

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

WALLACE DA SILVA CARVALHO

**VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DA SIMILARIDADE DINÂMICA PARA
VEÍCULOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em engenharia Mecânica do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.

Orientador: Maj. Jorge Audrin Morgado de Gois-
Dr.Ing.

Rio de Janeiro

2014

c2014

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmear ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

629.2	Carvalho, Wallace da Silva
C331v	Validação Experimental da Similaridade Dinâmica para Veículos / Wallace da Silva Carvalho; orientado por Jorge Audrin Morgado de Gois – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2014.
	73p. : il.
	Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2014.
	1. Engenharia mecânica – teses, dissertações. 2. Veículos – dinâmica, similaridade. I. Gois, Jorge Audrin Morgado de, II. Título. III. Instituto Militar de Engenharia.

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

WALLACE DA SILVA CARVALHO

**VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DA SIMILARIDADE DINÂMICA PARA
VEÍCULOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.

Orientador: Jorge Audrin Morgado de Gois – Dr.Ing.

Aprovada em 15 de maio de 2014 pela seguinte Banca Examinadora:

Prof. Jorge Audrin Morgado de Gois - Dr.Ing. do IME – Presidente

Prof. Aldélio Bueno Caldeira - D.Sc. do IME

Prof^a. Sandra Regina Freitas da Silva Morgado de Gois - D.Sc. da UNESA

Rio de Janeiro

2014

Dedico este trabalho a toda minha família em especial aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, o qual guiou em meus passos e forneceu forças para lutar. Além de colocar no meu caminho pessoas que tiveram um papel significativo. Aos meus pais, pela dedicação, apoio, muitos esforços e sacrifícios. São meus verdadeiros alicerces. E me criaram com educação necessária e bastante humildade para formar o ser que sou hoje.

Agradeço extremamente ao meu orientador Major Jorge Audrin Morgado de Gois por sua valiosa orientação, e todos os conhecimentos transmitidos, desde as cadeiras cursadas até a linha de pesquisa do trabalho do mestrado. E pelo firme apoio, e pelas muitas vezes que me reconduziu ao caminho correto da pesquisa.

Também ao professor Louzada, pelo incentivo e apoio no mestrado. E ajuda em algumas dúvidas em relação à sua tese de doutorado, por ser minha base de pesquisa. Para obtenção na prática a realização da similaridade dinâmica veicular.

Ao Técnico do Laboratório de Motores Ivanido, pelo suporte em equipamentos e dicas na utilização do veículo Baja. E aos meus amigos, Pedro Pontes, Helton Castanheira e Thiago Gabriel que estiveram sempre comigo em todos os momentos. E aos professores do mestrado, Major Aldélio Bueno Caldeira e Arnaldo Ferreira, com os quais obtive aulas e adquiri bastantes conhecimentos.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	8
LISTA DE TABELAS.....	10
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	11
1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 Apresentação do Problema.....	18
1.2 Objetivo.....	18
1.3 Estrutura do Trabalho.....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
3 SIMILARIDADE.....	24
3.1 Similaridade Dinâmica.....	24
3.1.1 Teorema dos Π de Buckingham.....	24
3.1.2 Modelo Matemático.....	27
3.2 Similaridade Dinâmica entre os Bajas.....	29
4 INSTRUMENTAÇÃO.....	32
4.1 Sistemas de Navegação.....	32
4.1.1 Unidade de Medida Inercial.....	32
4.1.2 Attitude Heading Reference System.....	33
4.1.3 Sistema de Auxílio.....	33
4.2 Plataforma Strapdown.....	34
5 PLATAFORMA INERCIAL.....	35

5.1	Sistema Arduimu	35
5.2	Sistema Arduimu V3.....	35
5.2.1	Montagem Com Computador.....	36
5.2.2	Eletrônica da Arduimu V3.....	37
6	SOFTWARES	39
6.1	Código Arduino.....	39
6.2	LabVIEW	39
7	DESCRIÇÃO DO SISTEMA	41
7.1	Comunicação.....	41
7.2	Conexão para Comunicação.....	41
7.3	Veículos	43
7.3.1	Veículo Baja.....	44
7.3.2	Veículo Real.....	47
7.3.3	Distâncias dos Centros de Gravidade em Relação aos Eixos	49
8	TESTES E RESULTADOS	51
8.1	Análise dos Parâmetros.....	51
8.2	Testes	51
8.2.1	Análise Das Excitações de Base.....	56
9	CONCLUSÃO	69
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG. 3.1	Modelo de $\frac{1}{4}$ do Veículo.....	27
FIG. 3.2	Sistemas de eixos para um veículo.....	30
FIG. 3.3	(a) Movimento de rolagem. (b) Movimento de arfagem. (c) Movimento de guinada.....	30
FIG. 5.1	Placa Arduimu V3.....	36
FIG. 5.2	FTDI Breakout.....	37
FIG. 5.3	Montagem da Placa.....	37
FIG. 6.1	Upload.....	39
FIG. 6.2	Interface com o software LAbVIEW.....	40
FIG. 7.1	Caixa plástica contendo os sensores instalados.....	42
FIG. 7.2	Sensores ligados ao computador.....	42
FIG. 7.3	Modelo do veículo visto lateralmente.....	43
FIG. 7.4	Automodelo DTX na ausência e presença da carenagem.....	44
FIG. 7.5	Baja acoplado com a caixa dos sensores.....	45
FIG. 7.6	Lombada para o Baja.....	45
FIG. 7.7	Veículo real com a caixa dos sensores.....	47
FIG. 7.8	Lombada para veículo Palio.....	48
FIG. 8.1	Teste da Similaridade de Arfagem.....	52
FIG. 8.2	Teste da Similaridade de Rolagem.....	53
FIG. 8.3	Acelerações do Baja para Movimento de Arfagem.....	53
FIG. 8.4	Acelerações do Palio para Movimento de Arfagem.....	54
FIG. 8.5	Acelerações do Baja para Movimento de Rolagem.....	55
FIG. 8.6	Acelerações do Palio para Movimento de Rolagem.....	55
FIG. 8.7	Modelo de um Veículo para Análise dos Pneus.....	56
FIG. 8.8	Deslocamento Adimensional do Pneu Dianteiro Esquerdo Modelo de Arfagem do Baja.....	58
FIG. 8.9	Deslocamento Adimensional do Pneu Dianteiro Direito Modelo de Arfagem do Baja.....	58
FIG. 8.10	Deslocamento Adimensional do Pneu Traseiro Esquerdo Modelo de Arfagem do Baja.....	59

FIG. 8.11	Deslocamento Adimensional do Pneu Traseiro Direito Modelo de Arfagem do Baja.....	59
FIG. 8.12	Deslocamento Adimensional do Pneu Dianteiro Esquerdo Modelo de Rolagem do Baja.....	60
FIG. 8.13	Deslocamento Adimensional do Pneu Dianteiro Direito Modelo De Rolagem do Baja.....	61
FIG. 8.14	Deslocamento Adimensional do Pneu Traseiro Esquerdo Modelo de Rolagem do Baja.....	61
FIG. 8.15	Deslocamento Adimensional do Pneu Traseiro Direito Modelo de Rolagem do Baja.....	62
FIG. 8.16	Deslocamento Adimensional do Pneu Dianteiro Esquerdo Modelo de Arfagem do Palio.....	63
FIG. 8.17	Deslocamento Adimensional do Pneu Dianteiro Direito Modelo de Arfagem do Palio.....	63
FIG. 8.18	Deslocamento Adimensional do Pneu Traseiro Esquerdo Modelo de Arfagem do Palio.....	64
FIG. 8.19	Deslocamento Adimensional do Pneu Traseiro Direito Modelo de Arfagem do Palio.....	64
FIG. 8.20	Deslocamento Adimensional do Pneu Dianteiro Esquerdo Modelo de Rolagem do Palio.....	65
FIG. 8.21	Deslocamento Adimensional do Pneu Dianteiro Direito Modelo de Rolagem do Palio.....	66
FIG. 8.22	Deslocamento Adimensional do Pneu Traseiro Esquerdo Modelo de Rolagem do Palio.....	66
FIG. 8.23	Deslocamento Adimensional do Pneu Traseiro Direito Modelo de Rolagem do Palio.....	67

LISTA DE TABELAS

TAB. 3.1	Parâmetros Dimensionais.....	25
TAB. 3.2	Alguns Parâmetros Associados à Dinâmica Veicular	26
TAB. 3.3	Grupos Π de Roll e Dinâmica Vertical Veicular	27
TAB. 7.1	Valores Referentes a Massa Suspensa do Baja	46
TAB. 7.2	Valores Referentes a Massa Não-Suspensa do Baja.....	47
TAB. 7.3	Valores Referentes a Massa Suspensa do Palio.....	48
TAB. 7.4	Valores Referentes a Massa Não-Suspensa do Palio.....	49
TAB. 7.5	Valores das Distâncias	50
TAB. 8.1	Grupos Π Adimensionais do Modelo Veicular	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABREVIATURAS

ADC	-	Analog-to-Digital Conversion
AHRS	-	Attitude Heading Reference System
cm	-	centímetro
CFD	-	Computational Fluid Dynamics
cc	-	cilindrada
DTX	-	Duratrax
DMP	-	Digital Motion Processor
FTDI	-	Future Technology Devices International
GHR	-	Gazis-Herman-Rothery
GPS	-	Global Position System
IDE	-	Integrated Development Environment
IDM	-	Intelligent Driver Model
INS	-	Inertial Navigation System
IMU	-	Inertial Measurement Unit
IME	-	Instituto Militar de Engenharia
IRS	-	Illinois Roadway Simulator
LabVIEW	-	Laboratory Virtual Instrument Engineering
MEMS	-	MicroElectroMechanical Systems
MPU	-	Motion Processing Unit
MHz	-	Mega-Hertz
Nfr	-	Número de Froude
OV	-	Optimal Velocity
PURRS	-	Pennsylvania State University Rolling Roadway Simulator

RMC	-	Radio-Controlled Model
SIS	-	Scaled Interactive Simulation
Str	-	Número de Strouhal
USB	-	Universal Serial Bus
VANT	-	Veículo Aéreo Não Tripulado
VSA	-	Veículo Submarino Autônomo
VTA	-	Veículos Terrestres Autônomos
HMMWV	-	High-Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle

SÍMBOLOS

a_y	-	Aceleração lateral
a_x	-	Aceleração longitudinal
a_z	-	Aceleração vertical
b	-	Constante de amortecimento
b_{dd}	-	Amortecimento dianteiro direito
b_{de}	-	Amortecimento dianteiro esquerdo
b_{td}	-	Amortecimento traseiro direito
b_{te}	-	Amortecimento traseiro esquerdo
b_{pdd}	-	Amortecimento do pneu dianteiro direito
b_{pde}	-	Amortecimento do pneu dianteiro esquerdo
b_{ptd}	-	Amortecimento do pneu traseiro direito
b_{pte}	-	Amortecimento do pneu traseiro esquerdo
$\frac{dz}{dt}$	-	Velocidade vertical

$\frac{dz^*}{dt^*}$	-	Velocidade vertical adimensional
$\frac{dz_r^*}{dt^*}$	-	Excitação de base adimensional (velocidade)
$\frac{dz_r}{dt}$	-	Excitação de base (velocidade)
F_D	-	Força normal eixo dianteiro
F_T	-	Força normal eixo traseiro
g	-	Aceleração da gravidade
h_r	-	Altura centro de gravidade
I_{xx}	-	Momento de inércia eixo longitudinal (X)
K	-	Rigidez da mola
K_{dd}	-	Rigidez dianteira direita
K_{de}	-	Rigidez dianteira esquerdo
K_{td}	-	Rigidez traseira direita
K_{te}	-	Rigidez traseira esquerda
K_{pdd}	-	Rigidez da mola do pneu dianteiro direito
K_{pde}	-	Rigidez da mola do pneu dianteiro esquerdo
K_{ptd}	-	Rigidez da mola do pneu traseiro direito
K_{pte}	-	Rigidez da mola do pneu traseiro esquerdo
L	-	Dimensão de comprimento
l	-	Comprimento entre-eixos do veículo
L_D	-	Distância do centro de gravidade ao eixo dianteiro
L_T	-	Distância do centro de gravidade ao eixo traseiro
M	-	Dimensão de massa

M_{NS}	-	Massa não-suspensa
M_s	-	Massa suspensa
m	-	Massa
mts	-	Metros
m_P	-	Massa do pneu
m_{pdd}	-	Massa do pneu dianteiro direito
m_{pde}	-	Massa do pneu dianteiro traseiro
m_{ptd}	-	Massa do pneu traseiro direito
m_{pte}	-	Massa do pneu traseiro esquerdo
T	-	Dimensão de tempo
t	-	Tempo
t^*	-	Tempo adimensional
V	-	Dimensão de velocidade
v	-	Velocidade
z	-	Deslocamento vertical da massa
z^*	-	Deslocamento adimensional
z_{eq}	-	Deslocamento da massa até a posição de equilíbrio estático
z_r	-	Excitação de base (deslocamento)
z_r^*	-	Excitação de base adimensional (deslocamento)
ζ	-	Constante de tempo
ν	-	Frequência natural
θ	-	Ângulo de rolagem/roll

ϕ	-	Ângulo de arfagem/pitch
ψ	-	Ângulo de guinada/yaw
ω_x	-	Velocidade angular longitudinal
ω_y	-	Velocidade angular lateral
ω_z	-	Velocidade angular vertical
Π	-	Pi

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo abordar experimentalmente similaridade dinâmica veicular, através da correspondência entre os grupos Π adimensionais, entre um veículo de escala reduzida e um real. Os modelos foram colocados em uma pista projetada, com sujeitas entradas diferentes, ou seja, lombadas de acordo com as suas respectivas escalas.

Os veículos foram monitorados por meio de uma unidade de medida inercial, IMU (Inertial Measurement Unit), responsável na obtenção de informações sobre a posição, velocidade e a orientação do veículo. Com a utilização do hardware Arduimu V3, composta por acelerômetros, giroscópios e magnetômetros triaxiais, de tecnologia de sistema microeletromecânico MEMS (MicroElectroMechanical System) de baixo custo.

Instalaram-se a Unidade de Medida Inercial e o sensor posicionamento absoluto GPS (Global Position System) nas plataformas robóticas móveis, nos veículos, de modo a gerar os dados. Este sistema fez a transmissão dos dados referentes aos sensores a um computador, por meio de uma comunicação sem fio em tempo real. A coleta, o armazenamento e o processamento de dados realizaram-se com o software LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench).

ABSTRACT

This work aims to address experimentally vehicle dynamics similarity by matching the dimensionless Π groups, between a compact car and a real scale. The models were placed in a track designed with different entries subject, or bumps in accordance with their respective scales.

The vehicles were monitored by an inertial measurement unit, IMU (Inertial Measurement Unit) responsible to obtain information about the position, velocity and orientation of the vehicle. With the use of hardware Arduimu V3, consisting of accelerometers, gyroscopes and magnetometers triaxial, microeletromecânico system of MEMS (Microelectromechanical System) low-cost technology.

Settled the Inertial Measurement Unit and sensor absolute positioning GPS (Global Position System) in mobile robotic platforms, in vehicles, in order to generate the data. This system has made the transmission of data on the sensors to a computer via a wireless communication in real time. The collection, storage and processing of data were performed with LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) software.

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Acidentes automobilísticos causam várias mortes, e consequências irreparáveis às pessoas. Felizmente, a tecnologia está proporcionando automóveis mais seguros, com auxílio de estudos da dinâmica veicular, por meio da validação de testes com modelos em escala. A utilização desses modelos é muito importante, pois apresentam custo reduzido, segurança e a facilidade para realização dos testes.

Uma área em que aborda esse assunto e tem sido muito aplicada refere-se aos problemas de fluidos devido às dificuldades de se encontrar a solução numérica. A utilização desta técnica tem sido aplicada na área de sólidos, principalmente no ramo de veículos, devido a ser eficaz e seguro.

A similaridade dinâmica pode ser mostrada utilizando o Teorema dos Π de Buckingham, substituindo os parâmetros dimensionais físicos em quantidades adimensionais.

Deste modo, este trabalho apresentou de uma forma experimental a validação experimental da teoria de (Moreira, A. L., 2011) na qual houve uma predição da performance de um protótipo, através de um modelo em escala, utilizando estudos da similaridade dinâmica.

1.2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi de apresentar a validação experimental da teoria da similaridade aplicada à dinâmica veicular de (Moreira, A. L., 2011), por meio da utilização de um automodelo, ou seja, um carro de escala 1:5, a combustão, modelo Baja, pertencente à Seção de Engenharia Mecânica e de Materiais, do IME (Instituto Militar de Engenharia). Comparando os resultados com veículo de tamanho real, isto é, um Fiat Palio.

Esses veículos terrestres passaram por trajetórias similares, sendo uma lombada, para analisar os comportamentos de arfagem e rolagem, por meio dos grupos Π adimensionais.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está apresentado em 9 capítulos, sendo que neste capítulo 1 se destina uma introdução ao assunto de similaridade dinâmica. Assim como o objetivo, a organização e o posicionamento do texto.

No capítulo 2 apresenta revisão bibliográfica do assunto em questão.

No capítulo 3 é realizado o assunto da similaridade dinâmica, empregando os grupos Π adimensionais, em que foram responsáveis pela obtenção da correspondência entre modelos de escalas diferentes.

No capítulo 4, a instrumentação do sistema foi apresentada, explicitando os procedimentos adotados para fixar os sensores nos veículos. E apresentados os conceitos fundamentais ligados ao processo da navegação.

No capítulo 5 é feita uma introdução ao hardware Arduimu o qual contém os sensores e a eletrônica. E foi explicada a razão da sua utilização e manuseio.

O capítulo 6, os softwares são exibidos. Mostra como ocorreu a implementação do algoritmo de referência de rumo e atitude ARHS (Attitude Heading Reference System). E a utilização do LabVIEW, sendo responsável pela aquisição dos dados.

O capítulo 7, as descrições dos sistemas são abordadas.

O Capítulo 8, descreve a análise dos testes e resultados.

O capítulo 9 são apresentadas as conclusões registradas dos testes realizados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A abordagem da similaridade dinâmica veicular tem sido utilizada em vários trabalhos, de maneira a representar uma correspondência entre um veículo de escala reduzida e de tamanho real.

Aspecto ligado com a facilidade dos locais apropriados para realização do teste, a segurança das pessoas e a relação com custo reduzido, tem-se voltado esforços na utilização de modelos em escala. Ao contrário, do uso de veículos terrestres reais, os quais são perigosos e caros.

Realizou-se uma revisão bibliográfica de trabalhos de similaridade dinâmica por vários autores, tanto da área veicular, como de fluidos.

Neihouse, A. I. et al. (1950) foram efetuados experimentos em um modelo de avião com escala reduzida, por meio de testes dinâmicos.

Brennan, S et al. (1998) realizaram testes no simulador chamado IRS (Illinois Roadway Simulator), o qual consistiu em um equipamento para estudo da dinâmica e controle, com a utilização do veículo terrestre de escala 1:10. Desenvolveram uma modelagem matemática na finalidade de controle lateral.

No trabalho posterior, Brennan, S et al. (2000) trataram da semelhança com relação as respostas dinâmicas de um veículo terrestre com escala reduzida no simulador de estrada IRS (Illinois Roadway Simulator).

Hoblet, M. P. C. (2003) fez uma análise da dinâmica lateral de um veículo terrestre, sem a presença da dinâmica de rolagem e arfagem. No mesmo ano, Bullimore, S. R. et al. (2003) tratou de animais terrestres com tamanhos diferentes, os quais moviam-se de maneira similar dinamicamente.

Brennan, S. (2004) com objetivo de obter a similaridade dinâmica de um veículo terrestre, abordou a dinâmica de rolagem e arfagem para realização dos testes. Gretzschel, M. et al. (2004) realizou testes em uma plataforma de esteira rolante com um veículo terrestre de escala 1:5, para produção do comportamento dinâmico de um veículo terrestre real. Ainda, Polley, M. et al. (2004) avaliou as características não lineares de jogos de pneus em modelos de escala reduzida e real. Com a aplicação dos grupos adimensionais, isto é, o Teorema dos Π de Buckingham.

Na tese de doutorado, Li, Y. (2005) utilizou uma análise dimensional, a qual forneceu vantagens significativas na formulação e solução de problemas de controle. Na tese de doutorado, Lima, S. R. S. (2005) fez estudo da integração do GPS (Global Position System) com um sistema de navegação inercial para avaliação de uma IMU (Inertial Measurement Unit) baseada em MEMS (MicroElectroMechanical Systems) de baixo custo. Assim, realizou levantamentos geodésicos.

Vaughan, C. L. et al. (2007), assim como Bullimore, S. R. et al. (2007), desenvolveram procedimentos e análises com relação ao comprimento de pernas, para espécies humanas com diferentes tamanhos. Os parâmetros adimensionais foram de extrema importância na obtenção desta similaridade dinâmica, no auxílio dessas caminhadas. No mesmo ano, Shen, Y. T. et al. (2007) alcançaram a similaridade dinâmica para um modelo de um submarino, com a utilização do rádio controle RMC (Radio-Controlled Model). Na dissertação de mestrado, De Souza Pinto, J. L. (2007) abordou a navegação inercial, com recurso de uma ferramenta computacional com perfis dinâmicos para situações reais. Analisou-se cada parâmetro separadamente, como aceleração e a velocidade.

Verma, R. et al. (2008) versaram sobre a teoria dos Π de Buckingham, sendo enfatizada uma correspondência da dinâmica longitudinal de um veículo terrestre de modelo em escala 1:10 com um veículo terrestre de multiuso de alta mobilidade HMMWV (High-Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle). Esta teoria de Buckingham foi analisada em Lapapong, S. et al. (2008) no controle com veículos terrestres em escala na atuação da dinâmica do chassi em relação um modelo escala maior. Testes experimentais foram exibidos e contaram com simulador de estrada rolante chamado de PURRS (Pennsylvania State University Rolling Roadway Simulator), o qual modelo foi livremente conduzido em uma superfície em movimento. Delattre, N. et al. (2008) exibiram um estudo do Nfr (número de Froude) e do Str (número de Strouhal), nas quais conduziram na similaridade dinâmica durante a corrida. Permitiram a remoção dos efeitos do tamanho e a previsão do comportamento de um sistema de tamanho completo, por meio de um modelo em escala. Este trabalho teve uma avaliação desses números e comparação numa condição de controle, a fim da identificação de condições experimentais mais relevantes para estabelecimento da similaridade dinâmica entre corredores. Em, Fester, V. G. et al. (2008) aplicaram o número de Reynolds, assim a similaridade dinâmica pôde ser alcançada com

válvulas de globo para fluidos Newtonianos e não-Newtonianos. Em, Merling, M. C. C. (2007) aplicou projetos de suspensão de veículos terrestres, por meio de simulações e testes experimentais. Jazar, R. N. (2008) abordou a dinâmica veicular, com relação a teorias e aplicações.

Phanomchoeng, G. et al. (2009) descreveram as experiências realizadas com acelerômetros verticais e laterais na obtenção da correspondência de um veículo terrestre real com abordagem do teorema dos Π de Buckingham, através do modelo em escala reduzida, 1:8. Simulações foram avaliadas na utilização do software CARSIM, o qual permitiu avaliar na prevenção de capotamento. Porém, em Witaya, W. et al. (2009) aplicaram testes no veículo terrestre em escala 1:10, o qual foi alimentado por um motor elétrico com quatro transmissões de velocidade, através da plataforma SIS (Scaled Interactive Simulation). Na dissertação de mestrado de Junior, J. A. F. (2009) implementou e simulou um algoritmo de navegação inercial integrado com um GPS (Global Position System), na geração da trajetória, em tempo real.

Na tese de doutorado, Moreira, A. L. (2011) apresentou a dinâmica vertical de um veículo terrestre, para abordagem da similaridade dinâmica entre um modelo em escala e um protótipo, através dos grupos Π adimensionais. Entretanto, em Kim, H et al. (2011) utilizaram testes com simulador no fornecimento da dinâmica do veículo terrestre real, o qual estrutura de armação teve a função da realização do movimento de rolagem das rodas em 4 posições e inclinações para assim, conhecer o ângulo de cambagem. Carvalho, A. G. (2011) apresentou os erros presentes nos sensores inerciais de tecnologia MEMS (MicroElectroMechanical Systems). De modo a melhorar o desempenho de um sistema integrado, com sistema de navegação inercial/GPS (Global Position System), através do Filtro de Kalman. Na dissertação de mestrado de Santana, D. D. S. (2011) houve a preparação de um percurso com veículo terrestre em uma trajetória fechada. Os testes basearam-se em sistema de navegação inercial strapdown, utilizando uma unidade de medida inercial de baixo custo, um hodômetro e uma bússola digital.

De Amorim, A. I. M. (2012) recorreu a plataformas móveis na estimação de orientação sem auxílio do GPS (Global Position System), através do método quaternions. Foram usados sensores de baixo custo, em que na placa, apresentou 9 graus de liberdade, composta por acelerômetros, giroscópios e magnetômetros

triaxiais. No mesmo ano, Gunawan, F. E. (2012) analisou características de modelos: GHR (Gazis-Herman-Rothery), IDM (Intelligent Driver Model) e OV (Optimal Velocity).

3 SIMILARIDADE

A aplicação da técnica de similaridade no estudo do comportamento dinâmico de veículos tem sido muito importante, pois com o desenvolvimento de modelos veiculares em escala para prever o comportamento de veículos reais, o tempo, os custos e os riscos de acidentes durante os testes estão sendo minimizados (Witaya, W. et al.,2009).

Nesse sentido, em que se aborda a similaridade dinâmica, por prever o comportamento de um modelo real, através de um modelo em escala (Brennan, S et al.,1998).

3.1 SIMILARIDADE DINÂMICA

Restrições de projetos externos, tais como custos, propriedades dos materiais, recursos, regulamentações governamentais e a infraestrutura influenciam o design da maioria dos sistemas de engenharia (Li, Y., 2005). Diante disso, tem-se recorrido amplamente às técnicas de modelagens e simulações, por não depender de protótipos físicos nos testes realizados.

Dois sistemas de escalas diferentes apresentam similaridade dinâmica, se seus grupos Π adimensionais têm uma semelhança com relação aos respectivos valores (Phanomchoeng, G. et AL,. 2009).

A similaridade dinâmica pode ser completa, no caso, em que os valores dos grupos Π adimensionais são iguais. E, pode ser também incompleta, quando esses valores não são iguais, mas sim bem próximos.

Para se alcançar a similaridade dinâmica, recorre-se a uma ferramenta de extrema importância, o Teorema dos Π de Buckingham (Lapapong, S. et al.,2008). E também, ao método de modelos matemáticos.

3.1.1 TEOREMA DOS Π DE BUCKINGHAM

O Teorema dos Π de Buckingham é importante no fato, de que a lei de governo do sistema, a forma da equação não precisa ser conhecida (Brennan, S.,

2004). A condição desse Teorema parte que, se dois sistemas têm os grupos Π adimensionais similares, logo apresentam a similaridade dinâmica.

Para se iniciar a determinação dos grupos adimensionais por meio do Teorema Π de Buckingham, deve-se fazer uma seleção dos parâmetros no sistema dimensional (Moreira, A. L., 2011).

Abaixo se encontra a TAB. 3.1 referentes a alguns parâmetros dimensionais.

TAB. 3.1 – Parâmetros Dimensionais

Símbolo	Descrição	Dimensão
M	Massa do Veículo	[M]
L	Comprimento do Veículo	[L]
V	Velocidade	[LT ⁻¹]
I _{xx}	Momento de Inércia eixo longitudinal (X)	[ML ²]
G	Gravidade	[LT ⁻²]

Na literatura, as bases mais comuns de se expressar a semelhança dinâmica em veículos são: comprimento-massa-tempo [LMT] ou velocidade-massa-tempo [VMT].

A seguir foram retirados alguns parâmetros da literatura (Phanomchoeng, G. et al., 2009), de modo que se encontram alguns grupos Π adimensionais de rolagem e dinâmica vertical veicular. Conforme, mostra a TAB. 3.2.

TAB. 3.2 – Alguns Parâmetros Associados à Dinâmica Veicular

Parâmetros	Unidade	Massa	Comprimento	Tempo
θ , Ângulo de Rolagem	Adimensional	0	0	0
M_s , massa Suspensa	Kilograma	1	0	0
K, rigidez da Mola	Kilograma/segundo ²	1	0	-2
I_{xx} , momento de Inércia eixo longitudinal (X)	Kilograma.metro ²	1	2	0
a_y , aceleração Lateral	metro/segundo ²	0	1	-2
h_r , altura do Centro de Gravidade	metro	0	1	0

Neste caso, temos 6 parâmetros ($i=6$) para representar a dinâmica veicular e uma unidade básica de 3 dimensões ($j=3$), ou seja, massa (M), comprimento (L) e tempo (T). Foram utilizadas a massa suspensa (M_s), o altura do centro de gravidade (h_r) e aceleração lateral (a_y) para representar a unidade em um espaço em 3 dimensões.

Logo, foram obtidos 3 grupos adimensionais. Assim, a EQ. 3.1 expressa:

$$\Pi = i - j = 6 - 3 = 3 \quad (3.1)$$

Abaixo se encontram os grupos adimensionais da literatura de (Phanomchoeng, G. et al., 2009) derivados dessas substituições acima, por meio da TAB. 3.3.

TAB. 3.3 – Grupos Π de Roll e Dinâmica Vertical Veicular

Parâmetros	Espaço Dimensional	Grupos Π
(M_s, h_r, a_y, θ)	$[M]^0[L]^0[LT^{-2}]^0$	$\Pi_1 = \theta$
(M_s, h_r, a_y, I_{xx})	$[M]^{-1}[L]^{-2}[LT^{-2}]^0[ML^2]^{-1}$	$\Pi_2 = \frac{I_{xx}}{M_s h_r^2}$
(M_s, h_r, a_y, K)	$[M]^{-1}[L]^1[LT^{-2}]^{-1}[MT^{-2}]^{-1}$	$\Pi_3 = \frac{K h_r}{a_y M_s}$

Esses são alguns grupos Π adimensionais, porém na literatura encontram-se muitos outros para serem aplicados em testes da similaridade dinâmica veicular.

3.1.2 MODELO MATEMÁTICO

Nesta parte com a utilização de um modelo matemático, foi abordada a adimensionalização de uma equação diferencial, de um $\frac{1}{4}$ de veículo com 1 grau de liberdade, conforme se observa na FIG. 3.1, resultando nos grupos Π adimensionais, abordada por (Moreira, A. L., 2011).

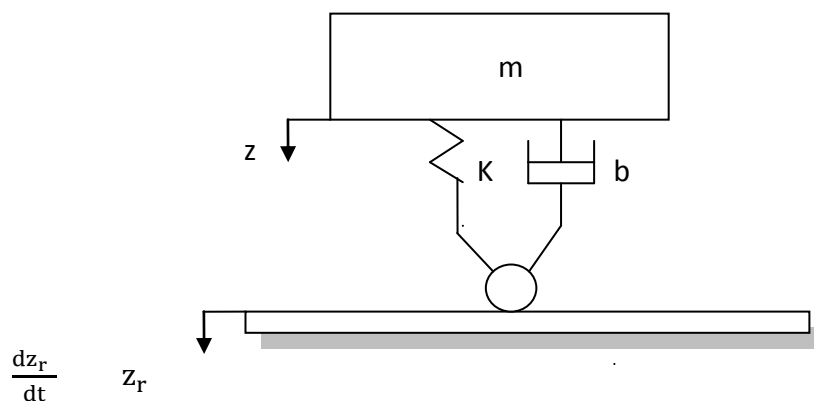


FIG. 3.1 – Modelo de $\frac{1}{4}$ do Veículo

Como mostra a FIG. 3.1, o chassi do veículo passa ser esquematizado por uma massa (m), em que esta equivale a um quarto da massa total do veículo. A massa está ligada por uma mola de “rigidez elástica K ”, e por um “amortecedor de

amortecimento b ", sendo colocados em paralelo, em relação ao pneu-roda, em que está ligada ao solo.

Aplicando a Lei de Newton em relação à massa do sistema, chegou-se a seguinte equação diferencial, no modelo dimensional, dada pela EQ. 3.2, abaixo:

$$m \cdot \frac{d^2 z}{dt^2} + b \cdot \left(\frac{dz}{dt} - \frac{dz_r}{dt} \right) + k \cdot (z - z_r) = 0 \quad (3.2)$$

De modo a realizar a adimensionalização da EQ. 2.2, foi parametrizada a coordenada a qual representa o deslocamento vertical z , a velocidade vertical $\frac{dz}{dt}$, e o tempo t .

A parametrização da coordenada z , em metros, utilizou-se o valor da variável z_{eq} , a qual simbolizou o deslocamento da massa do sistema, em metros, até a posição de equilíbrio estático, dada pela EQ. 3.3. O parâmetro da coordenada z no modelo adimensional z^* está expresso pela EQ. 3.4.

$$z_{eq} = \frac{m \cdot g}{k} \quad (3.3)$$

$$z^* = \frac{z}{z_{eq}} \quad (3.4)$$

ou

$$z = z_{eq} z^* \quad (3.5)$$

Agora, para parametrizar o tempo t , em segundos, definiu-se um tempo ζ , expresso na EQ. 3.6. E o tempo no domínio adimensional dado por, t^* , pela EQ. 3.7.

$$\zeta = \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (3.6)$$

$$t^* = \frac{t}{\zeta} \quad (3.7)$$

Os termos $\frac{dz}{dt}$, $\frac{dz_r}{dt}$ e $\frac{d^2 z}{dt^2}$ da EQ. 3.2, no domínio adimensional estão expressos abaixo pelas EQ. 3.8, EQ.3.9 e EQ. 3.10.

$$\frac{dz}{dt} = \frac{d\left(\frac{z}{z_{eq}}\right) z_{eq}}{d\left(\frac{t}{\zeta}\right) \zeta} = \frac{z_{eq}}{\zeta} \cdot \frac{dz^*}{dt^*} \quad (3.8)$$

$$\frac{dz_r}{dt} = \frac{d\left(\frac{z_r}{z_{eq}}\right) z_{eq}}{d\left(\frac{t}{\zeta}\right) \zeta} = \frac{z_{eq}}{\zeta} \cdot \frac{dz_r^*}{dt^*} \quad (3.9)$$

$$\frac{d^2z}{dt^2} = \frac{d}{d\left(\frac{t}{\zeta}\right) \zeta} \left[\frac{d\left(\frac{z}{z_{eq}}\right) z_{eq}}{d\left(\frac{t}{\zeta}\right) \zeta} \right] = \frac{z_{eq}}{\zeta^2} \cdot \frac{d^2z^*}{dt^{*2}} \quad (3.10)$$

Realizando as substituições das EQ. 3.5, EQ. 3.8, EQ. 3.9 e EQ. 3.10, na EQ. 3.2, obtemos:

$$\frac{m \cdot z_{eq}}{\zeta^2} \frac{d^2z^*}{dt^{*2}} + \frac{b \cdot z_{eq}}{\zeta} \left(\frac{dz^*}{dt^*} - \frac{dz_r^*}{dt^*} \right) + k \cdot z_{eq} (z^* - z_r^*) = 0 \quad (3.11)$$

Como a EQ. 2.11 ainda permanece com dimensão de força, esta equação foi dividida pelo produto $m \cdot g$, o que a torna adimensional, resultando na EQ. 3.12.

$$\frac{m \cdot z_{eq}}{m \cdot g \cdot \zeta^2} \frac{d^2z^*}{dt^{*2}} + \frac{b \cdot z_{eq}}{m \cdot g \cdot \zeta} \left(\frac{dz^*}{dt^*} - \frac{dz_r^*}{dt^*} \right) + \frac{k \cdot z_{eq}}{m \cdot g} (z^* - z_r^*) = 0 \quad (3.12)$$

E nos grupos Π adimensionais dados pelas EQ. 3.13, EQ. 3.14 e EQ. 3.15.

$$\Pi_1 = \frac{m \cdot z_{eq}}{m \cdot g \cdot \zeta^2} \quad (3.13)$$

$$\Pi_2 = \frac{b \cdot z_{eq}}{m \cdot g \cdot \zeta} \quad (3.14)$$

$$\Pi_3 = \frac{k \cdot z_{eq}}{m \cdot g} \quad (3.14)$$

3.2 SIMILARIDADE DINÂMICA ENTRE OS BAJAS

No sistema de coordenadas utilizadas o eixo longitudinal X aponta para frente do veículo, o eixo lateral Y aponta para o lado direito do veículo e o eixo vertical Z para baixo. O sentido positivo dos ângulos segue a regra da mão direita. A rotação em torno do eixo X denomina-se roll/rolagem, sobre eixo Y denomina-se

pitch/arfagem e sobre eixo Z denomina-se yaw/guinada, como se observa na FIG.3.2.

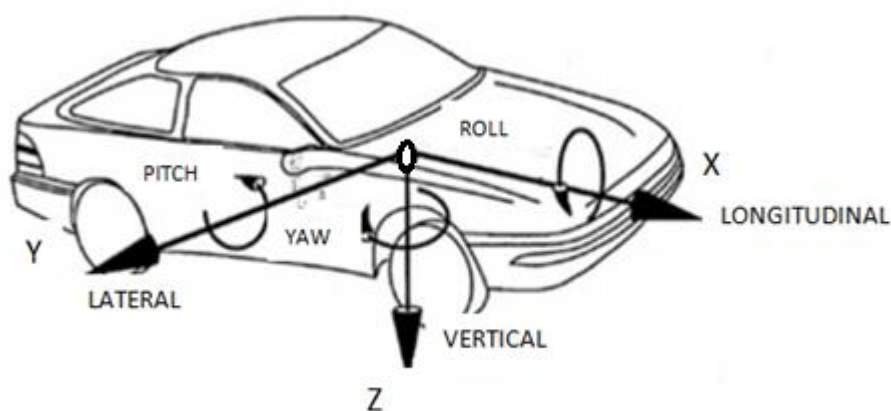


FIG. 3.2 – Sistemas de eixos para um veículo

As rotações são descritas pelos ângulos rolagem (θ), arfagem (ϕ) e guinada (ψ), para representar a orientação do corpo. A FIG. 3.3 mostra esses ângulos separadamente para cada tipo de visualização no veículo como, por exemplo, o movimento de rolagem visto frontalmente (a), o movimento de arfagem lateralmente (b) e o movimento de guinada superiormente (c).

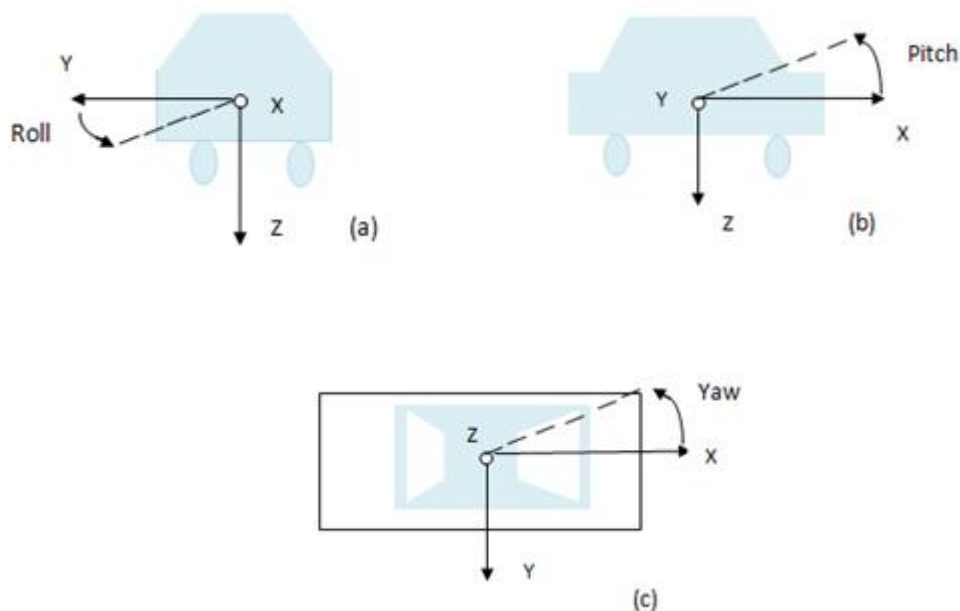


FIG. 3.3 – (a) Movimento de rolagem. (b) Movimento de arfagem. (c) Movimento de guinada.

A presença da rolagem pode ser observada de vários modos, como o caso do veículo passa somente com eixo esquerdo ou direito, por irregularidades na estrada, como buracos. Então, sofre inclinação em relação sua posição inicial, ou seja, o da superfície plana.

A arfagem pode ser visualizada, de maneira que o veículo passa por uma lombada, com todos seus eixos simultaneamente. Na subida dessa lombada, a suspensão traseira sofre uma compressão, assim ocorre a inclinação da parte dianteira do veículo. No caso, da descida da lombada, a suspensão dianteira comprime, logo a dianteira deste inclina-se para baixo.

Na guinada percebe-se através da mudança de direção do veículo em relação à posição que se encontrava anteriormente, podendo ocorrer movimento para esquerda ou para direita.

4 INSTRUMENTAÇÃO

4.1 SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO

Segundo (De Souza Pinto, J. L., 2007), “A navegação inercial iniciou-se por volta de 1900, na Alemanha e nos Estados Unidos, visando aplicações militares”. E com o passar do tempo passou-se a ser utilizada no meio civil.

A navegação inercial é amplamente empregada na navegação de VTA (Veículos Terrestres Autônomos), VSA (Veículo Submarino Autônomo), VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado), robótica, guiagem de torpedos e mísseis, e entre outras utilidades (Santana, D. D. S., 2011). Deste modo, a demanda por essa tecnologia está crescendo, e com os recentes avanços na construção desses dispositivos, estes estão ficando mais leves, compactos e relativamente precisos.

A navegação inercial, com auxílio dos sensores inerciais, acelerômetros e giroscópios, obtêm-se as informações sobre a posição, a velocidade e atitude do veículo (De Amorim, A. I. M., 2012).

O sistema de navegação inercial INS (Inertial Navigation System) caracteriza-se por ser um método autônomo, ou seja, não necessita de informações externas, como de um sistema de posicionamento global GPS (Global Position System) (De Souza Pinto, J. L., 2007).

Apesar de o INS ser independente recorre-se frequentemente à integração deste com um sistema de navegação auxiliar, GPS, pois a viabilidade de um INS é relativamente baixa, devido aos erros acumulados oriundos das sucessivas integrações numéricas, como no caso de se estabelecer o cálculo da posição ao longo do tempo (Junior, J. A. F., 2009).

4.1.1 UNIDADE DE MEDIDA INERCIAL

A unidade de medida inercial IMU (Inertial Measurement Unit) é composta por uma combinação de sensores inerciais, os acelerômetros e giroscópios, também, por

sensores não-inerciais, ou seja, magnetômetros, sendo controlados por uma eletrônica embarcada (Santana, D. D. S., 2011)

Através da IMU, o acelerômetro fornece as medidas das 3 componentes da aceleração linear, e a partir do giroscópio fornece as medidas das 3 componentes da velocidade angular. E um magnetômetro com as 3 componentes que apresenta a capacidade de medir o azimute, e permite um melhor desempenho para o cálculo da orientação dinâmica no código AHRS (Attitude Heading Reference System), o qual representa a base de uma IMU.

4.1.2 ATTITUDE HEADING REFERENCE SYSTEM

Um AHRS (Attitude Heading Reference System) é um sistema de código, incorporado a uma IMU, em que o processamento de dados de atitude realiza-se por meio de algoritmos, fornecendo os valores dos ângulos de rolagem, arfagem e guinada, velocidades angulares e acelerações (De Amorim, A. I. M., 2012).

4.1.3 SISTEMA DE AUXÍLIO

O GPS (Global Position System) é baseado em navegação por satélite, em que fornece a localização de um objeto com precisão (Lima, S. R. S., 2005). É de livre acesso a qualquer pessoa, por meio de um receptor GPS.

No campo civil, o GPS é muito importante no rastreamento de veículos e pessoas. Na robótica, utiliza-se para navegação de robôs autônomos informando latitude, longitude e altura em que se encontra. No campo militar é de extrema importância, pois realiza o rastreamento de alvos inimigos, mísseis e projéteis. Além de coordenar o movimento das tropas.

A integração de sistema auxiliar, isto é, receptor GPS, com sistemas de navegação inercial vem da utilização de atualizar o INS, e melhora as informações de posição e orientação, através dos dados do GPS. Além de, visar a eliminação de erros do azimute no sistema (Carvalho, A. G., 2011).

4.2 PLATAFORMA STRAPDOWN

A plataforma utilizada neste trabalho foi a Strapdown, a qual consistiu em montar os sensores (acelerômetros, giroscópios, magnetômetros e o GPS) sobre uma base rígida, e embarcaram-se juntamente com sistema eletrônico. De modo que os 3 eixos de cada sensor se apresentaram de forma ortogonal. Assim, foram fixados à estrutura do veículo.

5 PLATAFORMA INERCIAL

5.1 SISTEMA ARDUIMU

O sistema Arduimu consiste em um hardware de extrema importância por ser capaz de fornecer a orientação tridimensional e a localização de robôs, VTA (Veículos Terrestres Autônomos) e VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado).

Neste trabalho, utilizou-se uma versão mais recente, inovadora e de rápido processamento em relação aos outros modelos de hardwares Arduimu, uma unidade de medida inercial, chamada de Arduimu V3.

5.2 SISTEMA ARDUIMU V3

O sistema Arduimu V3 é uma placa sensorial, composta por 3 conjuntos de acelerômetros, giroscópios e magnetômetros, sendo um por cada eixo, resultando em 9 graus de liberdade, assim fornece a orientação tridimensional.

Os sensores utilizados foram os acelerômetros ADXL345, giroscópios ITG3200 e os magnetômetros HMC5883L, sendo todos eles digitais.

O Hardware apresenta uma porta GPS (Global Position System), e um arduino clássico, onde as saídas de todos os sensores foram armazenadas por um microcontrolador Atmega328, sendo executado a uma frequência de 16 MHz. E um regulador de tensão de 3.3 Volts ou 5 Volts. E apresenta um botão reset.

A aquisição desta placa vem do fato de fornecer a ortogonalidade dos 9 sensores; a redução do número de fontes de erro; a sua estabilidade e robustez mecânica. Esta placa encontra-se presente na FIG. 5.1.

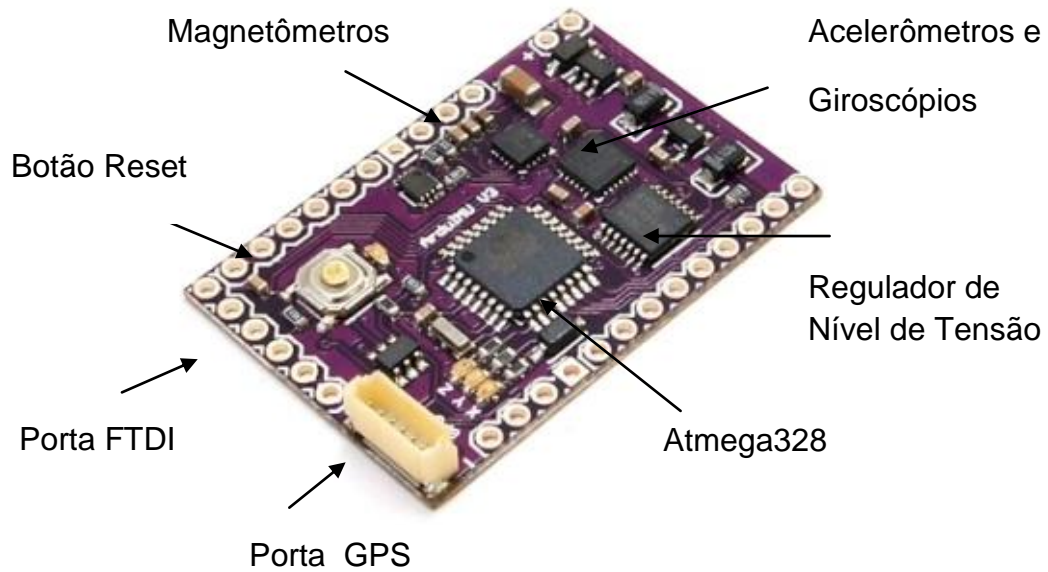


FIG. 5.1 – Placa Arduimu V3

5.2.1 MONTAGEM COM COMPUTADOR

Para se realizar a montagem correta com intuito do estabelecimento da programação no computador, por meio de um software, conectou-se um dispositivo FTDI (Future Technology Devices International) Basic Breakout, de 5 Volts, o qual foi compatível com a placa, como se observa na FIG. 5.2. E posteriormente, foi conectado em um mini cabo USB (Universal Serial Bus), desta maneira estabeleceu-se a comunicação com o computador. A FIG. 5.3 mostra a montagem.

Esta FTDI apresenta um chip FT232RL com a função de fazer a conversão de serial para USB, por meio do RS-232, para transmissão de dados.

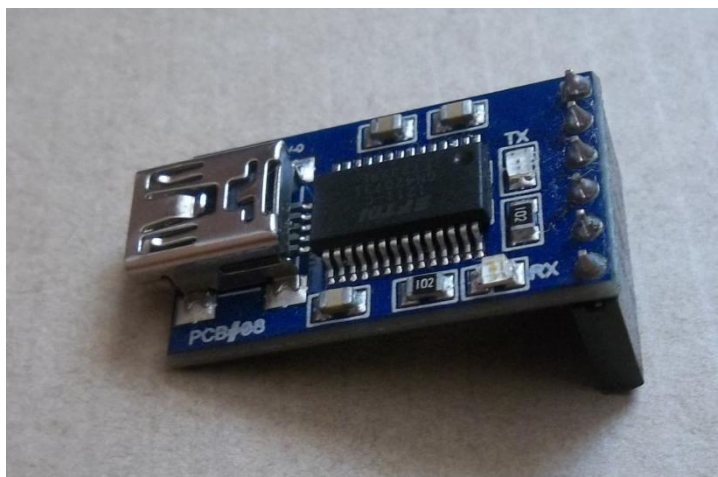


FIG. 5.2 – FTDI Breakout

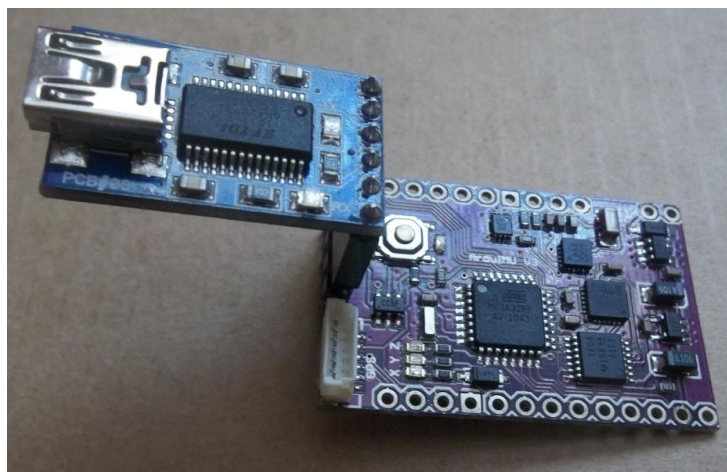


FIG. 5.3 – Montagem da Placa

5.2.2 ELETRÔNICA DA ARDUIMU V3

Os acelerômetros, giroscópios e magnetômetros que estão compondo a Arduimu V3 dispõem de um sinal de tensão o qual varia proporcionalmente com a aceleração linear, a velocidade angular e a magnitude, respectivamente. Implementou-se um conversor analógico para digital ADC (Analog-to-Digital Conversion) sincronizado na conversão dessas informações em formato digital.

O microcontrolador Atmega328 foi conectado via circuitos integrados aos magnetômetros triaxiais, e a uma unidade de processamento de movimento, MPU6000 (Motion Processing Unit). O que simbolizou a união de acelerômetros e

giroscópios triaxiais, com a utilização do processador de movimento digital onboard, a DMP (Digital Motion Processor) no processamento dos dados 9 eixos. Então foram enviadas pela porta serial.

O Atmega328 contém um processador capaz de ser utilizado para o armazenamento de dados. Os procedimentos foram realizados a uma frequência de 16 MHz.

6 SOFTWARES

6.1 CÓDIGO ARDUINO

O código Arduino é um software livre e está aberto em sites que contribui para a sociedade com realizações de projetos. E utiliza bibliotecas com a capacidade de programar em linguagem C/C++. O uso destas proporciona um horizonte de programação mais amplo e diverso quando comparado à utilização apenas de estruturas, valores e funções.

O Arduino IDE (Integrated Development Environment) é um editor de códigos o qual compila e carrega os programas. E depois os envia para a placa.

Antes de fazer o upload do programa, primeiramente escolheu-se a porta USB (Universal Serial Bus) em que se estava o Arduimu V3. Então na tela de visualização no software Arduino foi escolhido ícone Tools – Serial Port – porta. Depois para escolha do modelo da placa, seguimos os seguintes passos, Tools – Board e o modelo da placa. Sendo assim, clicamos em Upload, como mostra a FIG. 6.1. Para o Arduimu V3 o modelo foi Arduino Duemilanove com Atmega328.



FIG. 6.1– Upload

6.2 LABVIEW

O LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) é uma linguagem de computação originada da National Instruments, chamada de linguagem “G”.

Este software foi de uma extrema importância, na aquisição de dados oriundos dos sensores, e assim apresentados na tela para visualização. Isto permitiu a função de gravar os dados obtidos em um arquivo de texto.

Para a execução do programa, escolheu-se a porta serial para estabelecer a comunicação, COM1 e a taxa de transferência, 38400 Bits/segundo. Estes para nosso caso no trabalho.

A FIG. 6.2 apresenta a interface com a tela de observação e com gráficos dos dados oriundos dos sensores, no LabVIEW.

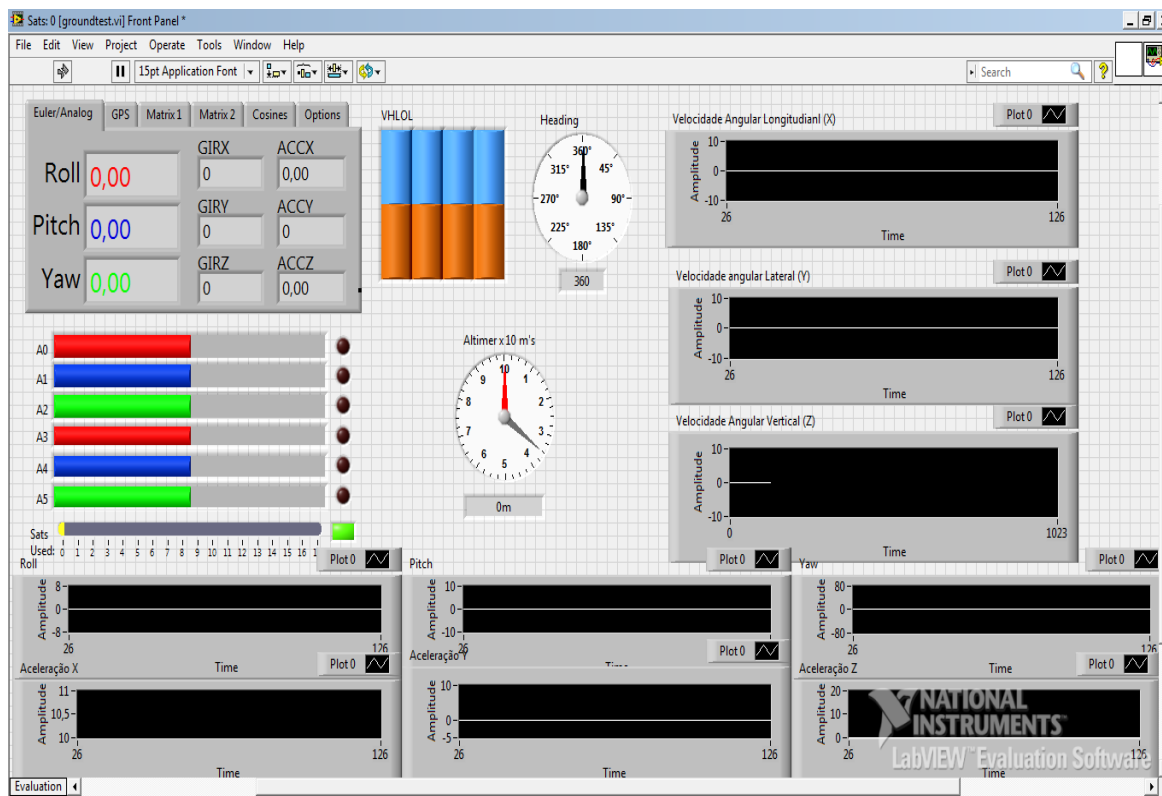


FIG. 6.2 – Interface com o software LabVIEW.

7 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

7.1 COMUNICAÇÃO

Para se estabelecer a comunicação, os dados dos sensores com as informações fornecidas provenientes dos veículos devem ser transmitidos para um computador, de modo que foram realizadas as coletas de dados e feitas as análises.

A plataforma robótica consistiu em um automodelo adaptado com todos os equipamentos necessários embutidos neste, para concretização do trabalho. Então, como existiam vários equipamentos a bordo, tornou-se desnecessário embarcar o computador no automodelo, devido ao seu tamanho e peso.

Para solucionar este problema, adquiriu-se um dispositivo de hardware XBee responsável pela comunicação sem fio por radiofrequência. Sendo utilizado o protocolo ZigBee, o qual simbolizou uma comunicação confiável e simples, com um custo reduzido e baixa potência, e teve um alcance de 90 mts.

7.2 CONEXÃO PARA COMUNICAÇÃO

Para a realização da comunicação a Arduimu esteve ligada serialmente ao GPS, também por um conversor, ligado a XBee. Para o funcionamento do sistema, recorreu-se ao uso de uma bateria de 9 Volts.

A Arduimu possui um regulador de 5 Volts, assim fez esta funcionar na faixa adequada. Esta tensão alimentou o GPS e recorreu-se a um conversor de 3.3 Volts, para assim ligar a XBee. Deste modo, foi realizada a comunicação sem fio. A FIG. 7.1 mostra todos os sensores instalados em uma caixa plástica.

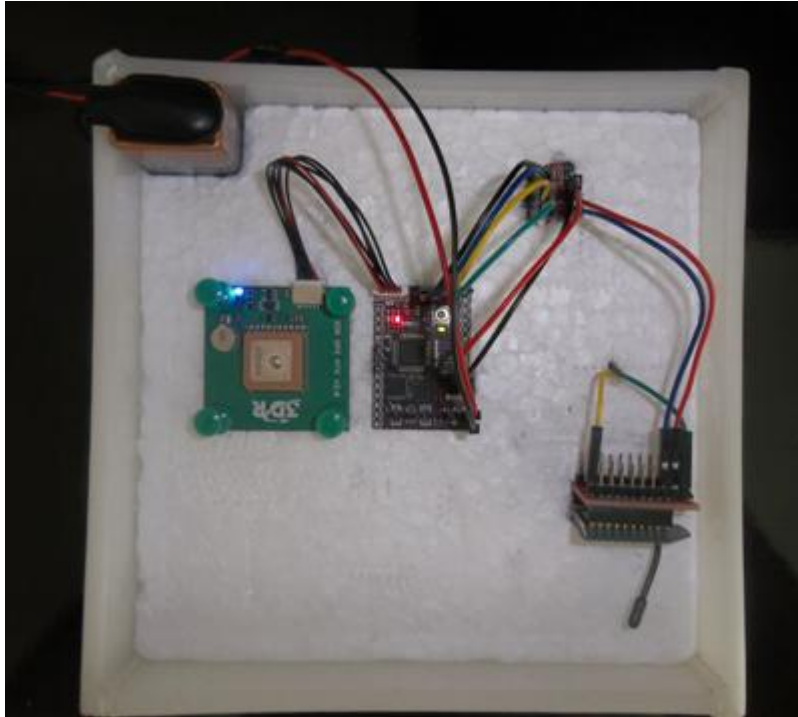


FIG. 7.1 – Caixa plástica contendo os sensores instalados

No computador foi ligada via USB em outro regulador de tensão de 3.3 Volts, e do lado oposto deste, ficou conectado serialmente a uma base de outra XBee. A FIG. 7.2 mostra esses sensores dentro de uma caixa ligada ao computador. Assim, conseguimos aquisição de dados em tempo real.



FIG. 7.2 – Sensores ligados ao computador.

7.3 VEÍCULOS

Este subcapítulo, aborda os veículos utilizados nos testes para a coleta de dados. Antes de expor estes, vamos visualizar visto lateralmente. Dessa maneira conseguimos cálculo de seus centros de gravidade, e analisamos os parâmetros de rigidez e amortecimento. A FIG. 7.3 mostra este modelo.

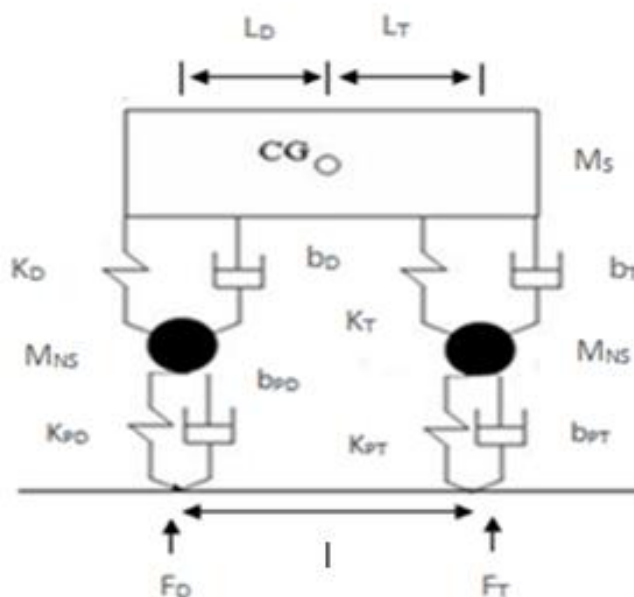


FIG. 7.3 – Modelo do veículo visto lateralmente.

A FIG. 7.3 representa o modelo de um carro, visto lateralmente. O chassi representa a massa suspensa (M_S) e a massa não-suspensa (M_{NS}) as quais englobam o conjunto pneu-roda, embora contenha outros elementos, e rotulou-se como massa do pneu (m_P). l simboliza a distância entre-eixos do veículo. F_D e F_T representam as forças normais atuando nas rodas dianteiras e traseiras, respectivamente.

A massa suspensa foi ligada em sua parte dianteira com a rigidez da mola dianteira (K_D) e um coeficiente de amortecimento dianteiro (b_D). Assim, como na traseira com a rigidez da mola traseira (K_T) e um coeficiente de amortecimento traseiro (b_T).

A massa do pneu na parte dianteira está ligada a rigidez da mola do pneu dianteiro (K_{PD}) e o amortecimento do pneu dianteiro (b_{PD}). Como, na traseira está

ligada a rigidez da mola do pneu traseiro (K_{PT}) e o amortecimento do pneu traseiro (b_{PT}).

7.3.1 VEÍCULO BAJA

O veículo utilizado nos experimentos foi um automodelo Baja “off-road” escala 1:5, modelo Duratrax Fire Hammer RCM (Radio-Controlled Model), como se observa na FIG. 7.4.

Apresenta um motor à combustão DTX G23 cc , com tração 4x2. As 4 suspensões do veículo possuem as mesmas características geométricas, de modo que todas representam suspensões dianteiras de MacPherson, onde a mola e o amortecedor são coaxiais.

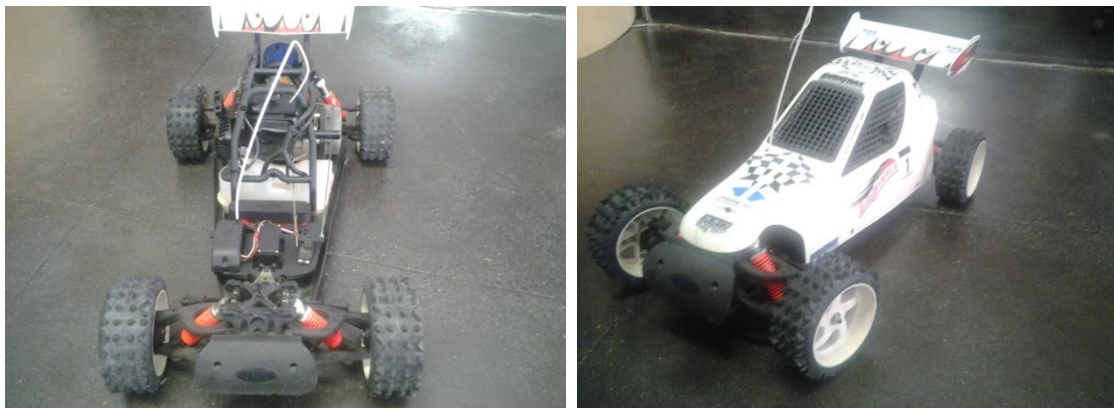


FIG. 7.4 – Automodelo DTX na ausência e presença da carenagem

A FIG. 7.5 expõe a instrumentação completa no veículo, com a caixa plástica instalada no veículo, e pronto para os testes. A FIG. 7.6 mostra a lombada a qual o Baja ultrapassou.



FIG. 7.5 – Baja acoplado com a caixa dos sensores



FIG. 7.6 – Lombada para o Baja

O Baja 1:5 foi colocado sobre uma balança, deste modo foi possível obter o valor de sua massa. A massa total foi de 8,8 Kg. Sendo que a massa suspensa (M_S) foi de 7,60 Kg, e a massa de cada pneu (m_P) de 0,3 Kg.

Conseguimos adquirir a massa do veículo para parte dianteira e traseira, sendo este colocado em uma base plana e estável, de modo que ficou em equilíbrio. Assim, a força normal atuando nas rodas dianteiras (F_D) foi de 3,25N. E a força normal atuando nas rodas traseiras (F_T) foi de 5,55N.

A seguir a TAB. 7.1 apresenta os valores referentes ao veículo Baja, da massa suspensa de rigidez da mola dianteira esquerda (K_{de}), da rigidez da mola dianteira direita (K_{dd}), da rigidez da mola traseira esquerda (K_{te}) e da rigidez da mola traseira direita (K_{td}). O amortecimento dianteiro esquerdo (b_{de}), o amortecimento dianteiro direito (b_{dd}), o amortecimento traseiro esquerdo (b_{te}) e o amortecimento traseiro direito (b_{td}). Esses dados foram retirados da literatura de (Moreira, A. L., 2011).

TAB. 7.4 – Valores Referentes a Massa Suspensa do Baja

K_{de}	5800 N/m
K_{dd}	5800 N/m
K_{te}	6000 N/m
K_{td}	6000 N/m
B_{de}	90 N.s/m
B_{dd}	90 N.s/m
B_{te}	110 N.s/m
B_{td}	110 N.s/m

A TAB. 7.2 fornece os valores referentes a massa não-suspensa do veículo Baja, isto é, do conjunto roda-pneu. Assim temos a rigidez da mola dianteira esquerda (K_{pde}), da rigidez da mola dianteira direita (K_{pdd}), da rigidez da mola traseira direita (K_{pte}) e da rigidez da mola traseira esquerda (K_{ptd}). Também, o amortecimento dianteiro esquerdo (b_{pde}), o amortecimento dianteiro direito (b_{pdd}), o amortecimento traseiro esquerdo (b_{pte}) e o amortecimento traseiro direito (b_{ptd}). Esses dados foram retirados da literatura de (Moreira, A. L., 2011).

TAB. 7.5 – Valores Referentes a Massa Não-Suspensa do Baja

K_{pde}	68642 N/m
K_{pdd}	68642 N/m
K_{pte}	68642 N/m
K_{ptd}	68642 N/m
B_{pde}	43 N.s/m
B_{pdd}	43 N.s/m
B_{pte}	43 N.s/m
B_{ptd}	43 N.s/m

7.3.2 VEÍCULO REAL

A FIG. 7.7 apresenta o veículo real utilizado, ou seja, um Fiat Palio. Os dados foram obtidos por meio das especificações técnicas do próprio carro.



FIG. 7.7 – Veículo real com a caixa dos sensores.

A FIG. 7.8 apresenta a lombada a qual veículo Palio ultrapassou para a coleta de dados.

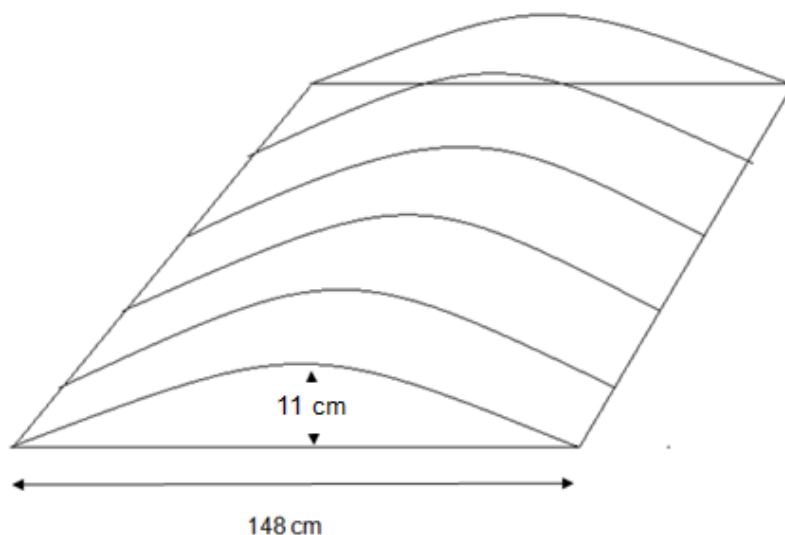


FIG. 7.8 – Lombada para veículo Palio

A massa do veículo com uma pessoa de 60 Kg foi de 1010 Kg. A massa suspensa (M_S) de 830 Kg, e a massa de cada pneu (m_P) de 45 Kg .

Foi realizado um estudo e, por meio do trabalho de (Merling, M. C. C., 2007) constatou-se de forma aproximada que a massa de um veículo real, em situação estática, na parte dianteira é cerca de 60% de sua massa, e 40% para sua parte traseira. Assim, a força normal a qual atuou nas rodas dianteiras (F_D) foi de 6060N, e a força normal nas rodas traseiras (F_T) de 4040N.

A seguir, a TAB. 7.3 informa os valores referentes a massa suspensa do veículo Palio. Com dados referentes à literatura de (Moreira, A. L., 2011).

TAB. 7.6 – Valores Referentes a Massa Suspensa do Palio

K_{de}	19960 N/m
K_{dd}	19960 N/m
K_{te}	17500 N/m
K_{td}	17500 N/m
b_{de}	1050 N.s/m
b_{dd}	1050 N.s/m
b_{te}	900 N.s/m
b_{td}	900 N.s/m

A TAB. 7.4 abaixo mostra os valores referentes a massa não-suspensa do veículo real. Com dados referentes à literatura de (Moreira, A. L., 2011).

TAB. 7.7 – Valores Referentes a Massa Não-Suspensa do Palió

K_{pde}	250000 N/m
K_{pdd}	250000 N/m
K_{pte}	250000 N/m
K_{ptd}	250000 N/m
B_{pde}	500 N.s/m
B_{pdd}	500 N.s/m
B_{pte}	500 N.s/m
B_{ptd}	500 N.s/m

7.3.3 DISTÂNCIAS DOS CENTROS DE GRAVIDADE EM RELAÇÃO AOS EIXOS

Para o cálculo do centro de gravidade dos veículos empregou-se o seguinte método do livro de (Jazar, R. N., 2008): com o veículo parado em uma superfície plana, obtivemos as forças normais atuando nos eixos: dianteiro (F_D) e eixo traseiro (F_T). Sendo estas medidas por meio do teste realizado no Baja, através de uma balança.

$$L_D = \frac{2L}{mg} F_T \quad (7.1)$$

$$L_T = \frac{2L}{mg} F_D \quad (7.2)$$

L_D é a distância do centro de gravidade ao eixo dianteiro, e L_T é a distância do centro de gravidade ao eixo traseiro.

$$l = L_T + L_D \quad (7.3)$$

A seguir a TAB. 7.5 apresenta a distância entre eixos (l) do Baja 1:5 e do veículo Palio, distância do centro de gravidade ao eixo dianteiro (L_D) e a distância do centro de gravidade ao eixo traseiro (L_T).

TAB. 7.8 – Valores das Distâncias

Baja 1:5		Veículo Palio	
l (cm)	47,8	l (cm)	242
L_D (cm)	30,14	L_D (cm)	96,8
L_T (cm)	17,66	L_T (cm)	145,2

8 TESTES E RESULTADOS

8.1 ANÁLISE DOS PARÂMETROS

Nesta fase, foi realizado um estudo sobre os parâmetros envolvidos no modelo dimensional, através da coleta de dados em tempo real, com os sensores. Sendo que estes foram analisados com testes, por meio de algumas trajetórias que os veículos percorreram.

Os veículos passaram por uma lombada, somente com um eixo lateral e verificou-se os dados em movimento de rolagem. Também para movimento de arfagem, na passagem por esta oscilação com todos os eixos, de maneira simultânea. Assim foi analisada a subida e a descida nesta oscilação.

Além desses dados foram analisadas as acelerações tridimensionais, ou seja, acelerações longitudinais, a_x , no eixo X, laterais, a_y , no eixo Y e verticais, a_z , no eixo Z. E também, as velocidades angulares tridimensionais, sendo longitudinais, ω_x , no eixo X, laterais, ω_y , no eixo Y e verticais, ω_z , no eixo Z. No modelo de 7 graus de liberdade referenciada no trabalho de (Moreira, A. L., 2011).

8.2 TESTES

Os experimentos foram realizados nas proximidades do Instituto Militar de Engenharia (IME), com o Baja 1:5. E um veículo comercial Fiat Palio. Projetou-se lombadas de acordo com as escalas dos veículos, de modo que ultrapassaram esta elevação, assim observamos os movimentos de rolagem e arfagem. Os testes duraram cerca de 0 à 12 segundos.

A seguir o gráfico apresenta o comportamento de arfagem do Baja 1:5 e do veículo real, e conforme o sistema de referência adotado na FIG. 3.2. A passagem do veículo pela lombada causou inclinação na subida, de valor positiva e descida, de valor negativa.

A FIG. 8.1 apresenta o gráfico do teste deste comportamento. E notou-se que tiveram um ângulo arfagem de subida cerca de 6 graus, e o de descida cerca de -6 graus.

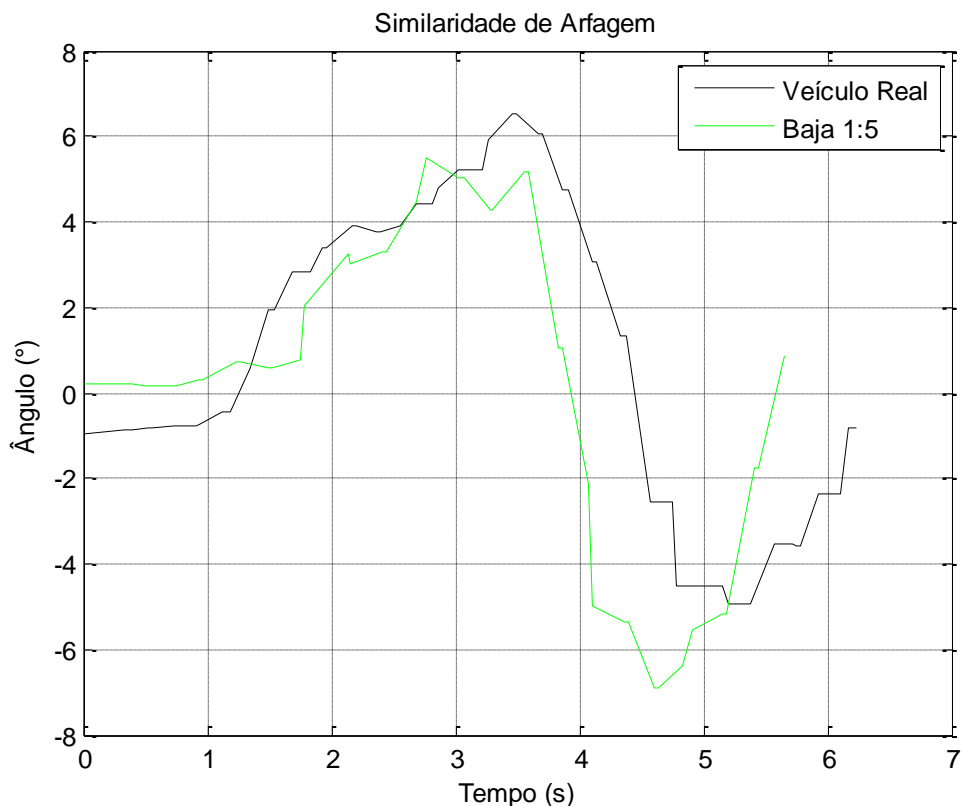


FIG. 8.1 – Teste da Similaridade de Arfagem

O gráfico abaixo, retratou o comportamento de rolagem do Baja 1:5 e do veículo real. De modo, os quais passaram somente com eixo lateral esquerdo, de acordo com sistema de referência adotado, na FIG. 3.2. Tiveram uma inclinação de valor positiva no sentido lateral para direita.

A FIG. 8.2 expressa o gráfico do teste para a similaridade do comportamento de rolagem entre o Baja e o veículo real. E notou-se deslocamento angular de rolagem com aproximadamente 6 graus, para o lado direito.

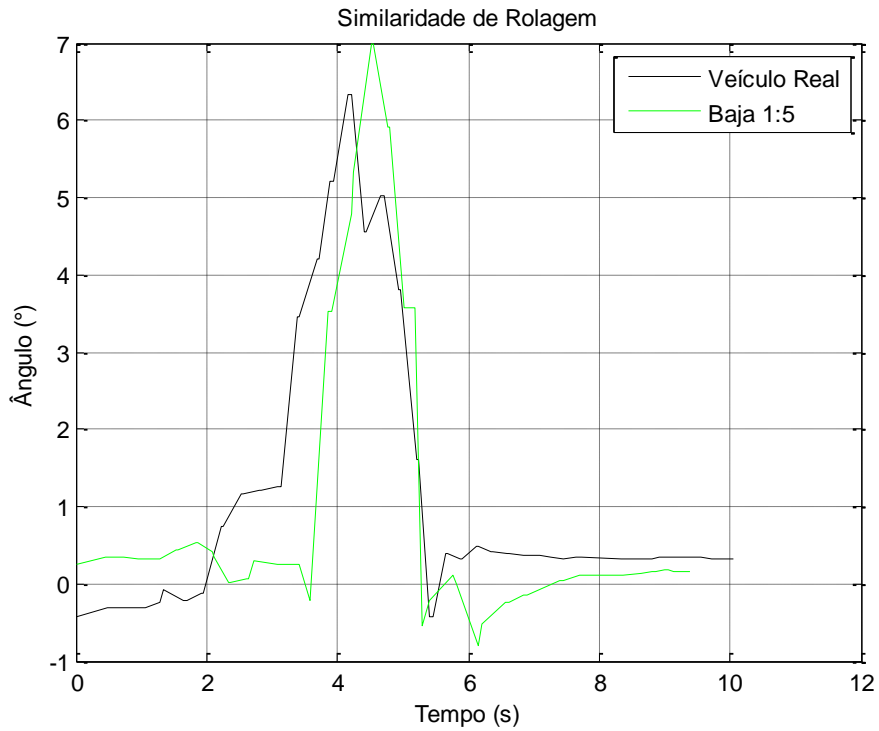


FIG. 8.2 – Teste da Similaridade de Rolagem

A FIG. 8.3 abaixo mostra os valores das acelerações em variação com o tempo, para o comportamento de arfagem, do Baja.

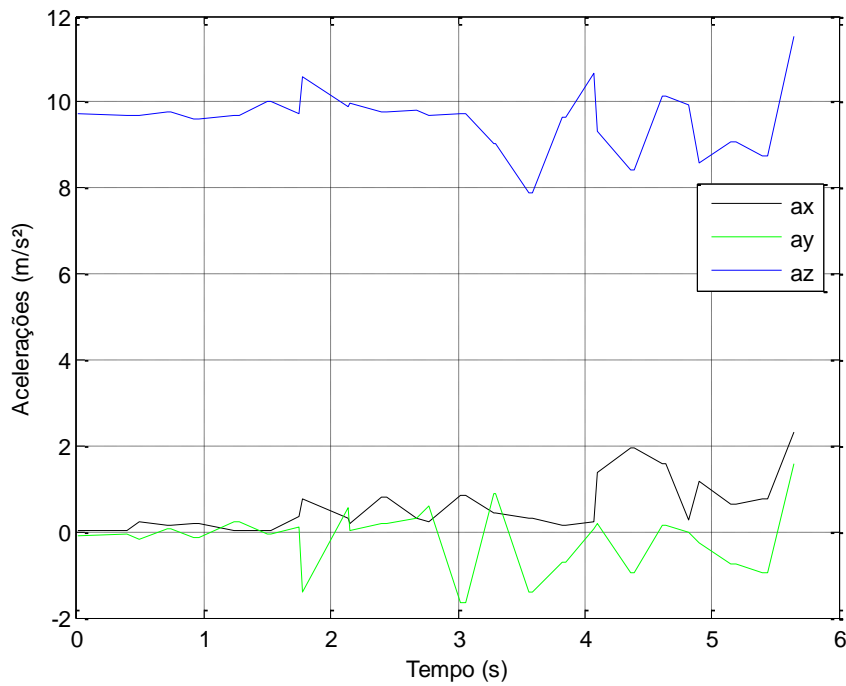


FIG. 8.3 – Acelerações do Baja para Movimento de Arfagem.

A FIG. 8.4 abaixo fornece os valores das acelerações em variação com o tempo, para o comportamento de arfagem, do Fiat Palio.

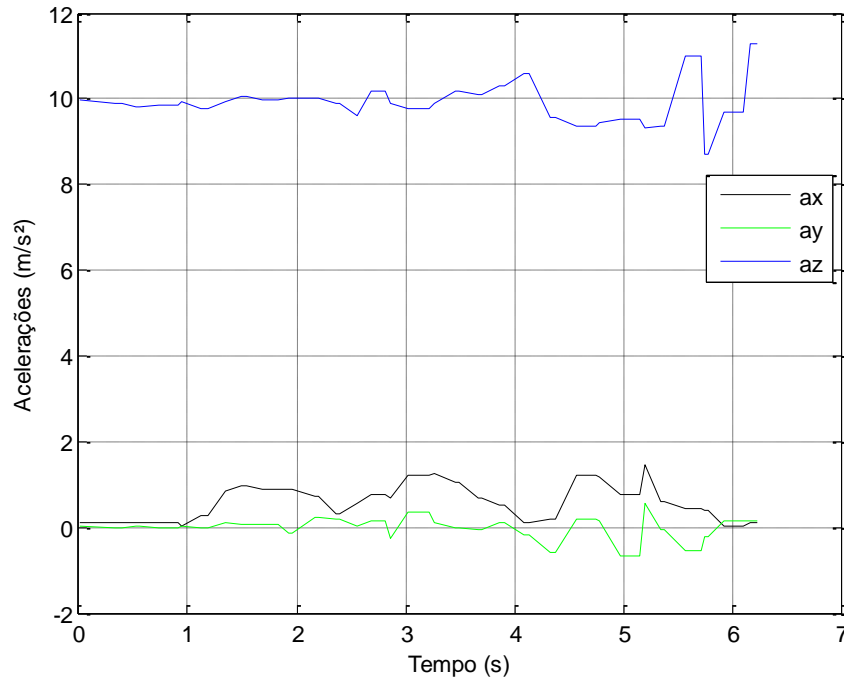


FIG. 8.4 – Acelerações do Palio para Movimento de Arfagem.

A FIG. 8.5 a seguir, exibe os valores das acelerações em variação com o tempo, para o comportamento de rolagem, do Baja.

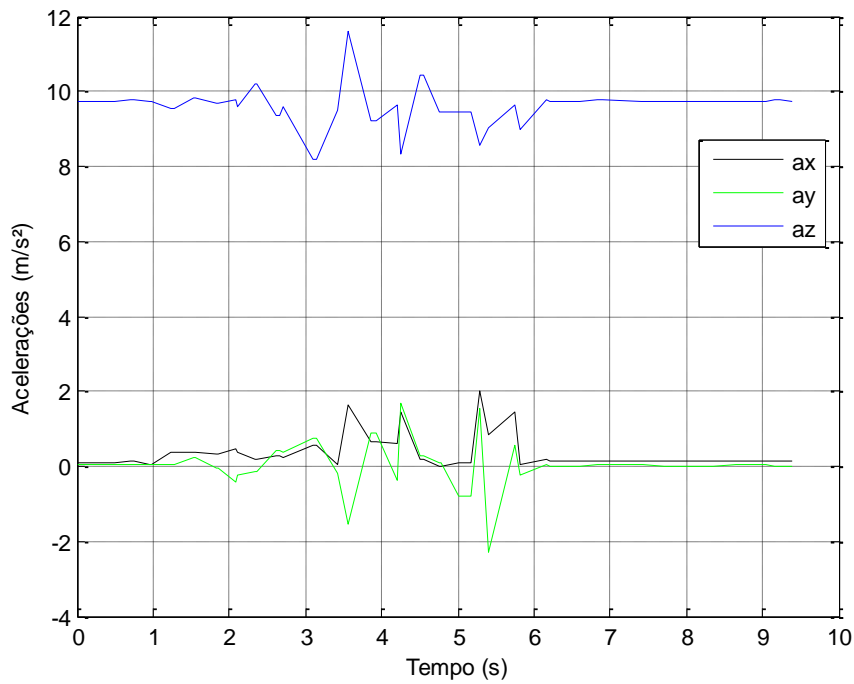


FIG. 8.5 – Acelerações do Baja para Movimento de Rolagem.

A FIG. 8.6 abaixo demonstra os valores das acelerações em variação com o tempo, para o comportamento de rolagem, do Fiat Palio.

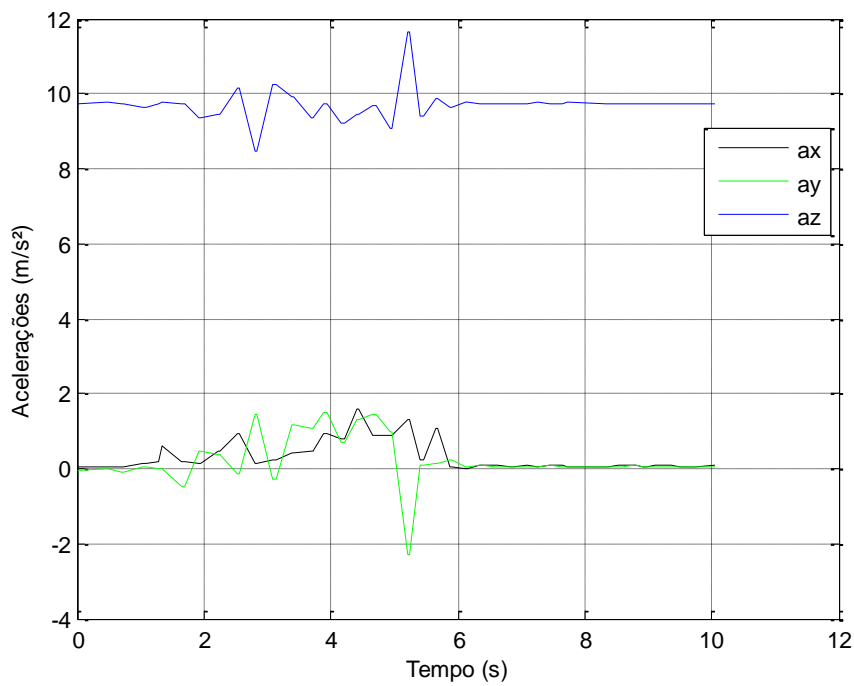


FIG. 8.6 – Acelerações do Palio para Movimento de Rolagem.

8.2.1 ANÁLISE DAS EXCITAÇÕES DE BASE

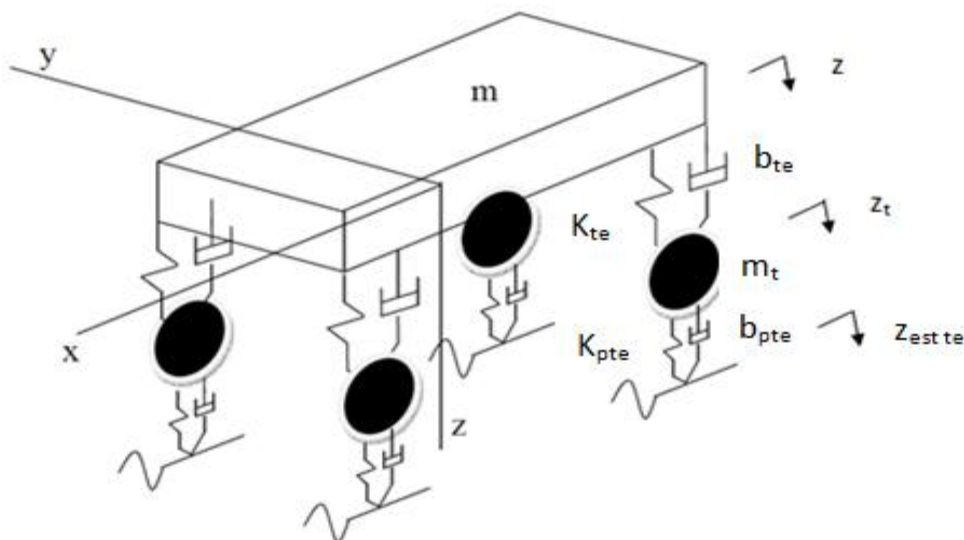


FIG. 8.7 – Modelo de um Veículo para Análise dos Pneus

A partir do modelo da FIG. 8.7 foi estabelecida uma análise das excitações de base para os quatro pneus do veículo, por meio da utilização de equações diferenciais adimensionais. O método para se chegar ao modelo adimensional, vem do mesmo adotado no capítulo 3. Assim encontram-se os parâmetros Π , através dessas equações.

Por meio das equações abaixo expressas de (Moreira, A. L., 2011), abordamos similaridade envolvendo o deslocamento dos quatro pneus de cada veículo, utilizados nos testes.

Abaixo temos a equação diferencial adimensional para pneu dianteiro esquerdo:

$$\frac{d^2 z_{pde}^*}{dt^{*2}} = \Pi_{73} \frac{dz^*}{dt^*} - \Pi_{74} \frac{d\theta^*}{dt^*} - \Pi_{75} \frac{d\phi^*}{dt^*} - \Pi_{73} \frac{dz_{pde}^*}{dt^*} + \Pi_{76} z^* - \Pi_{77} \theta^* - \Pi_{78} \phi^* - \Pi_{76} z_{pde}^* - \Pi_{79} \frac{dz_{pde}^*}{dt^*} + \Pi_{79} \frac{dz_{est de}^*}{dt^*} - \Pi_{80} z_{pde}^* + \Pi_{80} z_{est de}^* \quad (8.1)$$

A equação diferencial adimensional para pneu dianteiro direito encontra-se abaixo:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 z_{pdd}^*}{dt^{*2}} = & \Pi_{81} \frac{dz^*}{dt^*} - \Pi_{82} \frac{d\theta^*}{dt^*} - \Pi_{83} \frac{d\phi^*}{dt^*} - \Pi_{81} \frac{dz_{pdd}^*}{dt^*} + \Pi_{84} z^* - \Pi_{85} \theta^* + \Pi_{86} \phi^* - \Pi_{84} z_{pdd}^* - \Pi_{87} \\ & \frac{dz_{pdd}^*}{dt^*} + \Pi_{87} \frac{dz_{est\ dd}^*}{dt^*} - \Pi_{88} z_{pdd}^* + \Pi_{88} z_{est\ dd}^* \end{aligned} \quad (8.2)$$

A seguir, temos a equação diferencial adimensional para pneu traseiro esquerdo:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 z_{pte}^*}{dt^{*2}} = & \Pi_{89} \frac{dz^*}{dt^*} + \Pi_{90} \frac{d\theta^*}{dt^*} - \Pi_{91} \frac{d\phi^*}{dt^*} - \Pi_{89} \frac{dz_{pte}^*}{dt^*} + \Pi_{92} z^* + \Pi_{93} \theta^* - \Pi_{94} \phi^* - \Pi_{92} z_{pte}^* - \Pi_{95} \\ & \frac{dz_{pte}^*}{dt^*} + \Pi_{95} \frac{dz_{est\ te}^*}{dt^*} - \Pi_{96} z_{pte}^* + \Pi_{96} z_{est\ te}^* \end{aligned} \quad (8.3)$$

A equação diferencial adimensional para pneu traseiro direito segue-se abaixo:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 z_{ptd}^*}{dt^{*2}} = & \Pi_{97} \frac{dz^*}{dt^*} + \Pi_{98} \frac{d\theta^*}{dt^*} + \Pi_{99} \frac{d\phi^*}{dt^*} - \Pi_{97} \frac{dz_{ptd}^*}{dt^*} + \Pi_{100} z^* + \Pi_{101} \theta^* + \Pi_{102} \phi^* - \Pi_{100} z_{ptd}^* - \\ & \Pi_{103} \frac{dz_{ptd}^*}{dt^*} + \Pi_{103} \frac{dz_{est\ td}^*}{dt^*} - \Pi_{104} z_{ptd}^* + \Pi_{104} z_{est\ td}^* \end{aligned} \quad (8.4)$$

Obtemos os gráficos com os deslocamentos adimensionais em relação aos movimentos de arfagem e rolagem dos veículos, relatando as excitações de base para os quatro pneus.

O movimento de arfagem para veículo Baja está explícito nos gráficos abaixo, sendo analisados os deslocamentos adimensionais dos pneus.

A FIG. 8.8 representa o deslocamento adimensional do pneu dianteiro esquerdo do Baja. Assim notou-se uma oscilação ao passar sobre a lombada no tempo adimensional de aproximadamente 2.5, e um deslocamento adimensional de aproximadamente 4.

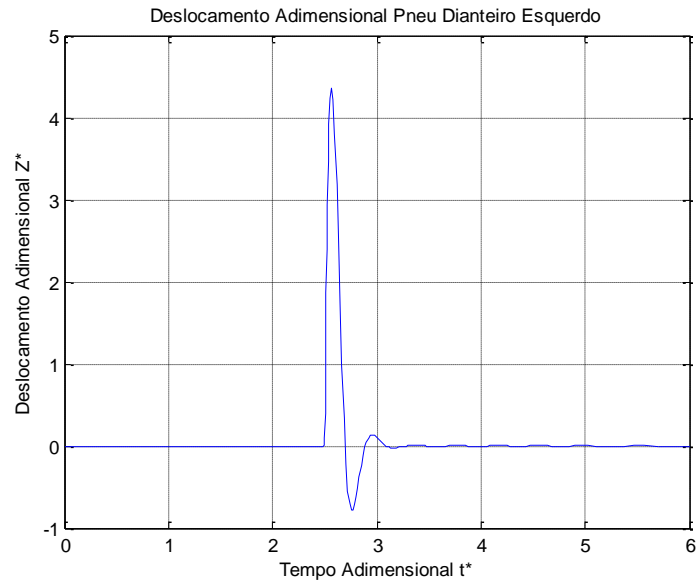


FIG. 8.8 – Deslocamento Adimensional do Pneu Dianteiro Esquerdo Modelo de Arfagem do Baja.

A FIG. 8.9 fornece o deslocamento do pneu dianteiro direito para o veículo Baja. Também obteve um deslocamento adimensional de aproximadamente 4, em tempo adimensional próximo de 2.5.

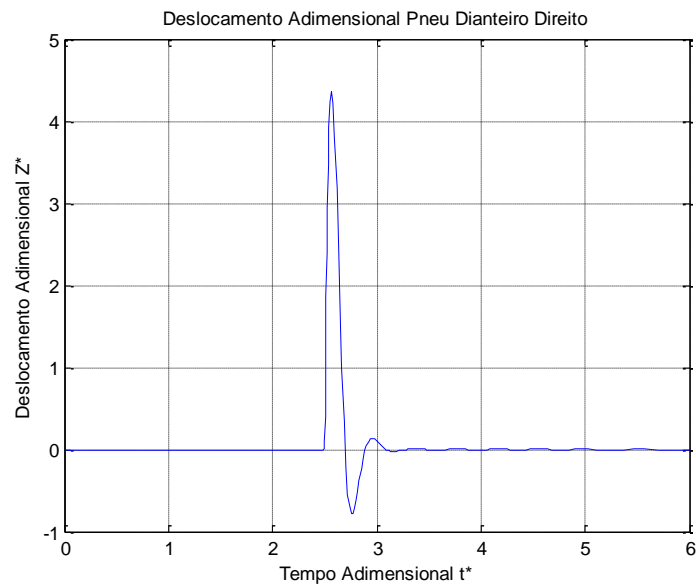


FIG. 8.9 – Deslocamento Adimensional do Pneu Dianteiro Direito Modelo de Arfagem do Baja

Observou-se que as FIG. 8.8 e FIG. 8.9 tiveram o mesmo comportamento, pelo fato do eixo dianteiro passar junto no instante de subida.

A FIG. 8.10 exibe o deslocamento do pneu traseiro esquerdo do Baja. Assim, este pneu teve a oscilação ao ultrapassar a lombada no tempo adimensional próximo de 4.3.

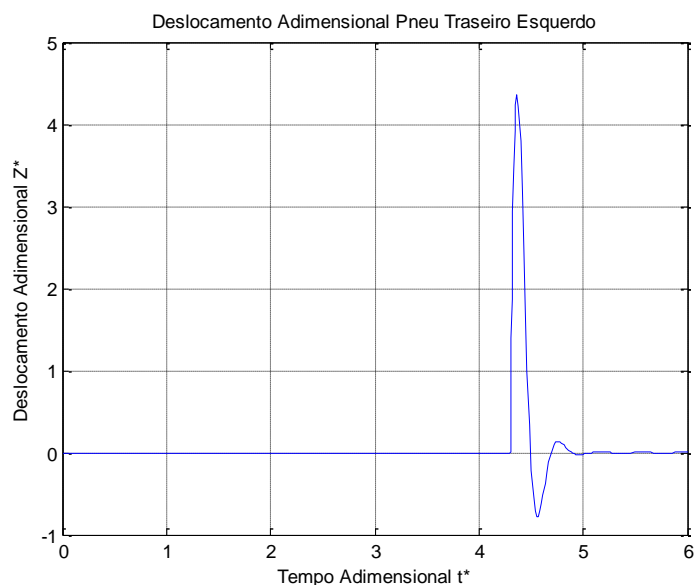


FIG. 8.10 – Deslocamento Adimensional do Pneu Traseiro Esquerdo Modelo de Arfagem do Baja

A FIG. 8.11 reproduz o deslocamento do pneu traseiro direito do Baja. Com deslocamento adimensional de cerca de 4, em um tempo adimensional de 4.3.

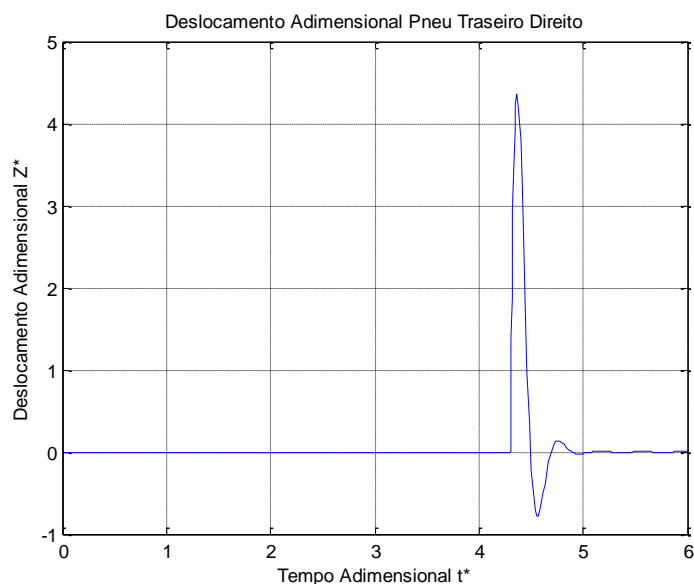


FIG. 8.11 – Deslocamento Adimensional do Pneu Traseiro Direito Modelo de Arfagem do Baja

Constatou-se comportamentos similares para FIG. 8.10 e FIG. 8.11, pois os pneus do eixo traseiro passaram simultaneamente, no instante de descida.

A seguir estão os deslocamentos dos pneus para o movimento de rolagem. Desta maneira, somente o eixo lateral esquerdo passou sobre a lombada. Assim, obtemos os deslocamentos adimensionais dos pneus, dianteiro e traseiro esquerdo.

A FIG. 8.12 fornece o deslocamento adimensional do pneu dianteiro esquerdo do baja, para um tempo adimensional de 8 de teste.

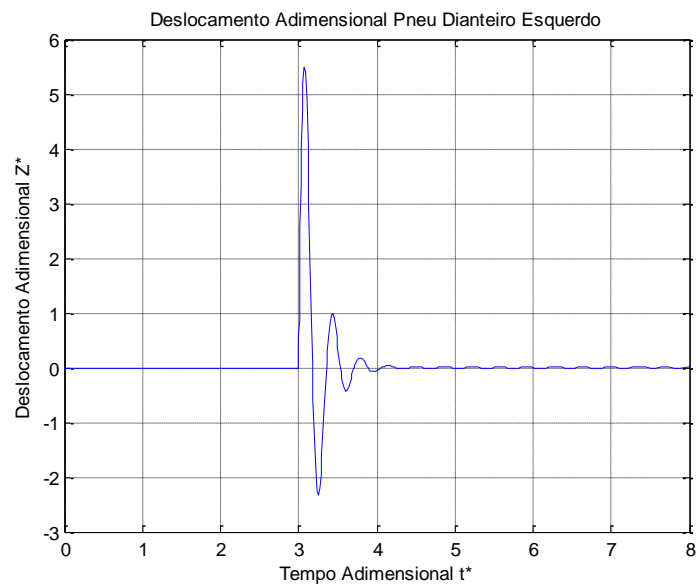


FIG. 8.12 – Deslocamento Adimensional do Pneu Dianteiro Esquerdo Modelo de Rolagem do Baja.

A FIG. 8.13 retrata o deslocamento adimensional do pneu dianteiro direito do baja, para um tempo adimensional de 8 de teste.

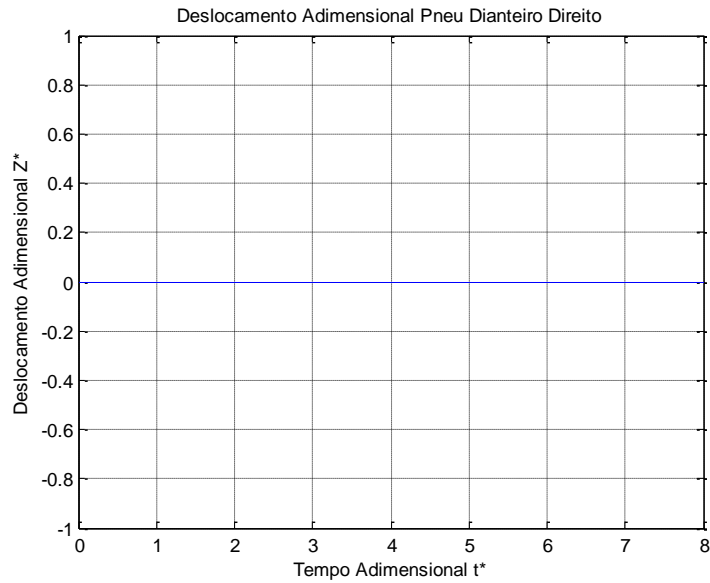


FIG. 8.13 – Deslocamento Adimensional do Pneu Dianteiro Direito Modelo De Rolagem do Baja.

O eixo dianteiro esquerdo gerou uma oscilação na suspensão, pelo motivo de ultrapassar a lombada. Mas no eixo dianteiro direito, o deslocamento adimensional foi nulo, pois não sofreu uma excitação.

A FIG. 8.14 exibe o deslocamento adimensional do pneu traseiro esquerdo do baja, para um tempo adimensional de 8 de teste.

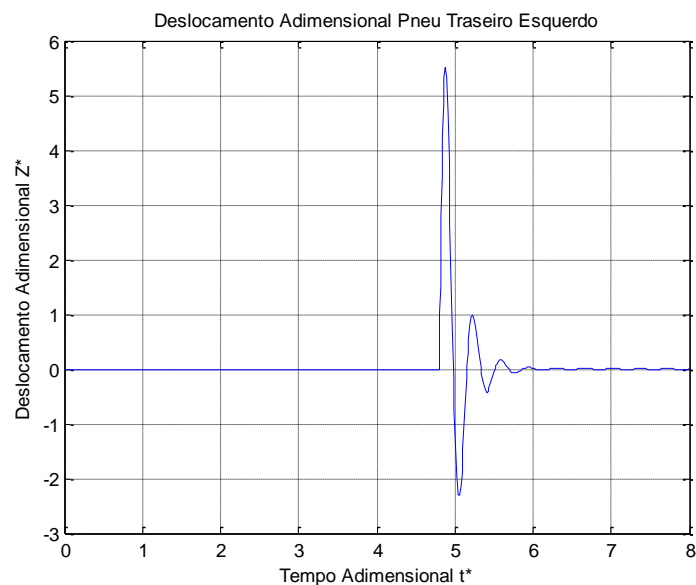


FIG. 8.14 – Deslocamento Adimensional do Pneu Traseiro Esquerdo Modelo de Rolagem do Baja

A FIG. 8.15 mostra o deslocamento adimensional do pneu traseiro direito do baja, para um tempo adimensional de 8.

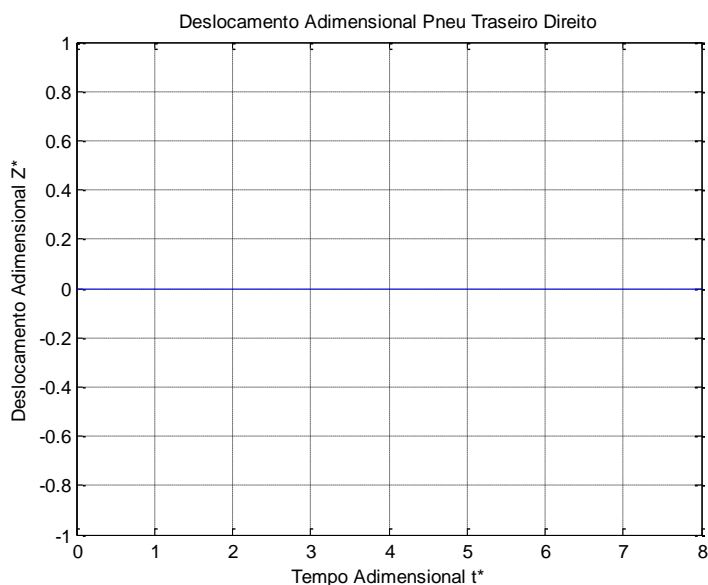


FIG. 8.15 – Deslocamento Adimensional do Pneu Traseiro Direito Modelo de Rolagem do Baja

Como verificado anteriormente os eixos dianteiro e traseiro sofreram oscilação pelo motivo de ultrapassar a lombada. Mas nos eixos, dianteiro e traseiro direito sofreram um deslocamento adimensional nulo, por não sofrer a excitação.

Obtemos as excitações de base do veículo Fiat Palio para os pneus dianteiros e traseiros. As figuras a seguir representam o movimento de arfagem para esses pneus.

As FIG. 8.16 e FIG. 8.17 exibem a excitação para o pneu dianteiro esquerdo, o qual foi o mesmo para o pneu dianteiro direito. Do fato, que passaram juntos pela lombada no instante de subida.

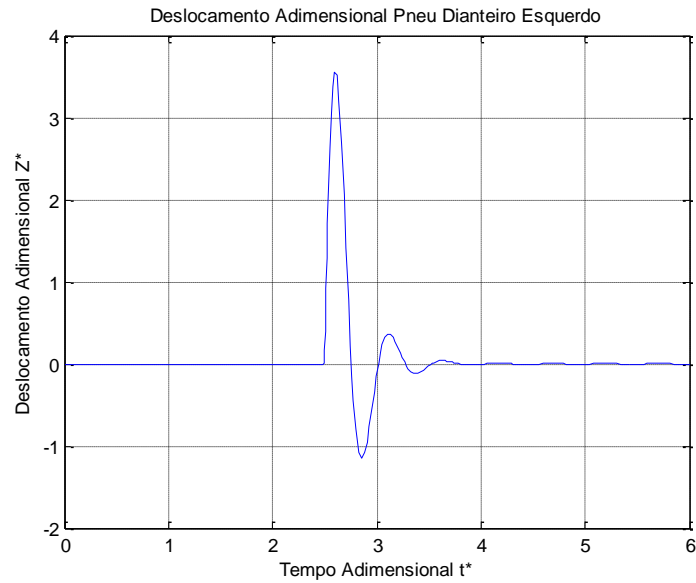


FIG. 8.16 – Deslocamento Adimensional do Pneu Dianteiro Esquerdo Modelo de Arfagem do Pálio

A FIG. 8.17 mostra a excitação para o pneu dianteiro direito do Pálio para um deslocamento adimensional de aproximadamente 3.

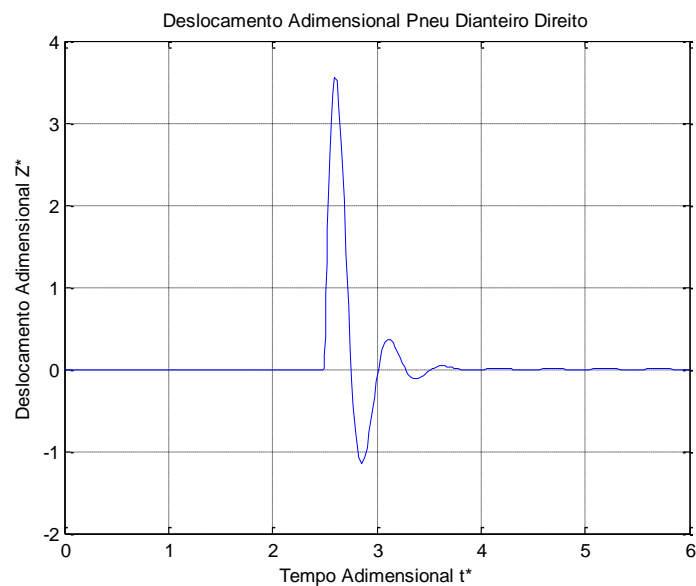


FIG. 8.17 – Deslocamento Adimensional do Pneu Dianteiro Direito Modelo de Arfagem do Pálio

A FIG. 8.18 retrata a excitação para o pneu traseiro esquerdo para um deslocamento adimensional aproximadamente 4.3.

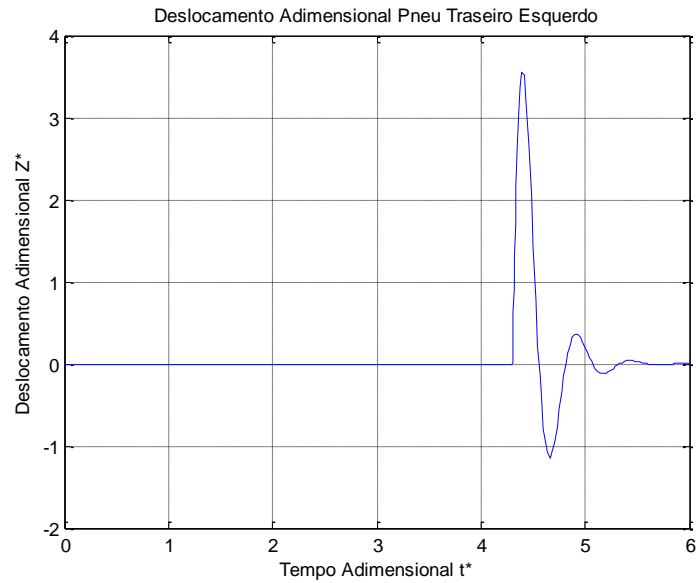


FIG. 8.18 – Deslocamento Adimensional do Pneu Traseiro Esquerdo Modelo de Arfagem do Pálio

A FIG. 8.19 expõe a excitação para o pneu traseiro direito para um deslocamento adimensional aproximadamente 4.3.

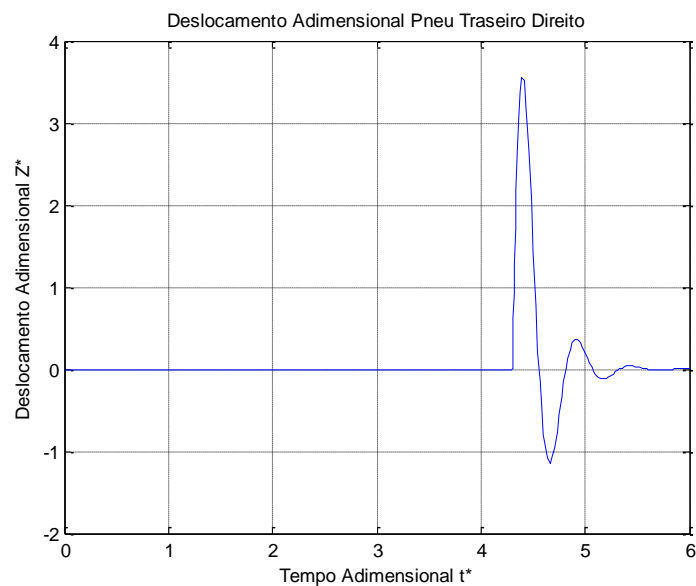


FIG. 8.19 – Deslocamento Adimensional do Pneu Traseiro Direito Modelo de Arfagem do Pálio

As FIG. 8.16, FIG. 8.17, FIG. 8.18 e FIG. 8.19 mostraram um comportamento similar para deslocamento adimensional dos pneus dianteiros e traseiros, pois ultrapassaram a lombada no mesmo instante. E esses pneus indicaram uma

similaridade dinâmica incompleta com o veículo Baja, pois obtiveram comportamentos próximos.

Abaixo abordamos as excitações de base do veículo Fiat Palio para os pneus dianteiros e traseiros. Os gráficos retratam o movimento de rolagem para esses pneus.

A FIG. 8.20 aborda a excitação para o pneu dianteiro esquerdo, com um deslocamento adimensional próximo de 4.

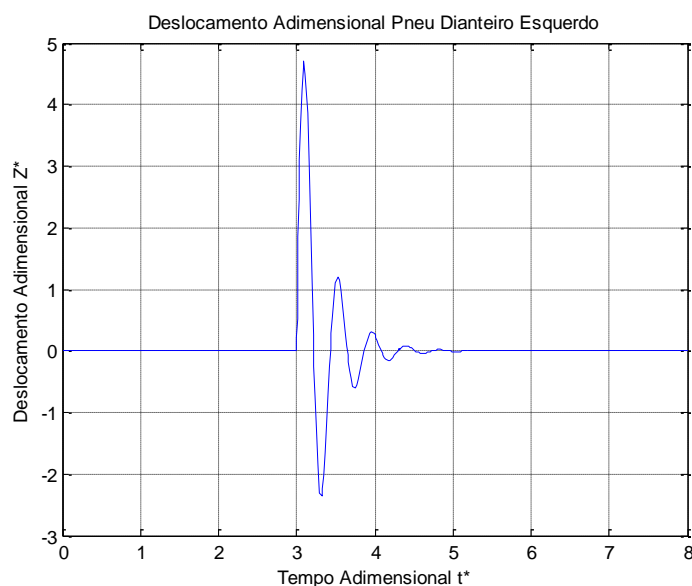


FIG. 8.20 – Deslocamento Adimensional do Pneu Dianteiro Esquerdo Modelo de Rolagem do Palio

A FIG. 8.21 exibe a excitação para pneu dianteiro direito, com deslocamento adimensional nulo, por não ter uma excitação de base. No fato, deste pneu não ultrapassar a lombada.

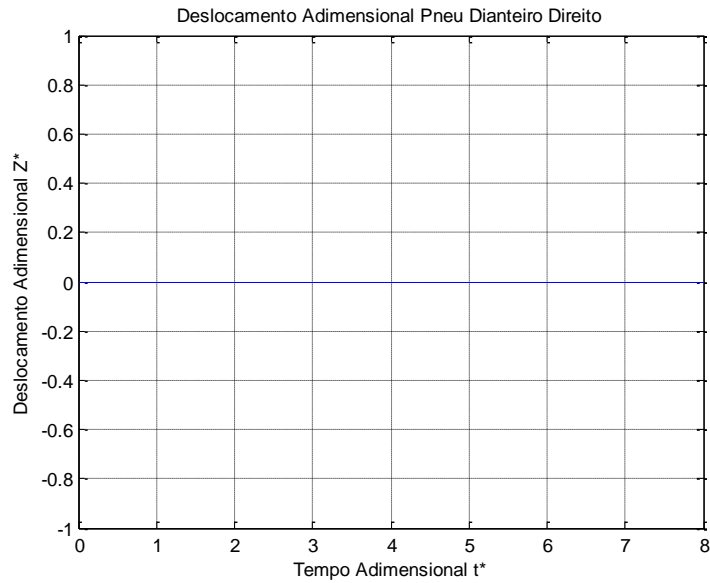


FIG. 8.21 – Deslocamento Adimensional do Pneu Dianteiro Direito Modelo de Rolagem do Pálio

A FIG. 8.22 mostra a excitação para o pneu traseiro esquerdo, com um deslocamento adimensional próximo de 4.

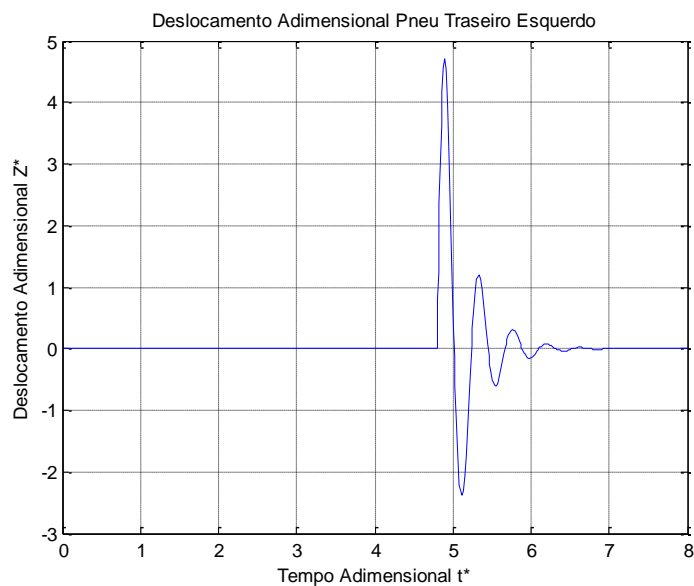


FIG. 8.22 – Deslocamento Adimensional do Pneu Traseiro Esquerdo Modelo de Rolagem do Pálio

A FIG. 8.23 indica a excitação para pneu traseiro direito, com deslocamento adimensional nulo, pois não ocorreu uma excitação de base. No fato, deste pneu não ultrapassar a lombada.

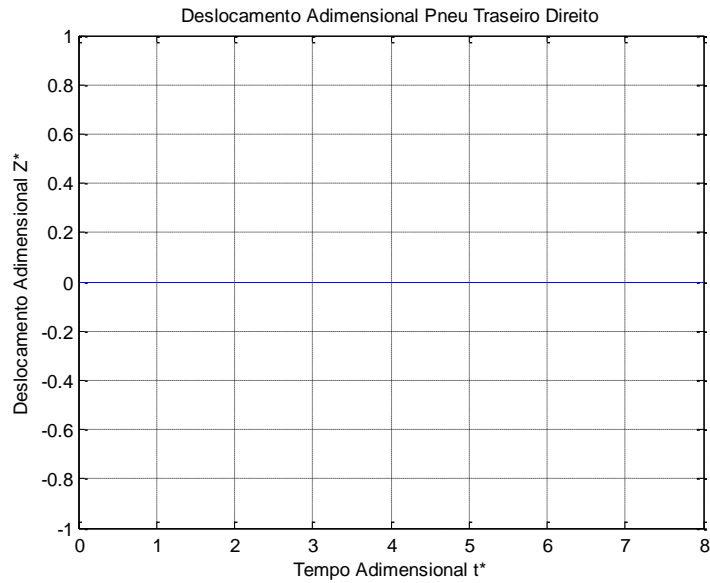


FIG. 8.23 – Deslocamento Adimensional do Pneu Traseiro Direito Modelo de Rolagem do Palio

Notamos pelas figuras que a similaridade dinâmica completa não pôde ser atingida na prática, pelo fato dos sistemas adimensionais resultantes da adimensionalização do veículo Baja e do Fiat Palio apresentaram similaridade dinâmica incompleta e as saídas dos sistemas adimensionais foram diferentes.

A TAB. 8.1 relata alguns grupos Π adimensionais relacionados ao veículo Fiat Palio e do Baja 1:5 com seus respectivos valores, assim conseguimos uma relação de similaridade dinâmica existente.

TAB. 8.9 – Grupos Π Adimensionais do Modelo Veicular

Grupos Π Adimensionais do Modelo Veicular		
Grupos Π	Baja 1:5	Fiat Palio
$\Pi_1 = \frac{m_s}{M}$	0.86	0.82
$\Pi_2 = \frac{m_{ns}}{M}$	0.03	0.02
$\Pi_3 = \frac{m_{ns}}{m_s}$	0.03	0.05
$\Pi_4 = \frac{K_{de}}{K_{eq}}$	0.24	0.26
$\Pi_5 = \frac{K_{dd}}{K_{eq}}$	0.24	0.26
$\Pi_6 = \frac{K_{te}}{K_{eq}}$	0.25	0.23
$\Pi_7 = \frac{K_{td}}{K_{eq}}$	0.25	0.23
$\Pi_8 = \frac{b_{de}}{\sqrt{m} K_{eq}}$	0.19	0.12
$\Pi_9 = \frac{K_{ptd}}{K_{eq}} \frac{M}{m_{pte}}$	74	85

Por meio da TAB. 8.1, os grupos Π adimensionais foram próximos, do Baja e do Palio. Desta maneira, verificou-se uma similaridade dinâmica incompleta entre os veículos nos testes.

O grupo Π para as lombadas foi determinado, por meio da relação comprimento com a altura. Assim, a lombada para o veículo Baja foi de 0,07; e da lombada para Palio de 0,06. Deste modo, foram similares geometricamente.

9 CONCLUSÃO

Este trabalho teve, como objetivo a validação experimental do comportamento de 2 veículos de escalas distintas. Verificando a existência da similaridade dinâmica incompleta.

A importância deste assunto se apoia no fato de que, a utilização de modelos em escala reduzida fornece um custo reduzido, segurança e a facilidade para realização dos testes. E testes em veículos reais apresentam custos elevados, perigos nas realizações dos testes, ocasionando acidentes e danos.

Foi utilizada para instrumentação dos veículos - a placa utilizada para coleta de dados, ou seja, a Arduimu V3, a qual permitiu 9 graus de liberdade, através dos acelerômetros, giroscópios e magnetômetros. Forneceu os ângulos de rotação, como rolagem, arfagem e guinada. Também a utilização do hardware XBee, responsável pela comunicação sem fio.

O software Arduino teve a função de enviar o código para a placa. E o LabVIEW de coletar os dados e de realizar a aquisição dos dados.

Verificou-se a instrumentação, através das conexões entre os dispositivos para seus funcionamentos, conseqüentemente foi embarcada nos veículos.

Com os hardwares em funcionamento, os veículos foram colocados nas pistas e ultrapassaram as lombadas, com suas respectivas escalas. O primeiro teste aplicou-se a similaridade envolvendo o comportamento de arfagem, os quais passaram sobre as lombadas, com todos seus eixos, de forma completa. Assim, foram analisados os ângulos arfagem de subida e descida. O segundo teste aplicou-se a similaridade para o comportamento de rolagem, onde os veículos ultrapassaram esta lombada, somente com um de seus eixos, isto é, o eixo lateral esquerdo. Deste modo, foi analisado o ângulo de rolagem.

Além da verificação da similaridade entre os ângulos, abordou-se a relação entre as excitações de base que os pneus dos veículos sofreram. Desta maneira, foi constatada a similaridade incompleta entre os 4 pneus, por meio da aproximação dos valores dos grupos Π adimensionais existentes, das equações diferenciais.

Este trabalho abre portas para pesquisas futuras, como no fato de ajustar alguns parâmetros do veículo, com intuito de se chegar à similaridade dinâmica completa.

Os objetivos foram alcançados com testes realizados de forma experimental, assim captando-se os valores adimensionais de forma correspondente e próximos entre os automóveis. E exaltando que modelos em escalas são responsáveis na predição de veículos reais.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRENNAN, S.; **Similarity Conditions for Comparing Closed-Loop Vehicle Roll and Pitch Dynamics**. Proceeding of the 2004 American Control Conference, Boston, Massachusetts, 2004.
- BRENNAN, S. ; Alleyne, A. ; DePoorter, M.; **The Illinois Roadway Simulator – A Hardware-in-the-loop Testbed for Vehicle Dynamics and Control**. Urbana, Illinois, 1998.
- BRENNAN, S. e Alleyne, A.; **The Illinois Roadway Simulator: A Mechatronic Testbed for Vehicle Dynamics and Control**. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.5, No.4, 2000.
- BULLIMORE, S. R. e Donelan, J. M.; **Criteria for Dynamic Similarity in Bouncing Gaits**. Journal of Theoretical Biology 250 (2008) 339–348, 2007
- BULLIMORE, S. R. e Burn, J. F.; **Distorting Limb Design for Dynamically Similar Locomotion**. Department of Anatomy, University of Bristol, Southwell Street, Bristol BS2 8EJ, UK. 2003.
- CARVALHO, A. G.; **Influência da Modelagem dos Componentes de Bias Instabilidade dos Sensores Inerciais no Desempenho do Navegador Integrado SNI/GPS**. Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, 2011.
- DE AMORIM, A. I. M.; **Sistema de Navegação Inercial Aplicável a Múltiplas Plataformas Móveis**. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho – Escola de Engenharia, 2012.
- DELATTRE, N. , Lafortune, M. A. e Moretto, P.; **Dynamic Similarity During Human Running: About Froude and Strouhal Dimensionless Numbers**. Journal of Biomechanics . November, 2008.
- DE SOUZA PINTO, J. L.; **Implementação de uma Metodologia para Avaliação do Desempenho em Sistemas Inerciais Puros**. Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, 2007.
- FESTER, V. G. e Slatter, P. T.; **Dynamic Similarity for Non-Newtonian Fluids in Globe Valves**. The Institution of Chemical Engineers, 2008.
- GRETZSCHEL, M. e Jaschinski, A.; **Design of an Active Wheelset on a Scaled Roller Rig**. Vehicle System Dynamics 2004, Vol. 41, No 5, pp. 365-381.

- GUNAWN, F. E.; **Two-Vehicle Dynamics of the Car-Following Models on Realistic Driving Condition.** Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology. Volume 12, Issue 2, April 2012.
- JUNIOR, J. A. F.; **Simulação e Implementação em Tempo Real de Sistemas de Navegação Inercial Integrados INS/GPS.** Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, 2009.
- HOBLET, M. P. C.; **Scale-Model Vehicle Analysis for the Design of a Steering Controller.** U.S.N.A. - Trident Scholar project report; no. 309 (2003).
- JAZAR, R. N.; **Vehicle Dynamics: Theory and Applications.** Springer Science Business Media, LLC, 2008.
- KIM, H. e Kim, J.; **Preliminary Design and Development Framework of Railway Vehicle Simulator for Engineering Evaluation Analysis.** IJR International Journal of Railway Vol. 4, No. 1 / March 2011, pp. 5-11.
- LAPAPONG, S. , Gupta, V. , Callejas, E. e Brennan, S.; **Fidelity of Using Scaled Vehicles for Chassis Dynamic Studies.** ISSN 0042-3114 print / ISSN 1744-5159 online ©2008 Taylor & Francis. April 2008.
- LI, Y.; **Dimensional Analysis for Control.** Master Thesis. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2005.
- LIMA, S. R. S.; **Integração GPS/INS Utilizando Sensores Inerciais Baseados em Sistemas MicroEletroMecânicos (MEMS).** Tese de Doutorado, Universidade Federal do Paraná, 2005.
- MERLING, M. C. C.; **Uma abordagem gerencial para o procedimento de projeto de suspensões de veículos terrestres.** Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2007.
- MOREIRA, A. L.; **Análise Adimensional de Viatura Militar.** Tese de Doutorado, Instituto Militar de Engenharia, 2011.
- NEIHOUSE, A. I. e Pepoon, P. W.; **Dynamic Similitude Between a Model and a Full-Scale Body for Model Investigation at Full-Scale Mach Number.** Langley Aeronautical Laboratory. Langley Air Force Base, Va. Washington March, 1950.
- PHANOMCHOENG, G. e Rajamani, R.; **New Rollover Index for Detection of Tripped and Un-tripped Rollovers.** IEEE 2009.
- POLLEY, M. e Alleyne, A. G.; **Dimensionless Analysis of Tire Characteristics for Vehicle Dynamics Studies.** Proceeding of the 2004 American Control Conference Boston, Massachusetts June 30 - July 2, 2004.

- SANTANA, D. D. S.; **Navegação Terrestre usando Unidade de Medição Inercial de Baixo Desempenho e Fusão Sensorial com Filtro de Kalman Adaptativo Suavizado**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2011.
- SHEN, Y. T. e Hess, D. E.; **A New Approach to Satisfy Dynamic Similarity for Model Submarine Maneuvers**. Hydromechanics Department Report. November 2007.
- VAUGHAN, C. L. e B Blaszczyk, M. B.; **Dynamic Similarity Predicts Gait Patterns for Homo Floresiensis and the Laetoli Footprints**. XXI ISB Congress, Podium Sessions, Monday 2 July 2007.
- VERMA, R. , Vecchio, D. D. e Fathy, H. K.; **Development of a Scaled Vehicle With Longitudinal Dynamics of an HMMWV for an ITS Testbed**. IEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 13, No 1, February 2008.
- WITAYA, W. , Parinya, W. e Krissada, C.; **Scaled Vehicle for Interactive Dynamic Simulation (SIS)**. Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics , Bangkok, Thailand, February 21 - 26, 2009.