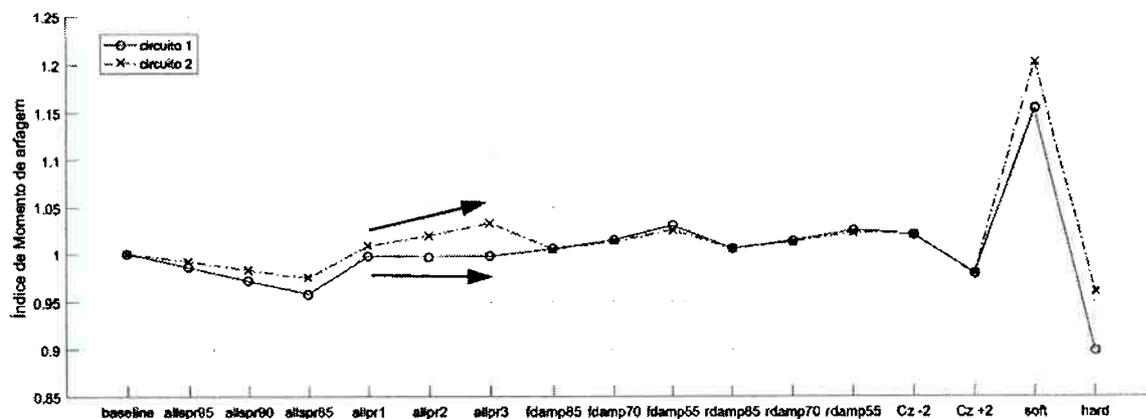
A Figura 61 apresenta a sensibilidade do índice com a variação da rigidez das molas (allspr95, allspr90 e allspr85), da pressão dos pneus (allpr1, allpr2 e allpr3), dos fatores de amortecimento (fdamp95, fdamp70, fdamp55, rdamp85, rdamp70 e rdamp55) e com a variação de +/-2% no coeficiente de arfagem (Cm minus2 e Cm plus 2) – configurações do Grupo 2.

Figura 61 – Análise da sensibilidade do índice de desempenho (Grupo 2).



Assim como na Figura 60, a Figura 62 apresenta o cálculo da integral do índice de desempenho para duas faixas de velocidades diferentes. Nela, a influência da pressão dos pneus (allpr1, allpr2 e allpr3) se mostra com diferente impacto entre os circuitos 1 e 2. Como esperado, a configuração rígida apresenta menos variabilidade do momento de arfagem do que a configuração flexível (*soft*), devido às menores amplitudes dos movimentos da massa suspensa.

Figura 62 – Integral do índice de sensibilidade e desempenho aerodinâmico para diferentes configurações do veículo (Grupo 2).



Além das diferenças do índice de desempenho de arfagem já mostradas nos gráficos anteriores, a integral do índice de desempenho mostra claramente a diferença entre as configurações de forma objetiva e simples, além de ressaltar a influência da velocidade, mostrando que diferentes faixas afetam as diferentes configurações de forma diferente.

### 8.3 ÍNDICE DE DESEMPENHO FINAL

Utilizando os índices de desempenho da força de contato dos pneus e do momento de arfagem, foi desenvolvida uma equação que pode ser interpretada como uma das possíveis maneiras de calcular um índice combinado (proposição), aqui denominado índice de desempenho final (IDF). Esse índice utiliza a força de contato dos pneus como um indicador de aderência mecânica e o índice aerodinâmico como um indicador de sensibilidade e desempenho aerodinâmico.

O cálculo desse índice é a soma ponderada dos valores relativos dos índices apresentados anteriormente. Essa ponderação é em função do valor relativo do carregamento aerodinâmico médio do circuito em relação ao carregamento vertical total. Quanto maior a influência da aerodinâmica no carregamento total, maior a influência do índice de sensibilidade e desempenho aerodinâmico.

As Equações (83) e (84) apresentam como esse índice foi calculado:

$$IDF = \left[ \left( \frac{F_t - F_a G_n}{F_t} \right)_{v \text{ med das curvas}} \left( \int_{v \text{ min}}^{v \text{ max}} \frac{CPL_{prob}(V)}{CPL_{prob \text{ ref}}} \right) \right] + \left[ \left( \frac{F_a G_n}{F_t} \right)_{v \text{ med das curvas}} \left( \int_{v \text{ min}}^{v \text{ max}} \frac{PM_{prob}(V)}{PM_{prob \text{ ref}}} \right) \right] \quad (84)$$

$$F_t = F_{estático} + G_n F_a \quad (85)$$

O valor da carga aerodinâmica de referência ( $F_a$ ) é calculado utilizando o coeficiente de sustentação negativa médio durante uma volta no circuito e a velocidade é a média das velocidades mínimas de cada uma das curvas do circuito. O índice foi calculado utilizando o ganho aerodinâmico igual a 1.

O índice de desempenho final, apresentado para todas as configurações testadas nas Figuras 63 e 64 (Grupo 1 e Grupo 2 respectivamente), mostra que a velocidade longitudinal a que cada circuito submete o veículo é um fator importante para ponderar as modificações das configurações e avaliar os seus efeitos no desempenho final do veículo.

Figura 63 – Sensibilidade do índice de desempenho final (Grupo 1).

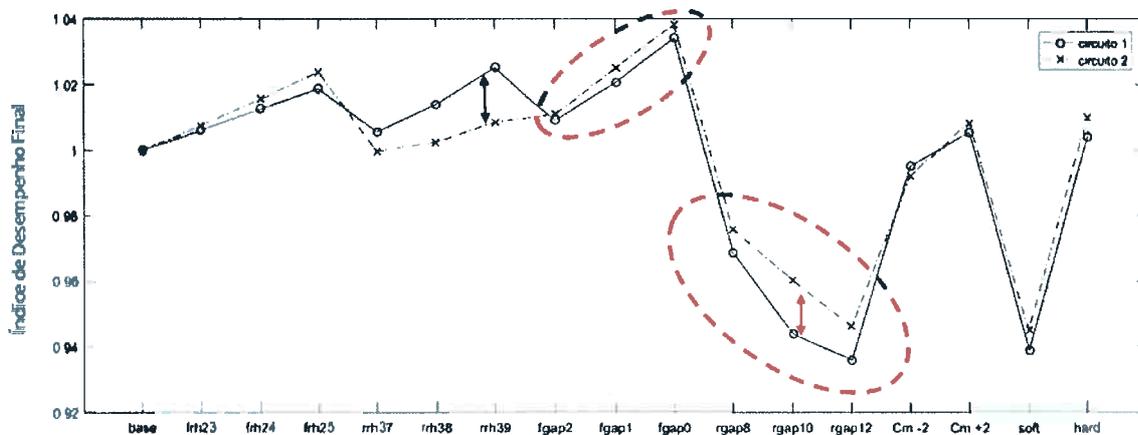
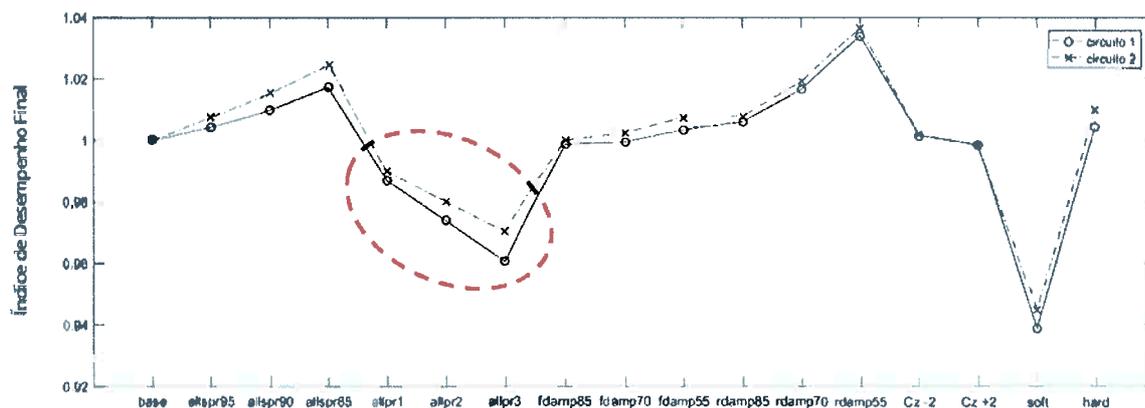


Figura 64 – Sensibilidade do índice de desempenho final (Grupo 2).



Os parâmetros com maior influência são relativos às folgas dos batentes (fgap e rgap) e pressão dos pneus (allpr). Os parâmetros que apresentam maior sensibilidade à mudança de circuito são os relativos à suspensão traseira (rrh e rgap). Isso acontece devido à mesma configuração ter sido utilizada em ambos os circuitos e ao fato de o carro trabalhar em faixas de velocidade distintas em cada um deles. Dessa forma, o impacto do estol do difusor influenciará de maneira diversa.

O veículo estudado pode atingir a velocidade máxima de 260 km/h. Outros veículos do tipo Formula em categorias ainda semiprofissionais podem atingir velocidades máximas em torno de 330 km/h, o que implica uma maior influência das forças aerodinâmicas e, potencialmente, sua análise portará mais configurações com influência oposta no desempenho de acordo com a faixa de velocidade estudada. Este fato amplifica os resultados obtidos nesse estudo de caso. Infelizmente, uma

extrapolação para velocidades mais altas, utilizando o mesmo modelo, não seria realista, pois os veículos do tipo Formula que atingem essas elevadas velocidades possuem diferentes parâmetros de suspensão, sensibilidade aerodinâmica e etc. Dessa forma, seria necessária uma nova calibração e validação do modelo.

## 9 CONCLUSÕES

*“Make the suspension adjustable and they will adjust it wrong – look what they can do to a Weber carburetor in just a few moments of stupidity with a screwdriver.”*

(Colin Chapman)

Neste trabalho, foi apresentado um modelo analítico descrevendo a interação entre o sistema de suspensão e a aerodinâmica. O modelo elaborado foi validado por comparação com resultados experimentais obtidos em pista de teste com o veículo instrumentado. Os resultados obtidos permitem confirmar a representatividade do modelo elaborado.

Este trabalho demonstra que os veículos monopostos do tipo Formula, independente do fabricante e da categoria, apresentam comportamento aerodinâmico muito semelhante (conforme apresentado no Apêndice A). Esse comportamento pode ser modelado através de regressões polinomiais multivariáveis, para o comportamento em regime permanente, e podem ser utilizados em regime transiente se linearizados e usados em conjunto com a abordagem de ângulo de ataque quase-estático.

Como as forças aerodinâmicas são dependentes da velocidade e da atitude do veículo, ficou demonstrado que elas criam rigidez e amortecimento aerodinâmico. Esses parâmetros são dependentes do ponto de linearização e variam com o aumento da velocidade, podendo provocar instabilidade no veículo.

As elevadas cargas aerodinâmicas requerem que o sistema de suspensão utilize elementos não lineares que adequem o valor de rigidez. Foi demonstrado que esses elementos são importantes para o correto funcionamento do sistema e não podem ser desconsiderados na análise da resposta do sistema, diferentemente da técnica atualmente utilizada pela indústria.

Um modelo clássico de meio veículo foi utilizado para quantificar a influência dessas características no comportamento dinâmico do veículo. Tanto as não linearidades das forças aerodinâmicas quanto do sistema de suspensão foram usadas nessa análise.

O modelo foi validado utilizando uma técnica padrão da indústria do esporte motorizado. Essa técnica utiliza as curvas de deslocamento da suspensão em função

da velocidade longitudinal em situação de movimento em linha reta para validar a rigidez da suspensão e as forças aerodinâmicas. Apesar da técnica ser amplamente utilizada, ela nunca tinha sido publicada no meio acadêmico. Além dessa abordagem que valida a situação em regime quase-estático, o modelo foi validado quanto aos seus principais modos de vibrar.

O uso de um modelo linearizado das forças aerodinâmicas e da rigidez dos sistemas de suspensão no ponto de operação (velocidade fixa) se mostrou eficaz para caracterizar a dinâmica do sistema em regime transiente. Comparado com as técnicas atuais de laboratório, nas quais a atitude do veículo é corrigida conforme o carregamento aerodinâmico, mas sem considerar a influência das forças aerodinâmicas na rigidez e amortecimento, a presente abordagem se mostra mais prática e condizente com o comportamento em campo.

Foram propostos três índices de desempenho de dinâmica vertical: um para a força de contato entre o pneu e o solo, outro para o desempenho aerodinâmico e um terceiro índice combinando os dois anteriores. Esses índices foram calculados utilizando um procedimento inédito, que além de incluir as não linearidades do sistema, inclui características do circuito em que o veículo irá competir, mostrando-se mais representativo do que os índices genéricos atualmente utilizados.

O índice de força de contato, após análise de sensibilidade de diversas configurações do veículo, se mostrou menos sensível a diferentes faixas de velocidades em comparação ao índice de desempenho aerodinâmico.

Entretanto, o índice de sensibilidade e desempenho aerodinâmico, após a varredura de diversos parâmetros que influenciam, na prática, o comportamento do veículo, se mostrou bastante sensível às modificações de configuração, assim como à sensibilidade dessas configurações à faixa de velocidade. Algumas configurações apresentaram tendências distintas de acordo com a faixa de velocidade imposta pelo circuito.

O índice de desempenho final se mostrou útil como ferramenta de seleção da configuração, assim como ferramenta elucidativa para compreender o comportamento do veículo. Os resultados foram condizentes com o observado em campo no que diz respeito à comparação entre um veículo com suspensão de baixa (*soft*) e elevada (*hard*) rigidez e com a pressão dos pneus (efeito da rigidez vertical).

Uma das características mais interessantes encontradas é que, apesar do estol do difusor acontecer próximo ao eixo traseiro, ambos os eixos apresentam tendência

à instabilidade com o aumento da velocidade. No exemplo analisado, o fator de amortecimento se reduziu a menos de 50% do valor inicial para o balanço traseiro. O veículo analisado se manteve estável durante toda a faixa de velocidade imposta. Veículos de outras categorias, por exemplo, FIA Formula 2 e *Indy Lights*, atingem velocidades muito superiores à estudada (em torno de 350 km/h), podem apresentar os efeitos mostrados potencializados e, possivelmente, atingir situações instáveis.

Apesar da análise em regime transiente ser importante, a escolha da rigidez da suspensão (mola, batente e folga do batente) deve ser feita utilizando os resultados das simulações em regime quase-estático devido à altura mínima do veículo em relação ao solo. Os índices podem ser utilizados para pequenas variações da rigidez do sistema e folga dos batentes, porém eles são de maior utilidade para a calibração dos amortecedores.

O fato de que os índices propostos podem ser calculados para uma faixa específica de velocidade faz deles uma ferramenta que pode ser customizada de acordo com o circuito. Outra característica conveniente é a de utilizar diferentes geometrias de pista, mesmo quando não se tem os valores reais. É sabido, por exemplo, que um circuito de rua apresentará um perfil mais irregular do que um circuito fechado dedicado a competições automobilísticas, sendo possíveis algumas extrapolações.

Os índices propostos foram calculados utilizando um programa de simulação, porém eles poderiam também ser verificados em ensaios de laboratório com algumas modificações nas funções de entrada, discernindo as entradas da pista das entradas aerodinâmicas, e reproduzindo assim os fenômenos de rigidez e amortecimento aerodinâmico.

Entre as possíveis investigações futuras, encontram-se: o modelamento da histerese do batente de suspensão, a utilização de um modelo de pneu incluindo o comportamento termomecânico, um estudo de otimização do índice em respeito a forças de amortecimento não lineares e a inclusão da geometria e irregularidades da pista medidas experimentalmente. Outros movimentos da carroceria também podem ser incorporados nesse tipo de análise, por exemplo, a influência da rolagem nos coeficientes aerodinâmicos.

Com o futuro desenvolvimento das ferramentas da análise do comportamento aerodinâmico em regime transiente, uma proposta de cossimulação entre um modelo

multicorpos e um modelo em volume finito pode gerar resultados interessantes e inéditos.

Esse trabalho envolveu o Laboratório de Dinâmica e Simulação Veicular (LSDV) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e o grupo de Engenharia Automotiva da Universidade de Brescia na Itália. Ele também gerou três publicações, sendo uma em congresso e duas em revista técnica indexada. São elas:

1. MARCHESIN, F. P.; BARBOSA, R. S.; ALVES, M. A. L.; GADOLA, M.; CHINDAMO, D.; BENINI, C. Upright Mounted Pushrod: The effects on race car handling dynamics. **24th International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks**. Graz, Austria, 2015.
2. BENINI, C.; GADOLA, M.; CHIDAMO, D.; UBERTI, S.; MARCHESIN, F. P.; BARBOSA, R. S. The influence of suspension components friction on race car vertical dynamics. **Vehicle System Dynamics**, v. 55, n. 3, p. 338-350, 2017.
3. MARCHESIN, F. P.; BARBOSA, R. S.; GADOLA, M.; CHINDAMO, D. High downforce racecar vertical dynamics: aerodynamic index. **Vehicle System Dynamics**, v. 56, n. 8, p. 1269-1288, 2018.

## REFERÊNCIAS<sup>23</sup>

- AIM. **Data acquisition kit EVO3 Pro for Dallara F308**. Itália: AIM Srl, 2008.
- ASCHWANDEN, P.; MULLER, J.; KNORNSCHILD, U. **Experimental Study on the Influence of Model Motion on the Aerodynamic Performance of a Race Car**. Vehicle Aerodynamics 2006. Detroit, Michigan: SAE, 2006.
- ASCHWANDEN, P. et al. The Influence of Motion Aerodynamics on the Simulation of Vehicle Dynamics. **SAE Paper 2008-01-0657**, 2008.
- BARBOSA, R. S.; NETO, A. C. **Safety Traffic Speed Limit**. 9th International Conference on Dynamic Problems in Mechanics. Florianópolis: ABCM, 2001.
- BARCELO, J. D. P. **Optimisation of Racing Car Suspensions featuring Inerters**. 2012. 301 f. PhD Thesis (Doctor of Philosophy) - Department of Mechanical Engineering and Mathematical Sciences, Oxford Brookes University, Oxford, 2012.
- BENINI, C.; GADOLA, M.; CHIDAMO, D.; UBERTI, S.; MARCHESIN, F. P.; BARBOSA, R. S. The influence of suspension components friction on race car vertical dynamics. **Vehicle System Dynamics**, v. 55, n. 3, p. 338-350, 2017.
- BLANES, T. B.; MARCELO, I. S.; SCALABRONI, E. **On the influence of transient aerodynamic heave vibrations on racing car suspension parameters: quarter car sample**, 2017.
- CAMBIAGHI, D.; GADOLA, M.; VETTURI, D. **Suspension System Testing and Tuning with the Use of a Four-Post Rig**. SAE: SAE, 1998.
- SMACBUMP. **SMACBUMP by SMAC user manual**. Signes (FR).
- DALLARA. **Formula Renault 3.5 2005 Chassis user manual**. Italy. 2005.
- \_\_\_\_\_. **GP2 2008 USER MANUAL**. Italy. 2008.
- \_\_\_\_\_. **F309\_spreadsheet**. Italy: Excel spreadsheet for setup. 2009.
- \_\_\_\_\_. **GP2 2011 AERO SETUP**. Italy: Excel spreadsheet for aerodynamic setup. 2010.
- \_\_\_\_\_. **Dallara F312 Spreadsheet**. Italy: Excel spreadsheet for setup. 2012a.
- \_\_\_\_\_. **F312 User manual**. Italy. 2012b.
- \_\_\_\_\_. **F3 Spain Aerobook**. Italy: Excel spreadsheet for aerodynamic setup. 2017.

---

<sup>23</sup> De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 6023).

DOMINY, J. A.; DOMINY, R. G. Aerodynamic influences on the performance of the Grand Prix racing car. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D: Automobile Engineering**, v. 198D, n. 7, p. 87-93, 1984.

DONISELLI, C.; MASTINU, G.; GOBBI, M. Aerodynamic Effects on Ride Comfort and Road Holding of Automobiles. **Vehicle System Dynamics**, v. Supplement 25, 1996.

ETKIN, B. **Dynamics of Atmospheric Flight**. Dover Publisher, 2005.

EWIN, D. J. **Modal Testing, Theory, Practice, and Application**. 2nd ed. Batsford, Hertfordshire, England: Research Studies, 2000.

FLOYD, R.; LAW, E. **Simulation and Analysis of Suspension and Aerodynamic Interactions of Race Cars**. Motorsport Engineering Conference & Exposition: SAE. SAE Paper 942537, 1994.

FORGHIERI, M. **Capire la Formula 1 - I segreti della sua evoluzione dagli anni '60 a oggi**. Bologna: Minerva, 2017.

GADOLA, M. et al. Riproduzione dello spettro di sollecitazione agente su un veicolo nell'impiego stradale attraverso l'utilizzo di un dispositivo four-poster in prove indoor. **XVI Congresso AIMETA di Meccanica Teorica e Applicata**, 2003.

GENTA, G.; MORELLO, L. **The Automotive Chassis Vol. 2: System Design**. Springer, 2009.

GILLESPIE, T. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. SAE, 1992.

GT SPORT. **F317 Dallara Piedrafita - Owner's Manual / Manual de Usuario**. GT Sport Organization. 2017

ISO. **ISO2631: Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration**: ISO: 1997. 31 p.

\_\_\_\_\_. **ISO 7401 - Road vehicles - Lateral transient response test methods - Open-loop test methods**: International Organization for Standardization, 2003.

KASPRZAK, J. L.; FLOYD, R. S. Use of simulation to tune race car dampers. **SAE Paper 942504**, 1994.

KATZ, J. **Racecar aerodynamics**. Robert Bentley, 1995.

KELLY, J.; KOWALCZYK, H.; ORAL, H. Track Simulation and Vehicle Characterization with 7 Post Testing. **Motorsport Engineering Conference & Exhibition**, SAE, 2002.

KOUROS, M. **Conversa informal sobre o desenvolvimento de sistemas de suspensão para Formula 3**. 2017.

KOWALCZYK, H. Damper tuning with use of a seven post shaker rig. SAE 2002 World Congress. Detroit Michigan. **SAE Paper 2002-01-0804**, 2002.

LUCA, M. D. **The "nightmare" of aerodynamic calibration in F1.** Bernoulli Magazine. UK, 2014.

MAGENETI MARELLI. **Catalogue - Racing Ahead 2017.** 2017. 199 p.

MARCHESIN, F. P. **Análise de desempenho de veículos do tipo Formula.** 2012. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

MARCHESIN, F. P.; BARBOSA, R. S.; ALVES, M. A. L.; GADOLA, M.; CHINDAMO, D.; BENINI, C. Upright Mounted Pushrod: The effects on race car handling dynamics. **24th International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks.** Graz, Austria, 2015.

MARSHAL, J. **Conversa informal sobre as técnicas de medição utilizadas nos túneis de vento de Formula 1 anos 80.** 2017.

MAVROUDAKIS, B. **About the simulations of Formula 1 Racing Cars.** Intiute of Engineering and Computational Mechanic, University of Stuttgart, 2010.

MCBEATH, S. **Speed matters.** Racecar engineering. England. 22 2012.

MCCORMICK, B. W. **Aerodynamics Aeronautics and Flight Mechanics.** 2nd edition. John Wiley & Sons, 1995.

METZ, L. D. Aerodynamic Properties of Indy Cars. **SAE Paper 870726,** 1987.

MILLIKEN, W. F.; MILLIKEN, D. **Racecar Vehicle Dynamics.** SAE, 1995.

MILLIKEN, W. F.; MILLIKEN, D. L.; OLLEY, M. **Chassis Design: Principles and Analysis.** SAE International, 2002.

MILLIKEN, W. F.; WHITCOMB, D. W.; SEGEL, L. **Research in automobily stability and control and in tyre performance:** The Institution of Mechanical Engineers, 1956.

MITSCHE, M.; WALLENTOWITZ, H. **Dynamik der Kraftfahrzeuge.** Springer, 2004.

MOLINA, J.; ZHANG, X. Aerodynamic of a Heaving Airfoil in Ground Effect. **AIAA Journal,** v. 49, n. 6, p. 12, 2011.

MOLINA, J.; ZHANG, X.; ANGLAND, D. On the unsteady motion and stability of a heaving airfoil in ground effect. **Acta Mechanica Sinica,** v. 27, n. 2, p. 15, 2011.

MTS. **Motorsport Testing Solutions,** Product Catalog. 2010.

MÜHLMEIER, M. **Multiobjective Optimization of race car vehicle dynamics.**

MULTIMATIC. **A note on the use of four post test rigs.** 1998. 20 p.

MYGALE. **M08-F3 User Manual**. France. 2008a.

\_\_\_\_\_. **Mygale M08-F3 v1 User Manual**. Mygale Racing Car Constructor. França: Magny Cours, 2008b.

\_\_\_\_\_. **Mygale M09 spreadsheet**. 2009.

NEW, T. M. **Random Road Analysis and Improved Gear Ratio Selection of a Front Wheel Drive Drag Racing Car**. 2008. 156 f. Thesis (Master of Science). Clemson University, Clemson, 2008.

NOWLAN, D. **The Dynamics of the Race Car**. e-book. 2010.

PIOGGIA. **Formula 1 2008-2009: Technical Analysis**. Giorgio Nada.

RILL, G. **Vehicle Dynamics - Short Course**. Unicamp, Brasil, p. 190. 2007.

RUHRMANN, A.; ZHANG, X. Influence of Diffuser Angle on BluffBody in Ground Effect. **Journal of Fluids Engineering**, v. 125, 2003.

SMITH, M. C. Synthesis of Mechanical Networks: The Inerter. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 47, n. 10, p. 15, 2002.

TATUUS. **FA010 2010 Workshop Manual**. Italy. 2010.

\_\_\_\_\_. **Formula Renault 2.0 - User Manual - B. Chassis**. Renault. 2013.

THEODORSEN, T. **General Theory of Aerodynamic Instability and the Mechanism of Flutter**. NACA, 1935

WRIGHT, P. The Influence of Aerodynamics on the design of Formula One Racing Cars. **International Journal of Vehicle Design**, v. 3, n. 4, nov. 1982.

\_\_\_\_\_. **Formula 1 Technology**. 1st ed. SAE, 2001.

## **APÊNDICE A - Aerodinâmica de veículos de competição**

O apêndice apresentado a seguir é uma compilação feita pelo autor de dados de túnel de vento de diversos veículos de competição do tipo Formula. A maioria desses dados são confidenciais e por isso eles são apresentados sem identificar o modelo de veículo e sem explicitar seus valores.

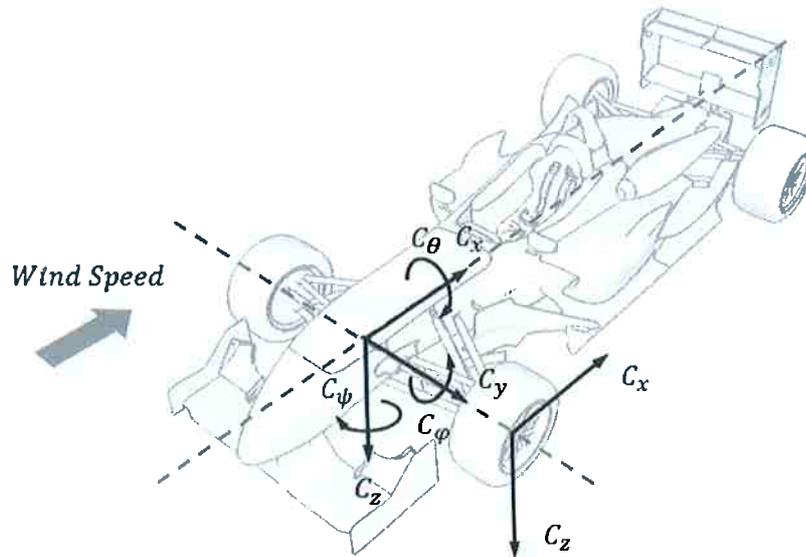
Esse trabalho permitiu ao autor não somente utilizar os dados fornecidos por um fabricante de forma singular, mas também compreender o comportamento aerodinâmico e a influência de diversos parâmetros de forma genérica. Isso foi essencial para garantir que os índices de desempenho desenvolvidos possuam impacto em qualquer tipo de veículo do tipo Formula e não somente no veículo de estudo.

### **1 SISTEMA DE COORDENADAS**

O sistema de coordenadas utilizado para representar as forças aerodinâmicas é diferente do utilizado para representar as equações de movimento do veículo. A dinâmica de voo (disciplina que estuda a dinâmica de aviões e helicópteros) também utiliza a mesma abordagem: um sistema de coordenadas para as equações de movimento e outro para as forças aerodinâmicas. Dessa maneira, ela permite que diferentes veículos possam ser comparados de forma direta, sem a necessidade da transformação do sistema de coordenadas.

A origem do centro de coordenadas é o centro do eixo dianteiro na altura do assoalho, ou de sua projeção. O eixo "x" aponta para trás, "y" para a esquerda e "z" para baixo, conforme apresentado na Figura 65.

Figura 65 – Sistema de coordenadas das forças aerodinâmicas proposto pelo autor.



De maneira a reduzir o número de termos nas equações, a densidade do ar e a velocidade do escoamento serão computadas juntas como pressão dinâmica, apresentada na Equação (85).

$$p = \text{dynamic pressure} = \frac{1}{2}\rho \cdot V^2 \quad (86)$$

A temperatura e as condições do ambiente são importantes para a correta seleção da configuração do veículo. Porém, neste trabalho, as condições climáticas serão sempre consideradas constantes.

A área de referência para o cálculo das forças e momentos aerodinâmicos foi um argumento discutido nos anos oitenta e algumas abordagens foram propostas (METZ, 1987). Porém, atualmente não se faz distinção entre a área frontal e o coeficiente aerodinâmico. O parâmetro utilizado como coeficiente é o produto entre ambos. Essa abordagem é muito eficiente, tendo em vista que diferentes configurações de um mesmo veículo podem alterar a área frontal, o que tornaria o trabalho bastante exaustivo, já que seria necessária uma tabela correlacionando a área frontal de uma configuração com o coeficiente aerodinâmico<sup>24</sup>.

<sup>24</sup> No passado, alguns autores utilizavam a variação de área frontal para fazer o comparativo entre diferentes configurações aerodinâmicas (BENZING, 2010), porém essa não é mais a abordagem utilizada.

A Equação (86) a seguir apresenta como são calculados os coeficientes compostos pelo coeficiente de sustentação negativa vezes a área frontal. A mesma abordagem é feita para os demais coeficientes aerodinâmicos.

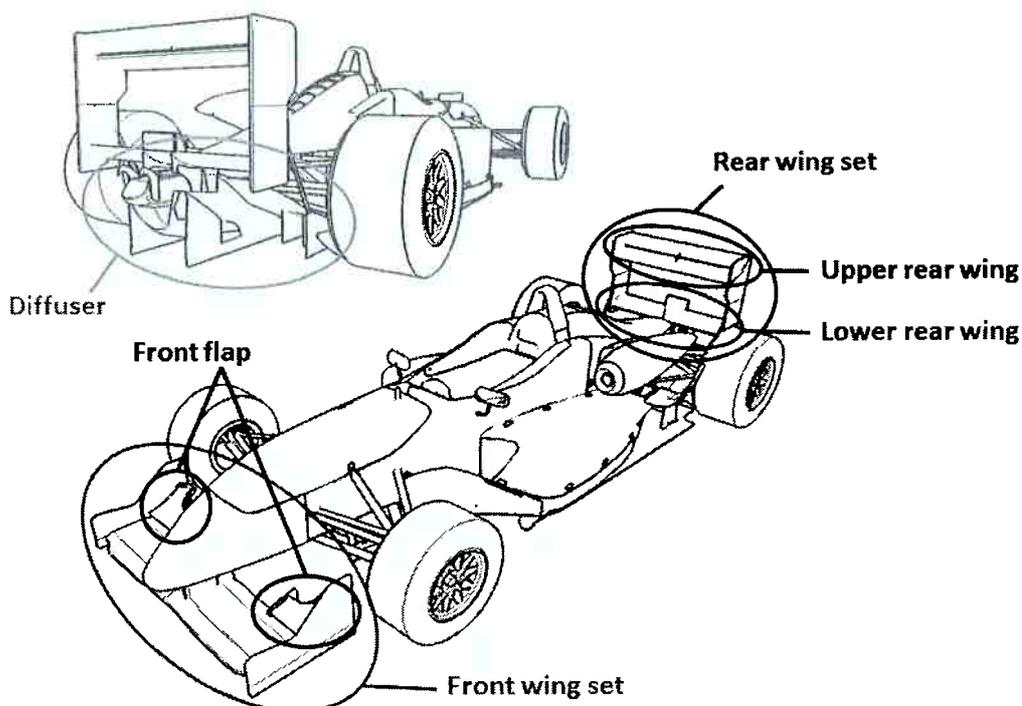
$$SC_z = \frac{2F}{\rho \cdot v^2} \quad (87)$$

Dessa forma, durante todo este trabalho, para simplificar as equações, a área frontal será considerada 1 m<sup>2</sup>, podendo, assim, ser desconsiderada.

## 2 CONFIGURAÇÃO AERODINÂMICA

Veículos de competição monostos do tipo Formula possuem três principais fontes geradoras de sustentação negativa: conjunto de asa dianteira (normalmente composto por uma asa e um *flap* de cada lado), conjunto de asa traseira (que pode ser composto por mais de uma asa) e difusor. A Figura 66 ilustra essas superfícies.

Figura 66 – Superfícies geradoras de sustentação negativa em um veículo do tipo Formula.



A configuração aerodinâmica, de maneira geral, é fixa quando o veículo se encontra em movimento. Nos últimos anos, algumas categorias criaram um dispositivo

no qual é possível mudar o ângulo de ataque da asa traseira enquanto o veículo está em movimento (sistema DRS<sup>25</sup> da Formula 1 e da DTM<sup>26</sup>). Porém, ainda assim, as asas são configuradas antes de os veículos entrarem em movimento, trocando o perfil e/ou ângulo de ataque, e o difusor, normalmente, não pode ser configurado<sup>27</sup>.

De maneira geral, a asa dianteira possui uma configuração fixa, somente os ângulos de ataque dos *flaps* podem ser configurados. Em alguns veículos, a asa traseira inferior também pode ter diversas configurações de ângulo de ataque.

A configuração do difusor é fixa, porém sua eficiência é determinada pelas alturas do solo dos eixos dianteiro e traseiro. Tanto o difusor quanto a asa dianteira trabalham muito próximos ao solo, beneficiando-se do efeito solo.

Os ângulos das asas são medidos em relação ao veículo. Dessa forma, qualquer mudança nas alturas dos eixos não muda o ângulo de configuração das asas, apesar de mudar o ângulo de ataque das mesmas.

Neste trabalho, dois modelos para o cálculo das forças aerodinâmicas serão propostos, um para condições de regime permanente e outro para condições de regime quase estático.

### 3 COMPILAÇÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS

A seguir, são apresentados os dados de experimentos em túnel de vento realizados com diferentes veículos, de forma a mostrar que existe uma tendência comum de variação entre os parâmetros aerodinâmicos, o ângulo de ataque de suas asas e as variáveis de estado do veículo.

Com esses dados, é proposto um modelo analítico que replica os parâmetros aerodinâmicos e suas variações.

#### 3.1 ÂNGULO DE ATAQUE DO *FLAP* DIANTEIRO

A Figura 67 apresenta a influência do ângulo de ataque do *flap* dianteiro no coeficiente de arrasto, sustentação negativa e balanço aerodinâmico de diferentes

---

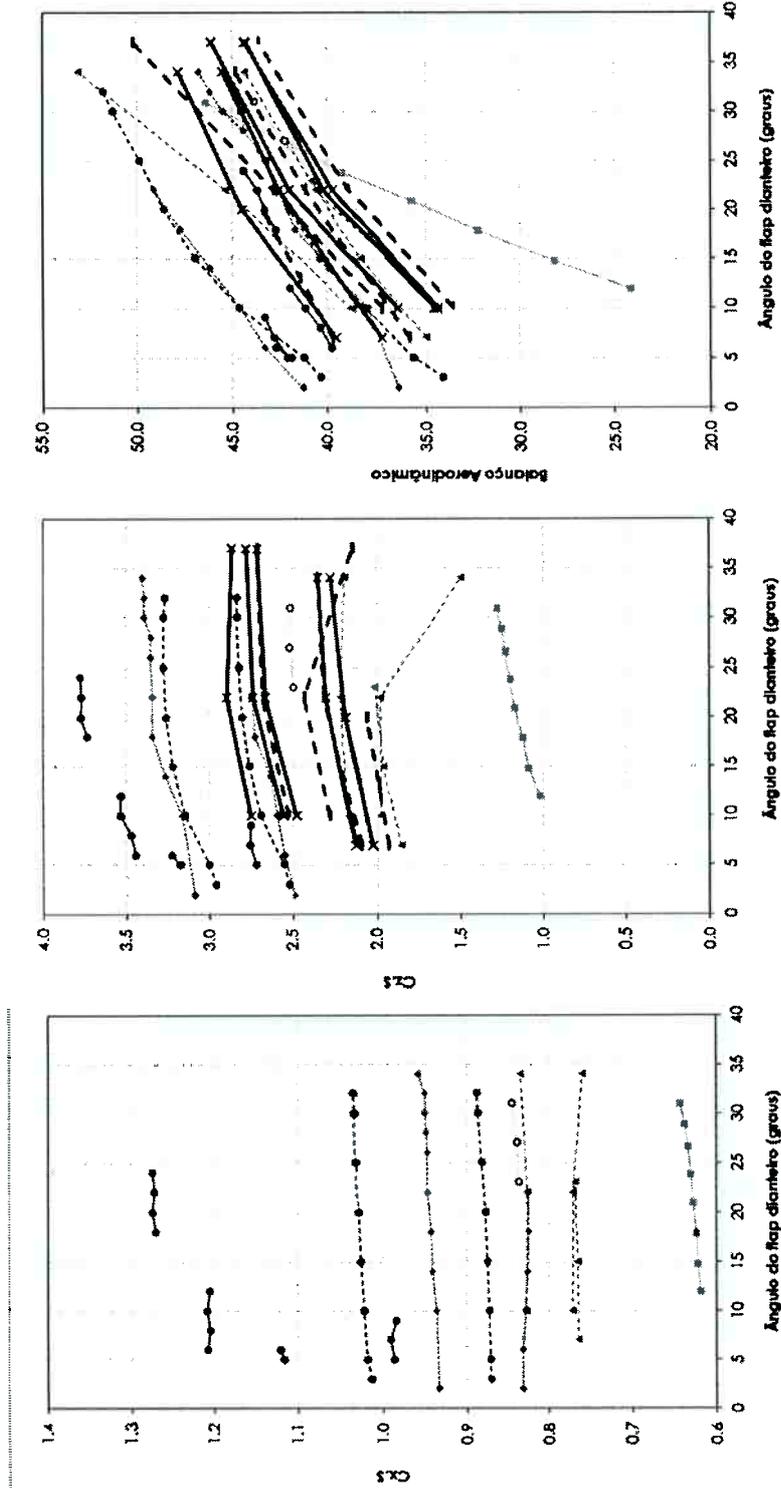
<sup>25</sup> DRS – *Drag Reduction System*. Sistema de redução do arrasto aerodinâmico (diminuindo o ângulo de ataque da asa traseira) utilizado para facilitar a manobra de ultrapassagem.

<sup>26</sup> Campeonato de turismo alemão.

<sup>27</sup> Algumas poucas categorias possuem mais de uma opção de difusor para o veículo, porém essa opção não tem mais sido adotada por conta de redução de custos.

veículos de Formula. Eles apresentam um comportamento que pode ser considerado linear para sustentação negativa, e basicamente não influenciam no arrasto aerodinâmico.

Figura 67 – Influência do ângulo de ataque do flap dianteiro.



A Figura 67 apresenta dados de diferentes veículos (cada curva é um veículo distinto ou com uma diferente geometria de asa). É interessante como as inclinações dessas curvas são próximas. A diferença de tamanho dos veículos (adequada ao conjunto moto propulsor de cada categoria) explica a diferença do *offset* dos valores de arrasto e sustentação negativa dos gráficos acima.

Analisando as figuras acima, pode-se concluir que o ângulo de ataque do *flap* dianteiro não influencia o arrasto do veículo, possui baixa influência na sustentação negativa total do veículo e grande influência no balanço aerodinâmico.

É explícito nos gráficos apresentados que a influência do ângulo de ataque do *flap* dianteiro pode ser linearizada. É interessante comentar que, do ponto de vista prático, o *flap* dianteiro é utilizado somente para balancear o centro de pressão do veículo. As sensibilidades dos coeficientes ao ângulo de ataque do *flap* dianteiro podem ser simplificadas conforme apresentado pelas Equações (87) a (89).

$$C_x = C_{x0} \Rightarrow \frac{\partial C_x}{\partial \alpha_{ff}} = 0 \quad (88)$$

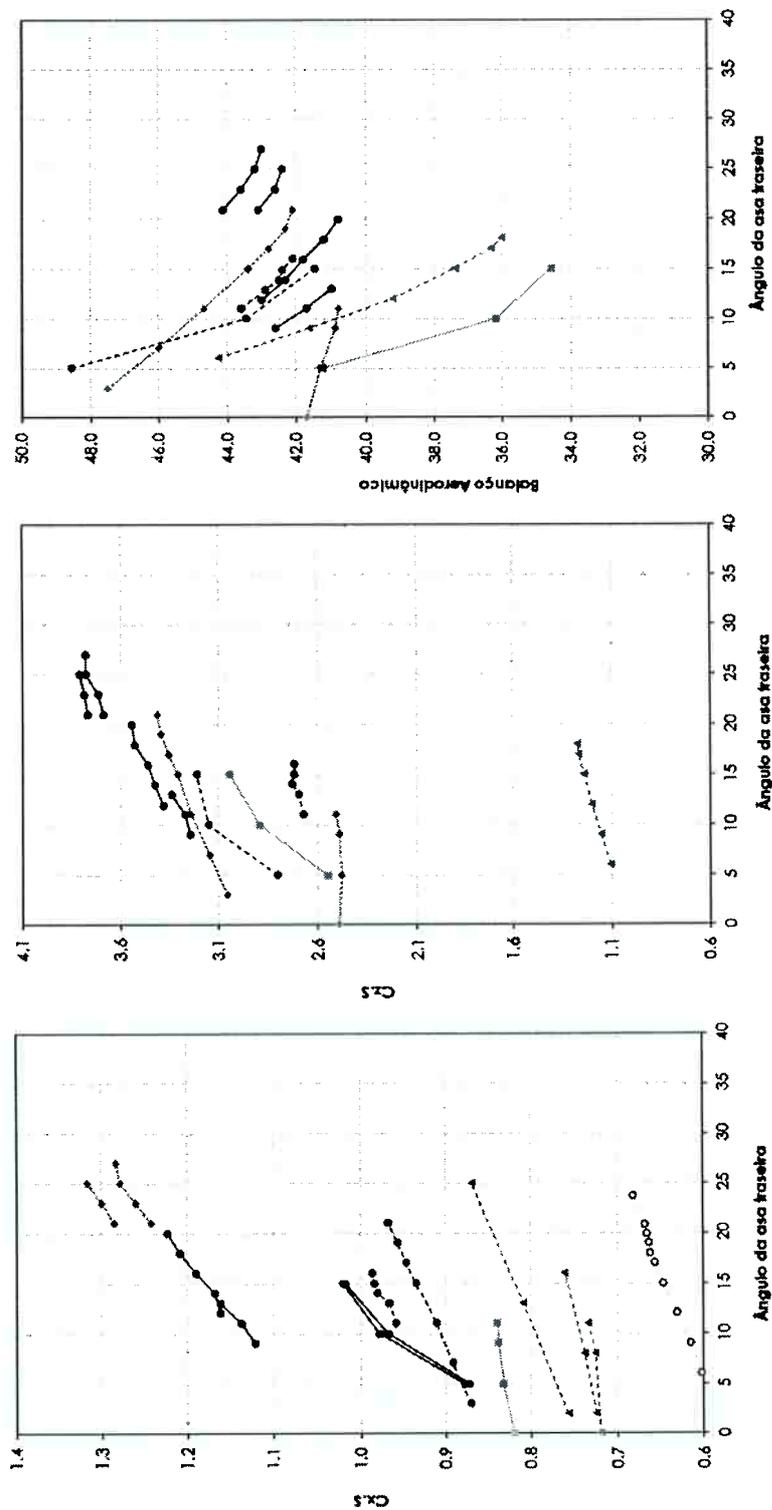
$$C_z = C_{z0} + \frac{\partial C_z}{\partial \alpha_{ff}} \alpha_{ff} \Rightarrow \frac{\partial C_z}{\partial \alpha_{ff}} > 0 \quad (89)$$

$$AB = AB_0 + \frac{\partial AB}{\partial \alpha_{ff}} \alpha_{ff} \Rightarrow \frac{\partial AB}{\partial \alpha_{ff}} > 0 \quad (90)$$

### 3.2 ÂNGULO DE ATAQUE DA ASA TRASEIRA

A mesma abordagem utilizada na análise da influência do ângulo de ataque do *flap* dianteiro foi utilizada para o ângulo de ataque da asa traseira. A Figura 68 apresenta o coeficiente de arrasto e de sustentação negativa para diversos veículos de Formula.

Figura 68 – Influência do ângulo de ataque da asa traseira.



Diferentemente do ângulo de ataque do *flap* dianteiro, o ângulo de ataque da asa traseira altera o comportamento do veículo por completo em todos os três parâmetros. De forma geral, o ângulo de ataque da asa traseira determina o arrasto

do veículo e o ângulo de ataque do *flap* dianteiro é ajustado para balancear a posição do centro de pressão. Dessa forma, a configuração escolhida para um determinado circuito (baixa ou alta sustentação negativa, por exemplo) é feita selecionando-se a posição da asa traseira, e o *flap* dianteiro é selecionado somente para rebalancear a asa.

Tanto o arrasto quanto a sustentação negativa podem ser linearizados, e o balanço aerodinâmico pode ser simplificado por uma função quadrática, conforme proposto pelas Equações (90) a (92).

$$C_x = C_{x0} + \frac{\partial C_x}{\partial \alpha_{rw}} \alpha_{rw} \Rightarrow \frac{\partial C_x}{\partial \alpha_{rw}} > 0 \quad (91)$$

$$C_z = C_{z0} + \frac{\partial C_z}{\partial \alpha_{rw}} \alpha_{rw} \Rightarrow \frac{\partial C_z}{\partial \alpha_{rw}} > 0 \quad (92)$$

$$AB = AB_0 + \frac{\partial AB}{\partial \alpha_{rw}} \alpha_{rw} + \frac{\partial^2 AB}{\partial \alpha_{rw}^2} \alpha_{rw}^2 \Rightarrow \frac{\partial AB}{\partial \alpha_{rw}} < 0 \quad (93)$$

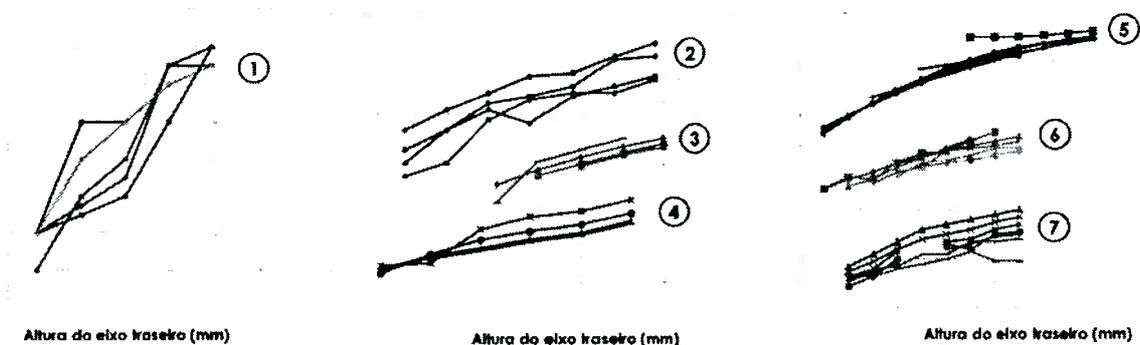
### 3.3 ALTURAS DOS EIXOS DIANTEIRO E TRASEIRO

A altura dos eixos dos veículos influencia a aerodinâmica porque muda o ângulo de ataque do veículo por completo (e, por consequência, das asas), e o ângulo do difusor em relação ao solo. Devido ao fato de que o veículo possui tanto a asa dianteira quanto o difusor atuando sob efeito solo, as alturas de trabalho do veículo são parâmetros de extrema importância para sua configuração.

Como a eficiência do difusor é proporcional a sua área, os mapas aerodinâmicos foram classificados de acordo com o tamanho dos veículos: pequeno (veículo 1), médio (veículos 2 a 4) e grande (veículos 5 a 7).

A Figura 69 apresenta a variação do coeficiente de arrasto (eixo das ordenadas) em função da altura do eixo traseiro (eixo das abscissas) e do eixo dianteiro (cada curva representa uma altura do eixo dianteiro fixa, sendo as cores mais escuras as alturas mais baixas).

Figura 69 – Coeficiente de arrasto em função das alturas dos eixos.

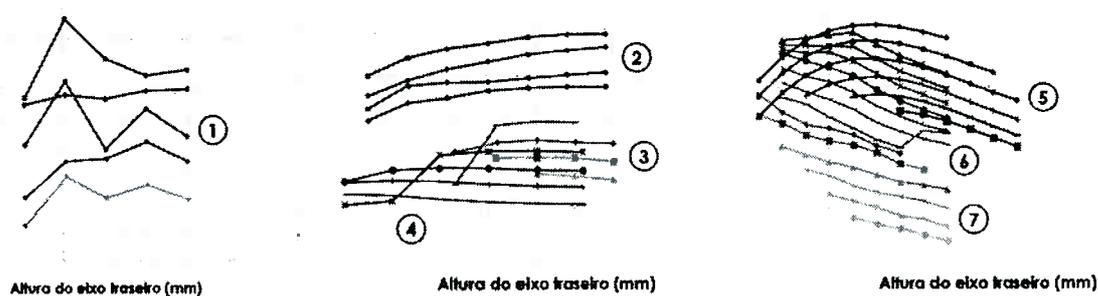


O coeficiente de arrasto em função das alturas dos eixos dianteiro e traseiro pode ser linearizado conforme proposto pela Equação (93).

$$C_x = C_{x0} + \frac{\partial C_x}{\partial h_f} h_f + \frac{\partial C_x}{\partial h_r} h_r \Rightarrow \frac{\partial C_x}{\partial h_f} < 0; \frac{\partial C_x}{\partial h_r} > 0 \quad (94)$$

A Figura 70 apresenta a variação do coeficiente de sustentação negativa (eixo das ordenadas) em função da altura do eixo traseiro (eixo das abscissas) e do eixo dianteiro (cada curva representa uma altura do eixo dianteiro fixa, sendo as cores mais escuras as alturas mais baixas).

Figura 70 – Coeficiente de sustentação negativa em função das alturas dos eixos.

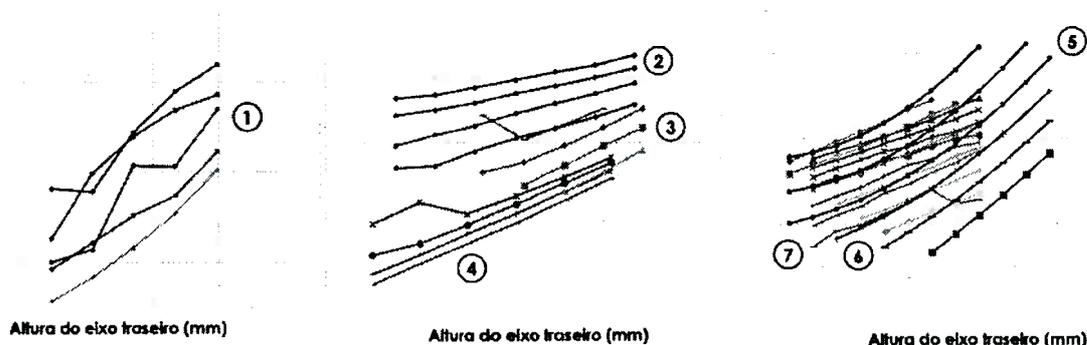


O coeficiente de sustentação negativa não pode ser linearizado. Ele possui uma relação não linear com as alturas dianteira e traseira. Essa caracterização não linear é de extrema importância porque indica um ponto de ótimo na configuração do veículo. Para o equacionamento do coeficiente de sustentação negativa, é proposta a formulação não linear quadrática apresentada na Equação (94).

$$C_z = C_{z0} + \frac{\partial C_z}{\partial h_f} h_f + \frac{\partial C_z}{\partial h_r} h_r + \frac{\partial^2 C_z}{\partial h_f^2} h_f^2 + \frac{\partial^2 C_z}{\partial h_f \partial h_r} h_f h_r \Rightarrow \frac{\partial C_z}{\partial h_f} < 0; \frac{\partial C_z}{\partial h_r} > 0; \frac{\partial^2 C_z}{\partial h_f^2} < 0 \quad (95)$$

A Figura 71 apresenta a variação do balanço aerodinâmico (eixo das ordenadas) em função da altura do eixo traseiro (eixo das abscissas) e do eixo dianteiro (cada curva representa uma altura do eixo dianteiro fixa, sendo as cores mais escuras as alturas mais baixas).

Figura 71 – Balanço aerodinâmico em função da altura dos eixos.



O balanço aerodinâmico em função das alturas dianteira e traseira pode ser linearizado para ambos conforme sugerido pela Equação (95).

$$AB = AB_0 + \frac{\partial AB}{\partial h_f} h_f + \frac{\partial AB}{\partial h_r} h_r \Rightarrow \frac{\partial AB}{\partial h_f} < 0; \frac{\partial AB}{\partial h_r} > 0 \quad (96)$$

#### 4 MODELO EM REGIME PERMANENTE

O modelo em regime permanente é baseado nas medições estáticas feitas em túnel de vento à velocidade constante. O modelo em escala é mensurado utilizando diversas configurações aerodinâmicas para as diferentes combinações de altura do eixo dianteiro e traseiro, ou seja, existe um mapa aerodinâmico para cada configuração aerodinâmica do veículo.

A regressão polinomial não linear é usada na formulação matemática das equações dos parâmetros aerodinâmicos arrasto, sustentação negativa e balanço aerodinâmico. O objetivo é uma função que tenha coeficiente de determinação o mais próximo possível de 1 e que mantenha a margem de erro dos valores dos coeficientes no máximo em 3%. Se a margem de erro é muito grande, a interpolação se torna uma

abordagem mais precisa, porém possui desvantagens que serão explicadas no próximo item.

O modelo a seguir foi proposto para ser utilizado em veículos de Formula 1 (MAVROUDAKIS, 2010). Inicialmente, foi elaborado de forma mais simples, para uma abordagem com poucos parâmetros e, posteriormente, de forma mais completa, no caso em que mais parâmetros tenham sido experimentados no ensaio em túnel de vento.

O modelo mais simples inclui somente as alturas dos eixos dianteiro e traseiro. A Equação (96) apresenta o cálculo do coeficiente.

$$C_i = C_{rh1i} + C_{rh2i} \cdot h_f + C_{rh3i} \cdot h_r + C_{rh4i} \cdot h_f^2 + C_{rh5i} \cdot h_r^2 + C_{rh6i} \cdot h_f \cdot h_r + C_{rh7i} \cdot h_f^3 + C_{rh8i} \cdot h_f^4 \quad (97)$$

No modelo acima, é interessante notar que, enquanto o eixo traseiro apresenta coeficientes de segunda ordem, o eixo dianteiro apresenta os de terceira e quarta ordem. Nele é usado somente um termo cruzado de segunda ordem.

No modelo mais simples, também foi proposto um fator de correção que incorpora o ângulo de deriva do veículo e o ângulo de esterçamento das rodas, caso esses parâmetros fossem mensurados posteriormente. Esse fator de correção é apresentado na Equação (97).

$$C_{i \text{ corrected}} = C_i \cdot (C_{\psi\delta 1i} + C_{\psi\delta 2i} \cdot \delta_s + C_{\psi\delta 3i} \cdot \psi + C_{\psi\delta 4i} \cdot \delta_s^2 + C_{\psi\delta 5i} \cdot \psi^2 + C_{\psi\delta 6i} \cdot \delta_s \cdot \psi + C_{\psi\delta 7i} \cdot \psi^3 + C_{\psi\delta 8i} \cdot \psi^4) \quad (98)$$

É interessante notar que, enquanto o ângulo de esterçamento apresenta coeficientes de segunda ordem, o ângulo de deriva apresenta coeficientes de quarta ordem.

O modelo completo incorpora, além das alturas do eixo dianteiro e traseiro, do ângulo de guinada e do ângulo de esterçamento, o ângulo de rolagem da carroceria. Esse modelo é apresentado na Equação (98).

$$C_i = C_{1i} \cdot h_f + C_{2i} \cdot h_f \cdot h_r + C_{3i} \cdot h_f \cdot \psi + C_{4i} \cdot h_f \cdot \delta_s + C_{5i} \cdot h_f \cdot \theta + C_{6i} \cdot h_f \cdot h_r^2 + C_{7i} \cdot h_r \cdot \psi^2 + C_{8i} \cdot \psi \cdot \theta + C_{9i} \cdot \psi + C_{10i} \cdot \delta_s + C_{11i} \cdot \theta^2 + C_{12i} \cdot h_r^3 + C_{13i} \cdot h_r^4 \quad (99)$$

É interessante notar que, no modelo completo apresentado na Equação (98), os termos de alta ordem não são os mesmos do modelo mais simples. De forma distinta, parâmetros como a altura do eixo traseiro agora possuem termos de quarta ordem e o eixo dianteiro apresenta somente primeira ordem. Comparando os modelos e, posteriormente, dados de diversos outros veículos, o autor conclui que o modelo

acima, apesar de ter sido utilizado na categoria de maior investimento tecnológico da atualidade, não reproduz um comportamento geral, mas sim um determinado veículo de forma a aumentar o coeficiente de correlação.

No presente trabalho, o autor tem como objetivo utilizar uma formulação simples que inclua o correto comportamento de um veículo do tipo Formula, mesmo que a precisão seja um pouco comprometida. Para trabalhos futuros, com o objetivo de otimizar um veículo em específico, formulações mais complexas e mais precisas podem ser utilizadas.

As Equações (99) a (101) apresentam os cálculos dos três principais parâmetros aerodinâmicos de um veículo do tipo Formula qualquer. Eles foram utilizados no modelo analítico utilizado neste trabalho.

$$C_x = C_{x0} + \frac{\partial C_x}{\partial \alpha_{rw}} \alpha_{rw} + \frac{\partial C_x}{\partial h_f} h_f + \frac{\partial C_x}{\partial h_r} h_r \quad (100)$$

$$C_z = C_{z0} + \frac{\partial C_z}{\partial \alpha_{ff}} \alpha_{ff} + \frac{\partial C_z}{\partial \alpha_{rw}} \alpha_{rw} + \frac{\partial C_z}{\partial h_f} h_f + \frac{\partial^2 C_z}{\partial h_f^2} h_f^2 + \frac{\partial C_z}{\partial h_r} h_r + \frac{\partial^2 C_z}{\partial h_r^2} h_r^2 + \frac{\partial^2 C_z}{\partial h_f \partial h_r} h_f h_r \quad (101)$$

$$AB = AB_0 + \frac{\partial AB}{\partial \alpha_{ff}} \alpha_{ff} + \frac{\partial AB}{\partial \alpha_{rw}} \alpha_{rw} + \frac{\partial^2 AB}{\partial \alpha_{rw}^2} \alpha_{rw}^2 + \frac{\partial AB}{\partial h_f} h_f + \frac{\partial^2 AB}{\partial h_f^2} h_f^2 + \frac{\partial AB}{\partial h_r} h_r + \frac{\partial^2 AB}{\partial h_r^2} h_r^2 + \frac{\partial^2 AB}{\partial h_f \partial h_r} h_f h_r \quad (102)$$

## 5 COMPARAÇÃO ENTRE MODELO E OS DADOS DE TÚNEL DE VENTO

Para o cálculo matemático dos coeficientes, é possível utilizar basicamente dois procedimentos: interpolação ou um modelo baseado em regressão.

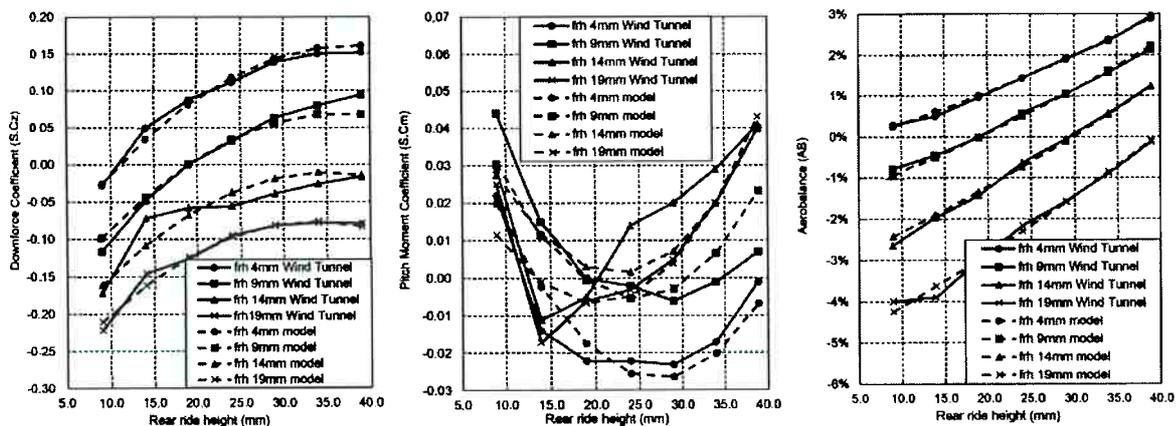
A interpolação tem a vantagem de manter os valores da medição no conjunto de valores da resposta, porém, se a medição apresenta muito ruído, essa técnica apresenta muita variação na resposta. Uma outra desvantagem da interpolação é que o seu custo computacional é maior, como já foi constatado pelo autor em modelos matemáticos de veículos de competição em trabalhos passados (MARCHESIN, 2012).

Os modelos de regressão não linear de múltiplas variáveis acabam por suavizar os resultados experimentais e podem ser um bom compromisso. A maior desvantagem está no fato de que, se o fenômeno físico apresenta uma descontinuidade, o modelo normalmente não consegue replicar uma mudança brusca sem afetar o resto da superfície. Do ponto de vista de veículos de competição, isso

pode acontecer com veículos que apresentam um estol de difusor repentino, tendência que tem diminuído nos últimos modelos fabricados.

A Figura 72 apresenta a comparação entre o modelo de regressão utilizado neste trabalho e os dados de túnel de vento para os coeficientes de sustentação negativa, momento de arfagem e balanço aerodinâmico.

Figura 72 – Análise do erro entre o modelo de regressão e os resultados brutos do túnel de vento.



A Tabela 8 apresenta o valor percentual do erro do modelo utilizando as equações (100) e (101) dos parâmetros aerodinâmicos em função das alturas do veículo. Como esperado, após a análise da Figura 72, o coeficiente de momento de arfagem é o que apresenta maior erro, porém, do ponto de vista percentual, o valor é muito baixo, demonstrando a validade do modelo.

Tabela 8 - Erro entre os valores do modelo e os valores brutos do ensaio em túnel de vento.

rh [mm]	máx média mín frh [mm]	1.2%	1.0%	0.3%
		0.4%	0.4%	0.1%
		-0.7%	-0.7%	-0.4%
		<b>Cm erro</b>	<b>Cz erro</b>	<b>AB erro</b>
		<b>[%]</b>	<b>[%]</b>	<b>[%]</b>
10	5	-0.2%	-0.2%	0.1%
15	5	-0.5%	-0.5%	0.1%
20	5	0.2%	0.2%	0.0%
25	5	0.7%	0.5%	-0.3%
30	5	-0.2%	-0.1%	0.1%
35	5	0.1%	0.2%	0.1%
40	5	0.2%	0.1%	-0.1%
10	10	-0.1%	-0.1%	-0.1%
15	10	-0.4%	-0.2%	0.3%
20	10	1.2%	0.9%	-0.4%
25	10	-0.1%	-0.2%	-0.1%
30	10	-0.6%	-0.5%	0.1%
35	10	-0.6%	-0.5%	0.1%
40	10	-0.1%	-0.2%	-0.1%
10	15	-0.6%	-0.5%	0.2%
15	15	1.2%	1.0%	-0.4%
20	15	0.7%	0.6%	-0.2%
25	15	-0.1%	-0.1%	0.1%
30	15	-0.5%	-0.2%	0.3%
35	15	-0.4%	-0.3%	0.1%
40	15	0.3%	0.3%	0.0%
20	20	0.1%	0.0%	-0.1%
25	20	-0.7%	-0.7%	0.1%
30	20	-0.3%	-0.3%	0.1%
35	20	0.1%	0.1%	0.0%
40	20	0.7%	0.6%	-0.2%

## APÊNDICE B – Experimento com veículo completo

Em janeiro de 2016, foram conduzidos experimentos no *4 post rig* da Universidade de Brescia, com o objetivo de calibrar o modelo de dinâmica vertical que seria utilizado nesta tese. Infelizmente, o veículo analisado, que naquele momento nunca tinha sido utilizado em pista (recém-saído do fabricante), apresentou elevado nível de atrito no sistema de suspensão dianteira. A princípio, foram identificados valores de frequência natural fora da janela que se esperava, e, para pequenos deslocamentos, o sistema de suspensão dianteira não se movia.

Devido a esses problemas experimentais e à falta de oportunidade de ensaiar um segundo veículo, não foi possível utilizar esses dados nesta tese de doutorado

O veículo utilizado nesta tese é um outro modelo e se encontra em uso pela equipe. Devido a esse fato, seus dados do ensaio no *7 post rig* não podem ser divulgados de forma completa (Figura 8). De qualquer maneira, o procedimento utilizado em ambos é o mesmo e, para a finalidade da tese, o exemplo que apresentou elevado grau de atrito no sistema de suspensão será apresentado a seguir.

As Figuras 73 a 75 apresentam um veículo de Formula 4 sobre os quatro atuadores hidráulicos em diferentes vistas. Nelas é possível ver que o veículo foi testado com todos os seus componentes, os quatro atuadores hidráulicos, a base sísmica para garantir correta medição, além dos roletes utilizados em volta do pneu para garantir que o veículo não se mova, tanto longitudinalmente, quanto lateralmente.

O equipamento utilizado foi descrito no texto da revisão bibliográfica.

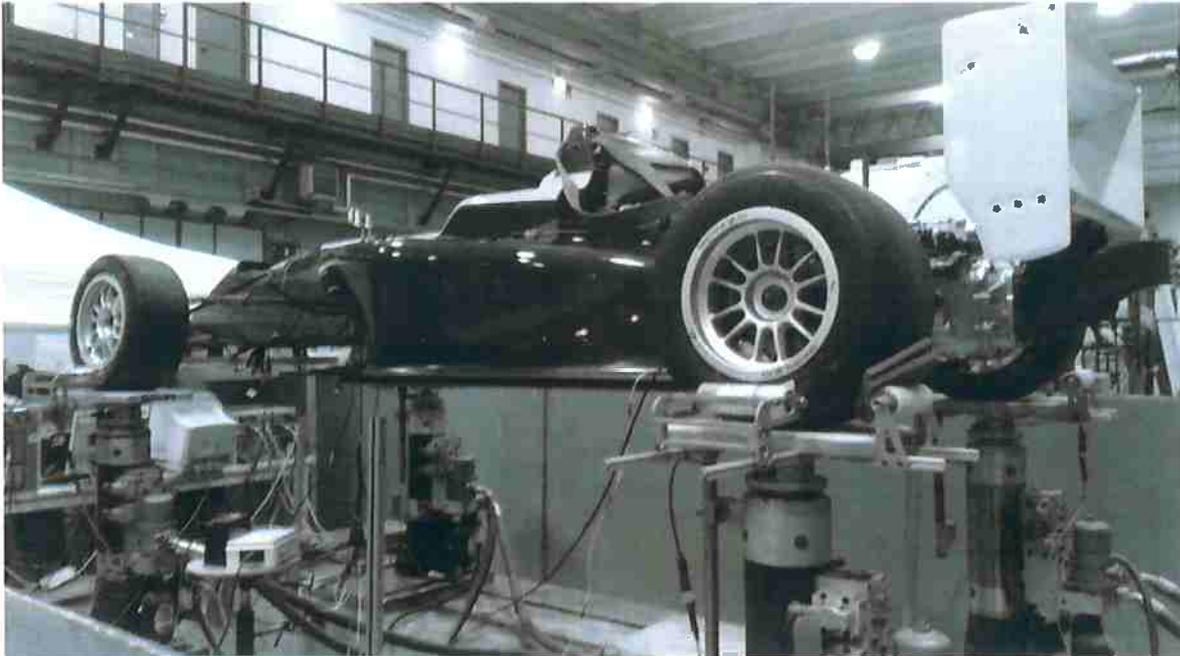
Figura 73 – Formula 4 no 4 *post rig* – vista frontal.



Figura 74 – Formula 4 no 4 *post rig* – vista lateral.



Figura 75 – Formula 4 no 4 post rig – vista traseira.



Nas Figuras 76 e 77, são apresentados os sensores instalados para a medição do deslocamento da entrada, das forças de contato entre os pneus e as plataformas, as alturas dos eixos dianteiros e traseiros e as acelerações da massa não suspensa.

Figura 76 – Sensores no 4 post rig - atuador.

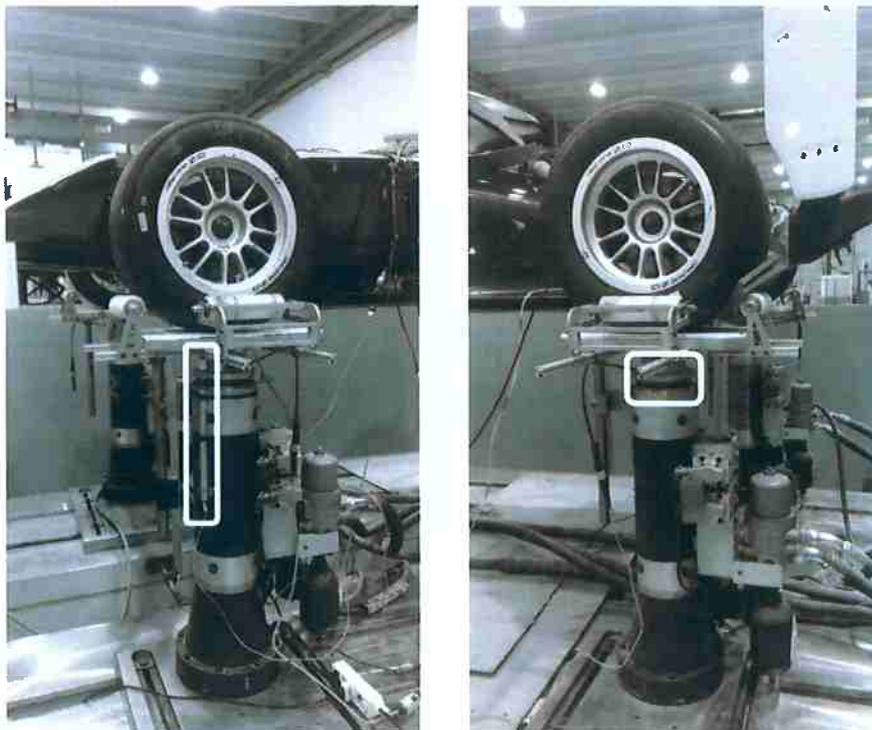
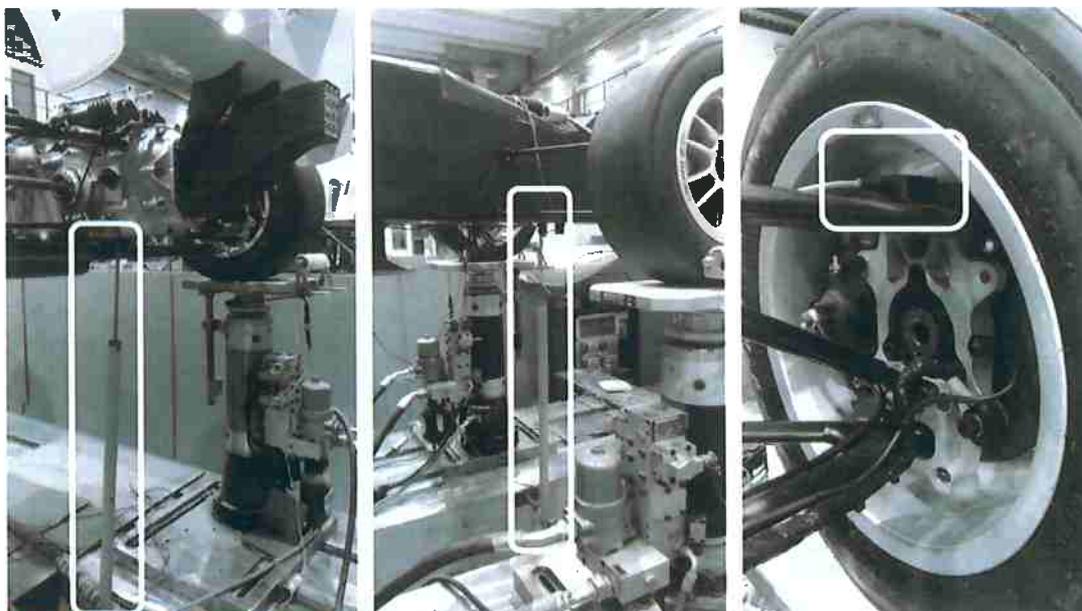


Figura 77 – Sensores no 4 post rig – veículo.



A Tabela 9 apresenta todos os canais utilizados durante o processo de medição.

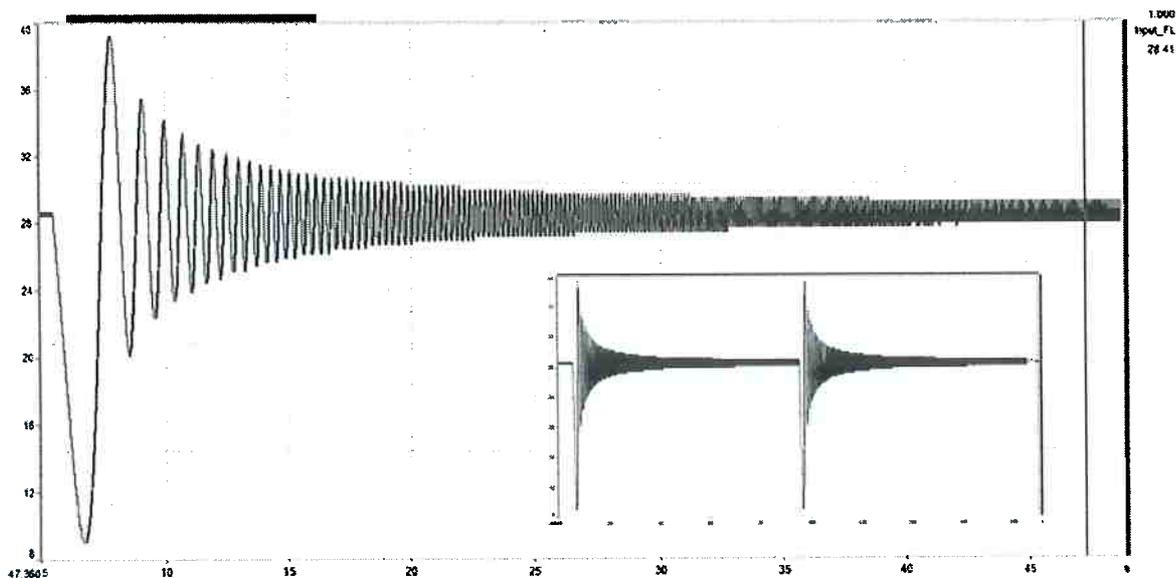
Tabela 9 - Canais utilizados no ensaio experimental no 4 post rig.

Nome do canal	Freq [Hz]	Descrição
Acc_Sprung_F	200	Aceleração da massa suspensa no eixo dianteiro
Acc_Sprung_R	200	Aceleração da massa suspensa no eixo traseiro
Acc_Unsprung_FL	500	Aceleração da massa não-suspensa dianteira esquerda
Acc_Unsprung_FR	500	Aceleração da massa não-suspensa dianteira direita
Acc_Unsprung_RR	500	Aceleração da massa não-suspensa traseira direita
Damper_FL	500	Deslocamento do amortecedor dianteiro esquerdo
Damper_FR	500	Deslocamento do amortecedor dianteiro direito
Damper_RL	500	Deslocamento do amortecedor traseiro esquerdo
Damper_RR	500	Deslocamento do amortecedor traseiro direito
Input_FL	500	Deslocamento do atuador dianteiro esquerdo
Load_FL	500	Força de contato dianteira esquerda
Load_FR	500	Força de contato dianteira direita
Load_RL	500	Força de contato dianteira esquerda
Load_RR	500	Força de contato traseira direita
Ride_Height_F	200	Altura do eixo dianteiro
Ride_Hight_R	200	Altura do eixo traseiro

Devido ao número limitado de canais, o sinal de entrada é testado inicialmente, e se avalia sua variação entre os quatro atuadores. Se a variação é dentro da margem

de controle, os sensores de deslocamento de três dos quatro atuadores são removidos, dando oportunidade à aquisição de outros parâmetros. No teste padrão, todos devem se deslocar em fase com a mesma magnitude. A Figura 78 apresenta o sinal utilizado com entrada de deslocamento nos atuadores hidráulicos.

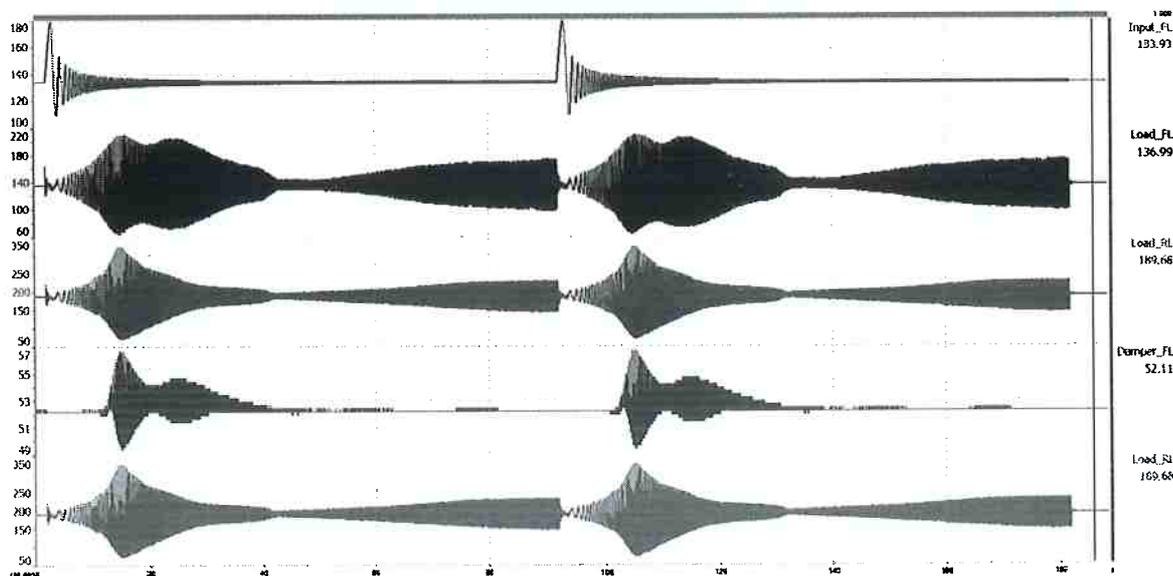
Figura 78 – Sinal de entrada utilizado como deslocamento nos atuadores hidráulicos.



Com a constatação de que os quatro atuadores estão se deslocando conforme o esperado, se converte três dos quatro sensores de deslocamento da carroceria em sensores relacionados aos parâmetros que se deseja medir.

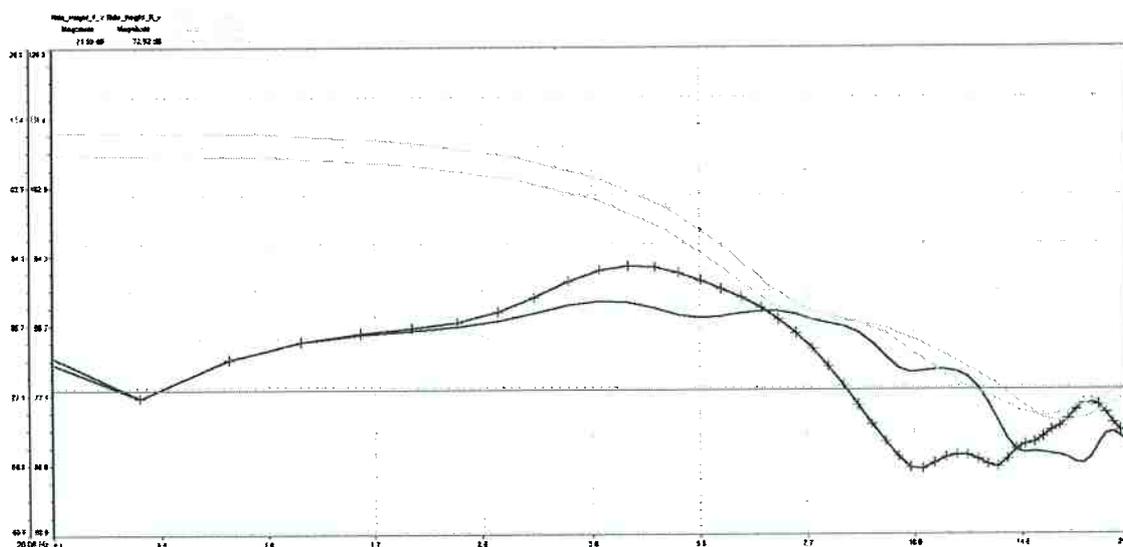
A Figura 79 apresenta os valores do deslocamento da entrada, das forças de contato dos pneus dianteiros, traseiros e o deslocamento da suspensão dianteira e traseira.

Figura 79 – Respostas do veículo aos deslocamentos nos atuadores hidráulicos.



A Figura 80 apresenta os valores da velocidade dos eixos dianteiros (curva preta) e traseiros (cruzes pretas) e a resposta em frequência das forças nos pneus dianteiros (linha cinza) e traseiros (cruzes cinzas).

Figura 80 – Resposta em frequência das forças de contato dos pneus e alturas dianteiras e traseiras.



Para maiores detalhes sobre os resultados desse ensaio e a influência do atrito no comportamento da suspensão de veículos, o autor sugere a leitura do artigo realizado em parceria com o grupo de engenharia automotiva da Universidade de Brescia sobre os resultados específicos desse ensaio (BENINI et al., 2017).

## APÊNDICE C – Caracterização de componentes

Assim como a caracterização da resposta do veículo completo, a caracterização dos componentes do sistema de suspensão é crucial para o correto desenvolvimento de modelo.

O equipamento apresentado a seguir é um dinamômetro linear hidráulico utilizado para caracterizar amortecedores, molas e batentes de suspensão.

De forma geral, o equipamento utiliza uma entrada de deslocamento (função que pode ser configurada pelo usuário) e mede deslocamento, velocidade e força. Nas Figuras 81 e 82 são apresentados o equipamento (computador mais dinamômetro hidráulico), a montagem de uma configuração de batentes (nesse caso, um elastômero isolado) e a imagem da função de entrada para o teste.

Figura 81 – Equipamento utilizado na medição de molas, batentes e amortecedores.

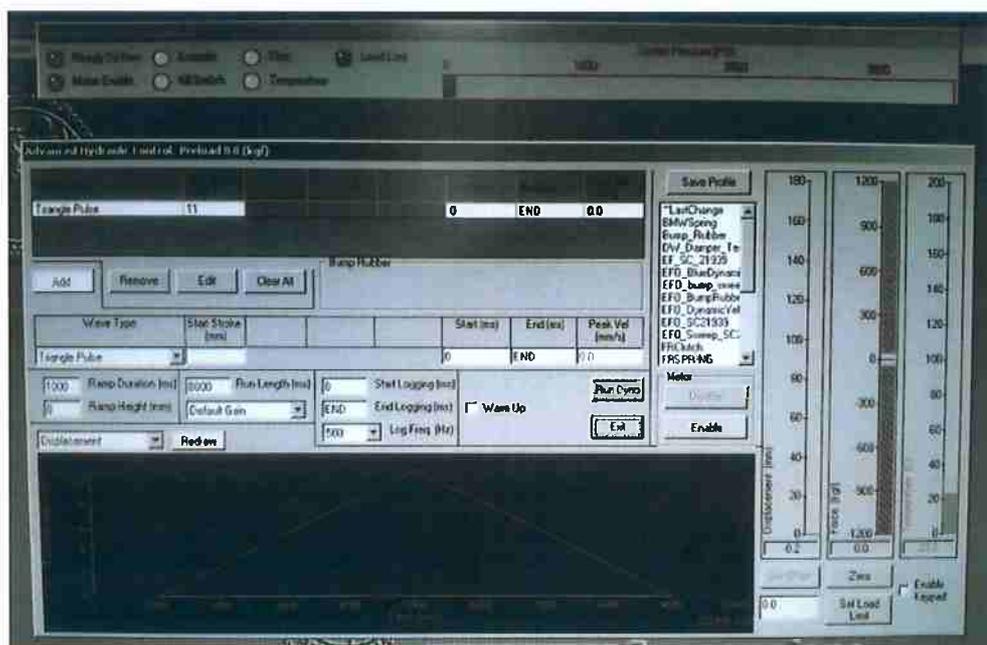


Figura 82 – Montagem de uma configuração de batente composto por mola mais elastômero.



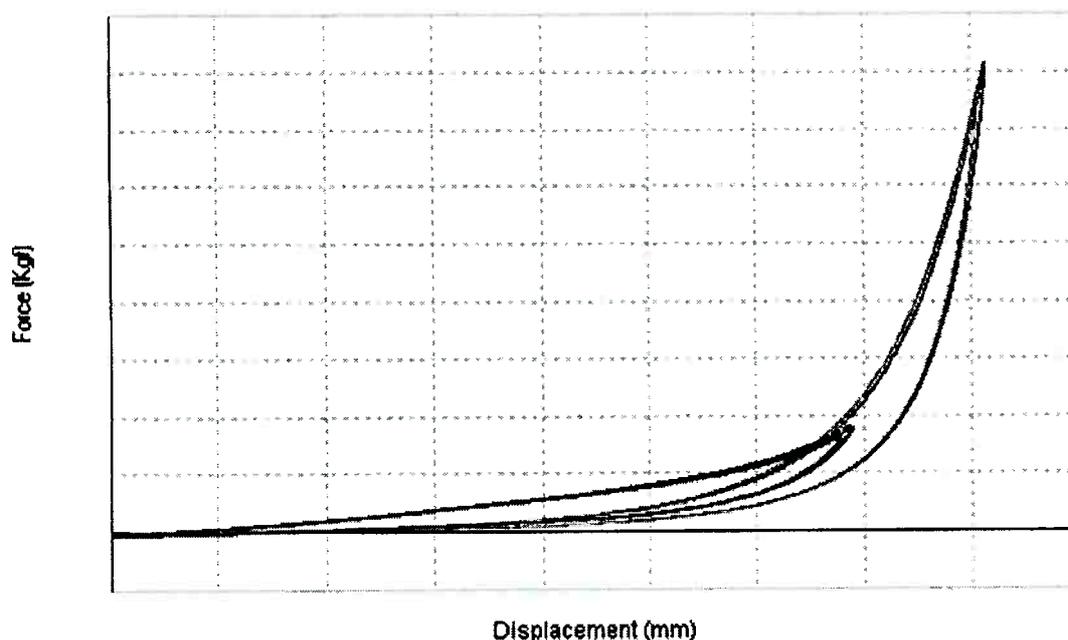
A programação do dinamômetro permite configurar a função de entrada de acordo com o teste que se deseja fazer. No caso de componentes elásticos, se utiliza uma função de rampa de entrada, a velocidade constante. É possível utilizar uma combinação de funções, ou mesmo trocar somente a velocidade para se avaliar a histerese do componente. Os componentes podem ser ligados a um sensor de temperatura que permite que o dinamômetro faça um pré-aquecimento antes de iniciar a medição (essencial para o ensaio de amortecedores). A Figura 83 apresenta a tela de configuração do programa utilizado para controlar o dinamômetro com uma função de entrada em formato triangular.

Figura 83 – Tela do programa utilizado para controle do dinamômetro.



A Figura 84 apresenta uma curva de um batente de suspensão de uma medição com entrada em formato triangular, a baixa velocidade e de valor constante. A curva em cinza escuro e a curva em cinza claro representam batentes distintos. Os valores dos eixos da Figura 84 foram ocultados devido à confidencialidade dos dados. Na medição, fica evidente a presença de histerese no componente.

Figura 84 – Curva de força e função do deslocamento dos batentes de suspensão.



Para usar essa curva dos batentes no modelo, é excluída a histerese e utilizada a curva média.

No caso específico de amortecedores, a função utilizada para a caracterização é uma entrada senoidal com amplitude constante e com diferentes frequências, caracterizando assim a força de amortecimento para cada valor de velocidade.

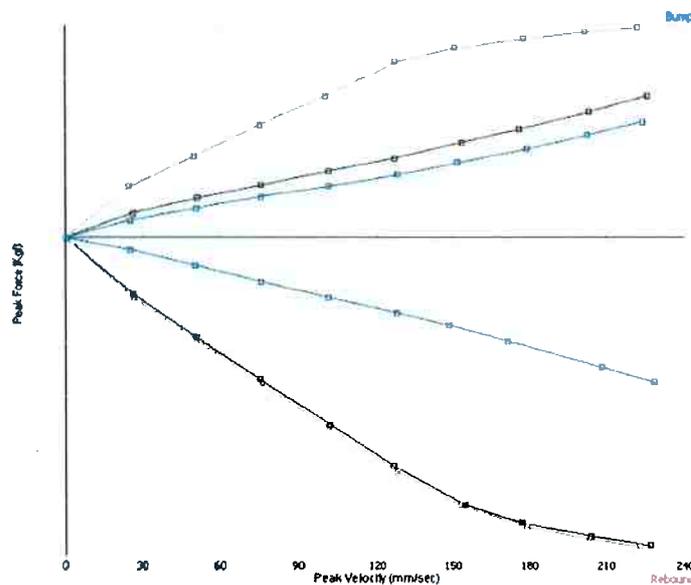
A Figura 85 a seguir apresenta um amortecedor montado no dispositivo.

Figura 85 – Amortecedor montado no dinamômetro linear hidráulico.



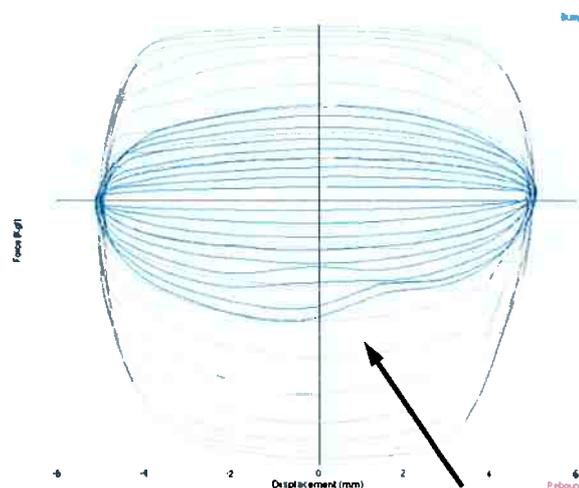
A Figura 86 a seguir apresenta as curvas que caracterizam a força de um amortecedor em função da velocidade. Para a obtenção dessa curva, são feitas 9 medições com entrada senoidal de mesma amplitude, porém com frequências diversas. Esse tipo de ensaio é utilizado para verificar se os amortecedores estão dentro da faixa de trabalho estipulada pelo regulamento, se a faixa de ajuste (8 curvas diferentes para compressão e mais 8 para extensão) entre diferentes amortecedores é compatível, de forma a parear os componentes para que não haja assimetria em um eixo.

Figura 86 – Curva de força e função da velocidade de um amortecedor.



Uma outra curva também utilizada é a de força em função do deslocamento. Como a curva anterior (força em função da velocidade) utiliza somente os valores de pico de velocidade, é importante verificar se, durante todo o deslocamento do amortecedor, a força se comporta como esperado, pois pode acontecer um comportamento normal na velocidade de pico, porém com falhas durante a transição. A Figura 87 apresenta um amortecedor com problemas entre a transição da velocidade, conforme explicitado pela flecha. Nela são apresentadas as curvas de um amortecedor em duas configurações distintas (curva em cinza claro e em azul).

Figura 87 – Curva de força e função de deslocamento de um amortecedor com problemas entre a transição de velocidades.



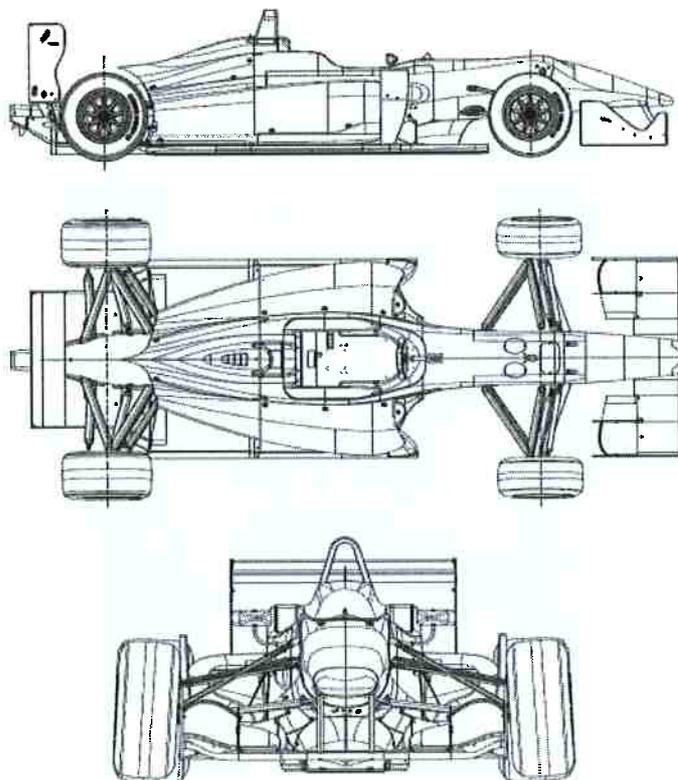
## APÊNDICE D – Dados do veículo de Formula 3

A seguir são apresentados detalhes do veículo de Formula 3 utilizado nas simulações feitas nesta tese. Os dados apresentados foram coletados do manual do fabricante, Dallara Automobili, e do promotor do evento, GT Sport.

### 1 LAYOUT

A Figura 88 apresenta as vistas lateral, superior e frontal do veículo Dallara Piedrafita F317. O veículo é de uso exclusivo de competição, sendo um monoposto de rodas descarenadas, contando com a presença de uma asa dianteira com *flap* ajustável, duas asas na traseira, uma inferior, também ajustável, e uma superior que, além de ajustável, pode ter o seu perfil trocado em três opções (baixo, médio e alto carregamento aerodinâmico – ver Figura 3).

Figura 88 – Vistas lateral, superior e frontal do veículo de Formula 3 Dallara F312 (GT Sport, 2017).



A Tabela 10 apresenta alguns dados genéricos do veículo.

Tabela 10 - Dados genéricos do veículo (GT Sport, 2017).

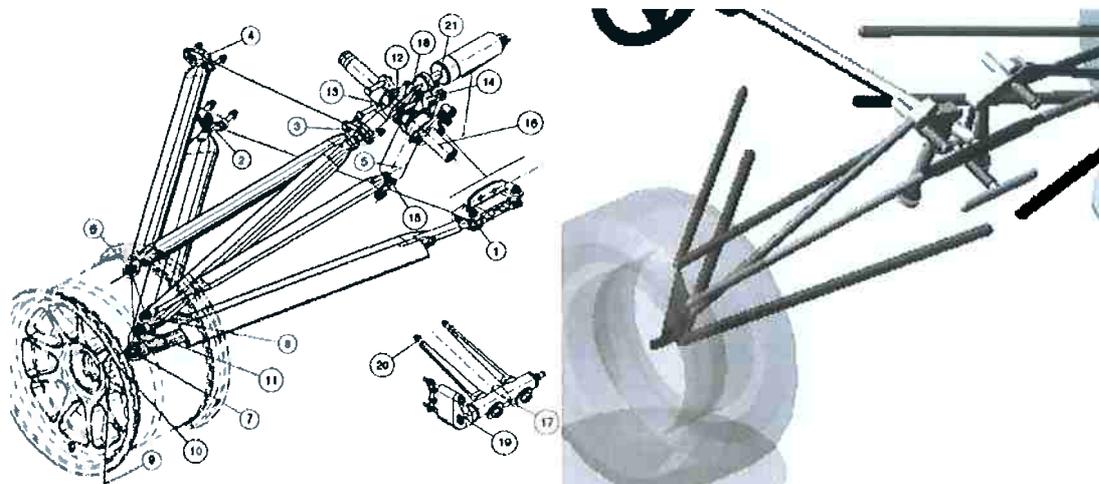
<b>Entre-eixos</b>	2800mm
<b>Bitola dianteira</b>	1595mm
<b>Bitola traseira</b>	1540mm
<b>Comprimento total</b>	4351mm
<b>Largura total</b>	1845mm (incluindo pneus)
<b>Altura total</b>	945mm (excluindo altura do solo)
<b>Suspensão dianteira</b>	Push-Rod com duplo amortecedor e barras de torção como molas
<b>Suspensão traseira</b>	Push-Rod com duplo amortecedor e molas helicoidais
<b>Chassis</b>	Estrutura de sanduíche de carbono e com colméria de alumínio e Nomex
<b>Carroceria</b>	Compósitos de fibra de vidro e com estrutura sanduíche de Nomex
<b>Câmbio</b>	Marca Hewland, tipo sequencial com seis marchas + marcha ré, acionado por borboleta com sistema pneumático. Diferencial do tipo power-flow
<b>Molas</b>	Molas de torção da Dallara e molas helicoidais de 36mm de diâmetro interno
<b>Amortecedores</b>	Marca Koni, modelo 2812 com compressão e extensão ajustáveis
<b>Tanque de combustível</b>	Tipo Premier FT3
<b>Rodas</b>	OZ 9" na dianteira e 10.5" na traseira
<b>Freios</b>	Marca Brembo
<b>Motor</b>	3SGE Toyota, específico para o campeonato Euroformula Open

## 2 GEOMETRIA DE SUSPENSÃO

O sistema de suspensão utilizado no veículo Dallara F312, tanto no eixo dianteiro quanto no eixo traseiro, é do tipo duplo A com molas e amortecedores conectadas à manga de eixo por uma barra de compressão e balanceiro. A geometria de suspensão apresentada foi modelada em ambiente multicorpos no início do período do doutorado, porém, para este trabalho, ela somente auxiliou no cálculo da razão de instalação do sistema de suspensão. Outros trabalhos foram desenvolvidos durante o período do doutorado com o mesmo modelo (MARCHESIN et al., 2015).

A suspensão dianteira é apresentada na Figura 89, a mola utilizada é do tipo barra de torção, e fica alojada no eixo do balanceiro.

Figura 89 – Sistema de suspensão dianteira conforme manual do fabricante (GT Sport, 2017), e no lado esquerdo, o mesmo sistema modelado em ambiente multicorpos.



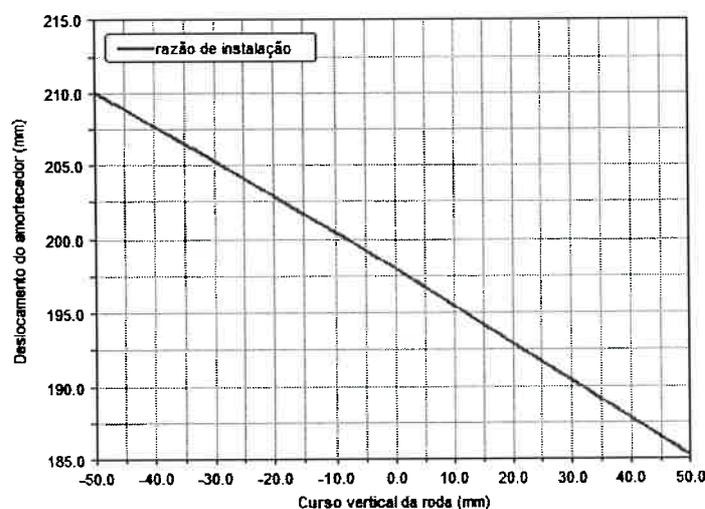
A Tabela 11 apresenta as coordenadas espaciais do sistema de suspensão dianteira.

Tabela 11 - Pontos do sistema de suspensão dianteira. Adaptado do fabricante (GT Sport, 2017).

Dianteira	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
P1	190,5	-50	282
P2	-380	-153	263
P3	17	-162,4	452
P4	-380	-168,8	418,5
P5	127	-170	427,5
P6	-65,9	-663,7	347,3
P7	-23,9	-697,2	201,8
P8	31,5	-723,0	322,3
P9	0	-797,5	-26,5
P10	0	-781,1	242,0
P11	-32,2	-678,6	239,4
P12	91,5	-141,6	542,0
P13	82,4	-125	512,9
P14	79,2	-58,5	502,7
P15	21,0	-96,5	317,3
P16	177,8	-125	482,9
P17 (int)	115,5	0	364,2
P17 (ext)	173,5	0	346,2
P17 (ext +40)	213,5	0	346,2
P18	96,3	-111,5	557,3
P19 (int)	115,5	-93,2	364,2
P19 (ext)	173,5	-93,2	346,2
P19 (ext +40)	213,5	-93,2	346,2
P20	45,6	-35	400,6
P21	79,6	-32	504,1

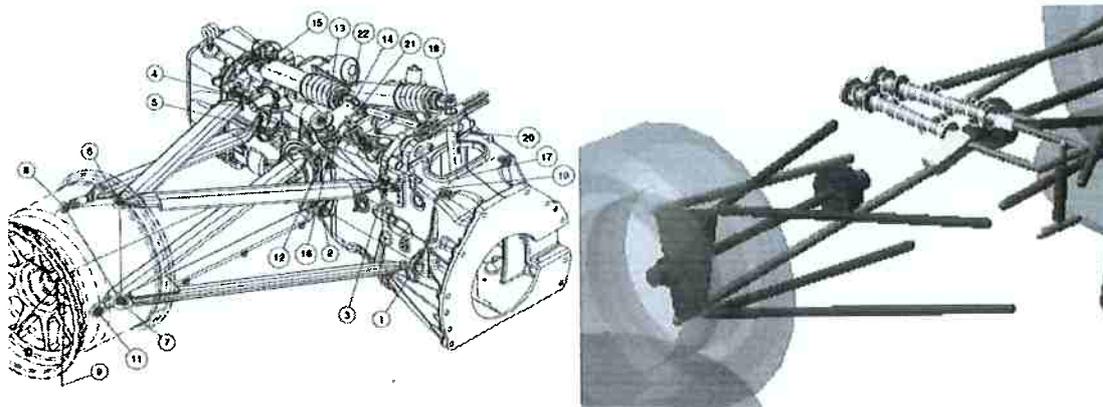
A relação entre o deslocamento do amortecedor e o deslocamento vertical do centro da roda, em uma simulação de compressão em fase das rodas do eixo dianteiro do veículo, permite calcular a razão de instalação do sistema. A Figura 90 apresenta a relação entre os deslocamentos, e a sua derivada é a razão de instalação do amortecedor. No caso específico do sistema de suspensão dianteira, também foi necessário calcular a razão de instalação da barra de torção. Em ambos os casos, essa razão de instalação foi considerada constante.

Figura 90 – Deslocamento do amortecedor dianteiro, função do deslocamento da roda.



A Figura 91 apresenta o sistema de suspensão traseira. Diferentemente do sistema de suspensão dianteira, as molas estão instaladas de forma convencional no amortecedor.

Figura 91 – Sistema de suspensão traseiro conforme manual do fabricante (GT Sport, 2017), e à direita, modelo em ambiente multicorpos.



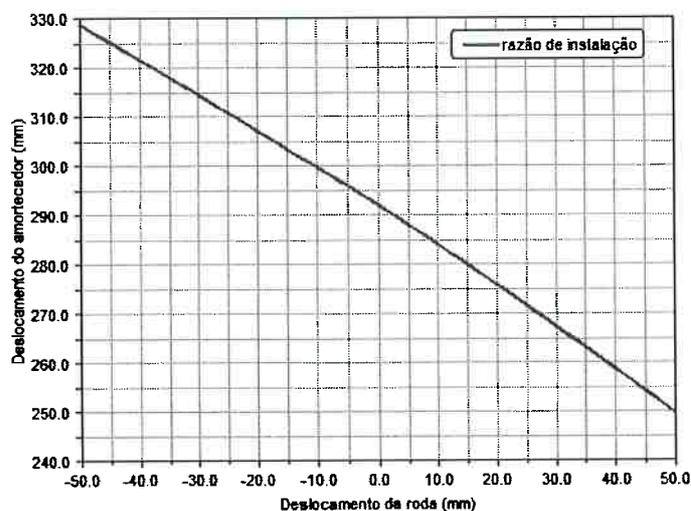
A Tabela 12 apresenta as coordenadas espaciais do sistema de suspensão traseira.

Tabela 12 - Pontos do sistema de suspensão traseira. Adaptado do fabricante (GT Sport, 2017).

Traseira	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
P1	415	-150	167
P2	121,9	-134	155,5
P3	309	-135	308,1
P4	-156	-90	279
P5	-92,5	-101	237
P6	25	-623,5	364,5
P7	85	-680	170
P8	-122	-637	289
P9	0	-770	-39,5
P10	0	-757,1	238,7
P11	12	-678	113
P12	164,5	-138,2	368,7
P13	129,1	-128,1	364,7
P14	142,4	-59,7	395,1
P15	-143,4	-37,7	339,2
P16	137,5	-113,5	328,4
P17	380	0	290
P18	361,7	0	477,1
P19	380	-50	290
P20	365	-66	443108
P21	168,3	-65,2	398,9
P22	75,0	0	362,7

Assim como no sistema de suspensão dianteira, o sistema de suspensão traseira apresenta um comportamento de razão de instalação que também pode ser linearizado. A Figura 92 apresenta a relação entre o deslocamento do amortecedor em função do deslocamento da roda.

Figura 92 – Deslocamento do amortecedor traseiro em função do deslocamento da roda.



### 3 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O veículo analisado utiliza um sistema de aquisição de dados Magneti Marelli Motorsport do tipo SRT-E (Magneti Marelli, 2017), com capacidade de 14 canais analógicos, 6 sensores de velocidade do tipo indutivo, 2 termopares, 2 sensores *knock*<sup>28</sup>, 2 sensores lambda e 4 sensores de temperatura NTC/PT100. A frequência máxima de aquisição é de até 500Hz, porém fica limitada também à memória, à frequência de aquisição ou ao tempo de registro.

Os sensores utilizados são controlados pelo regulamento, sendo proibido o uso de acelerômetros nas mangas-de-eixo. Porém, é possível utilizar um dispositivo de expansão de canais analógicos (limitado a 8 canais adicionais) que se comunica com o sistema via CAN.

A Tabela 13 apresentada a seguir mostra os nomes de alguns dos canais utilizados, a descrição, a unidade de grandeza e a frequência de aquisição.

<sup>28</sup> Sensor *Knock* é um acelerômetro especial usado especificamente para avaliar se ocorreu ignição espontânea em um motor a combustão interna de 4 tempos. Com essa informação, o sistema de injeção eletrônica consegue se reconfigurar, evitando essa situação.

Tabela 13 - Canais analógicos.

Nome	Descrição	Frequência	Unidade
Advance	Ângulo de avanço de ignição	100Hz	graus
Barrel	Posição do eixo seletor do câmbio	500Hz	mV
Brk_F	Pressão no sistema de freio dianteiro	100 Hz	Bar
Brk_R	Pressão no sistema de freio traseiro	100 Hz	Bar
DIS_FL	Deslocamento do conjunto mola amortecedor dianteiro esquerdo	200Hz	mm
DIS_FR	Deslocamento do conjunto mola amortecedor dianteiro direito	200Hz	mm
DIS_RL	Deslocamento do conjunto mola amortecedor traseiro esquerdo	200Hz	mm
DIS_RR	Deslocamento do conjunto mola amortecedor traseiro direito	200Hz	mm
Dist_Lap_WS	Distância percorrida em uma volta	100 Hz	m
Distance	Distância total	100 Hz	m
Fuel Level	Litros de combustível remanescentes no tanque	20 Hz	L
Gear	Marcha do câmbio	20 Hz	-
Gyro	Sensor de velocidade de guinada	100 Hz	graus/s
InjQuantity	Quantidade de combustível injetada por um bico injetor	100 Hz	ml
Lambda	Relação ar combustível	100 Hz	-
N_Lap	Contador de voltas	10 Hz	
P_Adm	Pressão no coletor de admissão	100 Hz	mmBar
P_Baro	Pressão atmosférica	10 Hz	mmBar
P_Clutch	Pressão no pedal da embreagem	100 Hz	Bar
P_Fuel	Pressão na linha de combustível	50 Hz	Bar
P_Oil	Pressão na linha de óleo do motor	50 Hz	Bar
P_Tank	Pressão no tanque de ar do sistema pneumático de troca de marcha	100 Hz	Bar
RPM	Rotação do motor	100 Hz	RPM
Steer	Ângulo de esterçamento do volante	50 Hz	graus
T_air	Temperatura do ar no coletor de admissão	10 Hz	graus Celsius
T_Oil	Temperatura do óleo do motor	2 Hz	graus Celsius
T_Water	Temperatura da água do sistema de arrefecimento do motor	2 Hz	graus Celsius
Time	Contador de tempo	500 Hz	
TPS	Ângulo da posição de abertura da borboleta do motor	100 Hz	graus
Vbatt	Tensão na bateria	50 Hz	V
WS_FL_filt	Velocidade longitudinal do veículo medida com a rotação da roda dianteira e	100 Hz	km/h
WS_FR_filt	Velocidade longitudinal do veículo medida com a rotação da roda dianteira e	100 Hz	km/h
WS_Front	Velocidade média das duas rodas dianteiras	100 Hz	km/h
WS_Rear	Velocidade média das duas rodas traseiras	100 Hz	km/h
WS_RL	Velocidade longitudinal do veículo medida com a rotação da roda traseira esc	100 Hz	km/h
WS_RR	Velocidade longitudinal do veículo medida com a rotação da roda traseira dire	100 Hz	km/h
X	Aceleração longitudinal da massa suspensa	50 Hz	g
Y	Aceleração lateral da massa suspensa	50Hz	g