

# **Análise da Estabilidade Direcional através de Prototipagem Virtual e Sistema Ativo de Controle Lateral.**

Felipe Firmo

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Álvaro Costa Neto

São Carlos  
2005

## **Agradecimentos**

Ao Prof. Dr. Álvaro Costa Neto, pela oportunidade e orientação do trabalho.

Aos colegas de pós-graduação, pelo companheirismo, incentivo e colaboração.

Aos professores e funcionários da EESC.

À minha família pelo apoio e compreensão.

A Deus, por tudo.

# Sumário

<b>Sumário</b>	<b>iv</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>v</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>vii</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b>	<b>viii</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumo</b>	<b>xii</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Capítulo 1</b>	
<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo.....	4
1.2 Resumo da dissertação.....	4
<b>Capítulo 2</b>	
<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>5</b>
2.1 Introdução.....	5
2.2 Dinâmica lateral de um veículo.....	5
2.2.1 Modelos não lineares da dinâmica lateral de um veículo.....	9
2.2.2 Modelos de pneu para a dinâmica lateral.....	9
2.2.3 Sistema de direção.....	11
2.3 Modelagem através de sistemas multicorpos.....	11
2.4 Sistemas de controle aplicado aos veículos.....	14
2.4.1 Controle da dinâmica lateral.....	17
2.4.2 Sistemas de controle e variáveis controladas.....	20
<b>Capítulo 3</b>	
<b>Revisão Teórica</b>	<b>24</b>
3.1 Introdução.....	24
3.2 Dinâmica lateral de veículos.....	24
3.2.1 Fundamentos da Dinâmica Lateral.....	25

3.3 Sistemas multicorpos.....	38
<b>Capítulo 4</b>	
<b>Modelagem do veículo</b>	<b>42</b>
4.1 Introdução.....	42
4.2 Modelagem matemática.....	42
4.3 Implementação do modelo do veículo.....	43
4.3.1 Modelo completo do veículo.....	45
4.3.2 Modelo de bicicleta dupla não linear reduzido.....	48
4.3.3 Análise de estabilidade do veículo.....	52
4.4 Controle da dinâmica de guinada.....	53
4.4.1 Estratégia do sistema de controle.....	57
<b>Capítulo 5</b>	
<b>Simulações e análises dos resultados</b>	<b>61</b>
5.1 Introdução.....	61
5.2 Validação do modelo multicorpos.....	61
5.3 Análise utilizando o modelo simplificado.....	62
5.4 Resultado das manobras.....	62
<b>Capítulo 6</b>	
<b>Conclusões</b>	<b>75</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>77</b>

## Lista de Figuras

Figura 2.1	Representação convencional da interação motorista / veículo / meio ambiente.....	14
Figura 2.2	Sistemas de controles usados atualmente.....	15
Figura 2.3	Controle de sub e sobre-esterçamento ( <i>understeer e oversteer</i> ).....	17
Figura 2.4	Esquema do Controle de Estabilidade (ESP). Fonte: Automotive Handbook SAE...	19
Figura 3.1	Sistema de coordenadas SAE.....	24
Figura 3.2	Forças de atuação no pneu. Fonte: Bosch (2000).....	26
Figura 3.3	Geometria de um veículo realizando curva.....	26
Figura 3.4	Propriedades da força lateral do pneu.....	28
Figura 3.5	Modelo de bicicleta realizando curva.....	29
Figura 3.6	Variação do ângulo de esterçamento com a velocidade.....	32
Figura 3.7	Ângulo de escorregamento lateral em curva de baixa velocidade.....	35
Figura 3.8	Ângulo de escorregamento lateral em curva de alta velocidade.....	35
Figura 3.9	Sistema multicorpos representado por um modelo de dados. Fonte: Schielen.....	37
Figura 4.1	Modelo multicorpos do veículo simplificado.....	44
Figura 4.2	Ilustração do modelo de pneu utilizado e do elemento <i>general force</i> .....	44
Figura 4.3	Modelo de bicicleta duplo. Fonte: Kiencke & Nielsen (2000).....	47
Figura 4.4	Dependência do ângulo de deriva do veículo com a velocidade longitudinal. Fonte: Kiencke & Nielsen, (2000).....	53
Figura 4.5	Forças aplicadas no contato pneu e pavimento durante a frenagem.....	56
Figura 4.6	Diagrama de blocos do sistema de controle.....	58

Figura 5.1	Manobra 1. Taxa de guinada sem atuação do controle.....	62
Figura 5.2	Manobra 1. Taxa de guinada com atuação do controle.....	62
Figura 5.3	Manobra 1. Frenagem durante atuação do controle.....	63
Figura 5.4	Manobra 1. Ângulo de deriva durante atuação do controle.....	63
Figura 5.5	Manobra 1. Taxa de guinada sem atuação do controle.....	64
Figura 5.6	Manobra 1. Taxa de guinada com atuação do controle.....	64
Figura 5.7	Manobra 1. Ângulo de deriva durante atuação do controle.....	65
Figura 5.8	Manobra 2. Taxa de guinada sem atuação do controle.....	65
Figura 5.9	Manobra 2. Taxa de guinada com atuação do controle.....	66
Figura 5.10	Manobra 2. Frenagem durante atuação do controle.....	66
Figura 5.11	Manobra 2. Ângulo de deriva durante atuação do controle.....	67
Figura 5.12	Manobra 3. Taxa de guinada sem atuação do controle.....	67
Figura 5.13	Manobra 3. Taxa de guinada com atuação do controle.....	68
Figura 5.14	Manobra 3. Ângulo de deriva durante atuação do controle.....	68
Figura 5.15	Manobra 3. Frenagem durante atuação do controle.....	69
Figura 5.16	Manobra 4. Taxa de guinada sem atuação do controle.....	70
Figura 5.17	Manobra 4. Taxa de guinada com atuação do controle.....	70
Figura 5.18	Manobra 4. Frenagem durante atuação do controle.....	71
Figura 5.19	Manobra 4. Ângulo de deriva durante atuação do controle.....	71
Figura 5.20	Trajetória do veículo sem atuação do controle de estabilidade.....	72
Figura 5.21	Trajetória do veículo com atuação do controle de estabilidade.....	73

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 ESC – Nomes registrados pelas montadoras. Fonte: <a href="http://www.esceducationlorg">www.esceducationlorg</a> .....	19
Tabela 4.1 Características gerais do veículo de Pasquini, (1998).....	44
Tabela 4.2 Propriedades de posição e inércia (Pasquini, 1998).....	44
Tabela 5.1 Parâmetros para as simulações de teste do controle de guinada.....	62

## Lista de Abreviaturas

4WD	<i>Four Wheel Drive</i> – Sistema de tração nas quatro rodas (4x4)
ABS	<i>AntiLock Braking System</i> – Sistema de freios anti-blocante
ASC	<i>Automatic Stability Control</i> – Controle Automático de Estabilidade
ASR	<i>Anti Slip Regulator</i> – Sistema de Controle de Tração
DSC	<i>Dynamic Stability Control</i> – Controle Dinâmico de Estabilidade
DSTC	<i>Dynamic Stability Traction Control</i> – Controle de Tração e Estabilidade Dinâmica
ECU	<i>Electronic Control Unit</i> – Unidade de Controle Eletrônico
EAD	Equações Algébrico-Diferenciais
EDO	Equações Diferenciais Ordinárias
ESC	<i>Electronic Stability Control</i> – Controle Eletrônico de Estabilidade
ESP	<i>Electronic Stability Program</i> – Programa de Eletrônico de Estabilidade
FWD	<i>Front Wheel Drive</i> – Sistema de Tração Dianteira
GL	Graus de Liberdade
VDC	<i>Vehicle Dynamics Control</i> – Controle Dinâmico Veicular
VSA	<i>Vehicle Stability Assist</i> – Assistente de Estabilidade Veicular
VSC	<i>Vehicle Stability Control</i> – Controle de Estabilidade Veicular
ADAMS	<i>Automatic Dynamics Analysis of Mechanical Systems</i> – Análises Dinâmicas Automáticas de Sistemas Mecânicos



## Lista de Símbolos

$a_Y$	aceleração lateral do veículo,
$a_{CG}$	aceleração lateral no centro de massa do veículo,
$b$	distância entre o centro de massa do veículo e o eixo dianteiro, m
$c$	distância entre o centro de massa do veículo e o eixo traseiro, m
$C_\alpha$	rigidez lateral do pneu, N/rad
$C_{\alpha f}$	rigidez lateral do pneu dianteiro, N/rad
$C_{\alpha r}$	rigidez lateral do pneu traseiro, N/rad
$F$	força no pneu, N
$F_L$	força na direção longitudinal do pneu, N
$F_Y$	força na direção lateral do pneu, N
$F_Z$	força na direção vertical do pneu, N
$F_{YR}$	força lateral no pneu traseiro, N
$F_{YF}$	força lateral no pneu dianteiro, N
$F_{vento}$	força do vento, N
$F_{Xij}$	forças longitudinais no pneu, N
$F_G$	forças gravitacionais, N

$F_R$	força de resistência ao rolamento, N
$g$	aceleração da gravidade, $m/s^2$
$I_{xx}$	momento de inércia da massa suspensa em torno do eixo x, $kg.mm^2$
$I_{yy}$	momento de inércia da massa suspensa em torno do eixo y, $kg.mm^2$
$I_{zz}$	momento de inércia da massa suspensa em torno do eixo z, $kg.mm^2$
$K$	gradiente subesterçante
$L$	entre-eixos do veículo, m
$M$	massa do veículo, kg
$n_{F,R}$	inclinações longitudinais do pneu, m
$p$	velocidade de rolagem (roll), m/s
$q$	velocidade de arfagem (pitch), m/s
$r$	velocidade em guinada (yaw), m/s
$R$	raio da curva, m
$t$	bitola do veículo, m
$V$	velocidade longitudinal do veículo, m/s
$V_{carac}$	velocidade característica veículo, m/s
$V_{crit}$	velocidade crítica do veículo, m/s

## Símbolos Gregos

$\alpha$	ângulo de deriva do pneu
$\alpha_f$	ângulo de deriva do pneu dianteiro, rad
$\alpha_r$	ângulo de deriva do pneu traseiro, rad
$\beta$	ângulo de deriva do veículo, rad
$\dot{\beta}$	taxa de variação do ângulo de deriva do veículo, rad/s
$\delta$	ângulo de esterço das rodas dianteiras, rad
$\delta_o$	ângulo de esterço da roda externa à curva, rad
$\delta_i$	ângulo de esterço da roda interna à curva, rad
$\delta_{Ackerman}$	ângulo de esterço de Ackerman, rad
$\psi$	ângulo de guinada do veículo, rad
$\phi$	ângulo de rolamento da massa suspensa, rad
$\dot{\psi}$	taxa de guinada do veículo, rad/s
$\mu$	coeficiente de adesão

## Resumo

FIRMO, F. *Análise da Estabilidade Direcional através de Prototipagem Virtual e Sistema Ativo de Controle Lateral*. São Carlos, 2005. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Características de dirigibilidade de um veículo automotivo foram estudadas com o auxílio de uma ferramenta computacional para simulação de sistemas multicorpos integrado a um controle de estabilidade direcional virtual. O modelo do veículo simplificado utilizado, de três graus de liberdade, proporciona o cálculo em tempo real das grandezas utilizadas para o controle de atitude de veículos, como velocidade em guinada e ângulo de deriva. Por isso, sua utilização como modelo de referência. O controle desenvolvido se mostrou bastante confiável e suficientemente simples. Os resultados mostraram boa aproximação através de uma avaliação subjetiva do comportamento do veículo. Finalmente, pode ser observado que o uso de ferramentas com uma interface amigável com o usuário proporcionam tempos de desenvolvimento mais curtos e estudos paramétricos mais fáceis, possibilitando ao projetista alcançar as características desejadas do veículo com custos muito menores.

Palavras-chave: modelagem, simulação, dinâmica veicular e controle de estabilidade.

## Abstract

FIRMO, F. *Directional stability analysis via virtual prototyping and Lateral Active Control System*. São Carlos, 2005. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Handling characteristics of an automotive vehicle were studied with the aid of a computational tool for multibody system simulation integrated to a virtual directional stability control. The simplified vehicle model used, a three degrees of freedom model, makes possible the real time calculus of the parameters used in the yaw active control systems, like yaw rate and vehicle sideslip angle. Due to that, the use of it as a reference model. The developed control strategy is enough credible and sufficiently simple. Results showed good agreement through the subjective vehicle evaluation. Finally, it can be observed that the use of a tool with a user friendly interface makes development times shorter and parametric studies easier, enabling the designer to achieve the desired vehicle characteristics control much less costly.

Keywords: modeling, simulation, vehicular dynamics and stability control.

